Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук

«УТВЕРЖДАЮ»
Академик-секретарь Отделения физических наук РАН
академик И.А.Щербаков
« » _____ 2014 года

УДК 539.123

# ОТЧЁТ
о научно-исследовательской работе по направлению
«Физика космических лучей и нейтринная астрофизика»
за 2013 год

Номер государственной регистрации темы: 01201050398

Директор ИЯИ РАН
академик В.А.Матвеев

Москва 2014

Научный руководитель: заместитель директора ИЯИ РАН по научной работе д.ф.-м.н. Безруков Л.Б.

## Список исполнителей

Лаборатория нейтринной астрофизики Отдела лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. Р.А.Мухамедшин)

Лаборатория лептонов высоких энергий Отдела лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики (заведующий лабораторией к.ф.-м.н. А.С.Лидванский)

Лаборатория радиохимических методов детектирования нейтрино Отдела лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики (заведующий лабораторией чл.-корр. РАН В.Н.Гаврин)

Лаборатория Подземного сцинтилляционного телескопа Баксанской нейтринной обсерватории (заведующий лабораторией к.ф.-м.н. В.Б.Петков)

Лаборатория низкофоновых исследований Баксанской нейтринной обсерватории (заведующий лабораторией к.ф.-м.н. А.М.Гангапшев)

# Реферат

Отчет включает: 77 с., 26 рис., 93 ссылки на публикации

НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА, АДРОНЫ, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ, ГАММА-ВСПЛЕСК, НЕЙТРОН, ШИРОКИЙ АТМОСФЕРНЫЙ ЛИВЕНЬ, СТАНДАРТНАЯ СОЛНЕЧНАЯ МОДЕЛЬ, СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ИСКУССТВЕННЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРИНО, СВЕРХВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ, РЕДКИЕ РАСПАДЫ, НИЗКОФОНОВЫЕ УСЛОВИЯ

В рамках темы «Физика космических лучей и нейтринная астрофизика» выполнены теоретические и экспериментальные исследования и получены новые результаты по ряду актуальных направлений.

Продолжался анализ результатов высокогорных экспериментов с рентген-эмульсионными камерами (РЭК) и разработка программы FANSY 2.0 для моделирования сильных взаимодействий адронов при сверхвысоких энергиях [1,2,3,4,5].

Продолжалось сотрудничество с ФИАН в создании высокогорного комплекса по многокомпонентному изучению широких атмосферных ливней «Памир-XXI» [6] в рамках Международного научно-исследовательского центра «Памир-Чакалтая».

Проведена разборка/сборка двухуровневой РЭК, предназначенной для изучения генерации чармированных частиц в фрагментационной области взаимодействующих адронов космических лучей [7] в рамках участия в работе экспедиции на Памире.

Изучено распространение ядер КЛ сверхвысоких энергий при их взаимодействии с реликтовыми фотонами и ВФИ – внегалактическими фоновыми излучениями (ультрафиолетовым, оптическим и инфракрасным излучением). Развита новая методика аналитических вычислений, основанных на эволюционных траекториях совместно с решением кинетических уравнений. Наиболее эффективный метод вычисления спектров дается методом сцепленных кинетических уравнений. Получены спектры для всех ядер, представляющих интерес, с включением вторичных ядер и протонов, рожденных при взаимодействии первичных ядер с реликтовым и ВФИ излучениями. Результаты сравниваются с наблюдениями и Монте-Карло вычислениями.

Вычислен спектр космических протонов с ГЗК обрезанием при включении большого числа модельных предположений: эволюция источников, различные расстояния между источниками, максимальная энергия обрезания и т.д. Показано, что для всех вводимых предположений спектр подавления, наблюдаемый в детекторах Обсерватории им. Пьера Оже (Pierre Auger Observatory, PAO), не может объясняться ГЗК обрезанием. Наблюдаемый PAO «дип» (провал) в спектре может быть хорошо описан при введении модельных эффектов.

Показано, что данные РАО по спектрам и анизотропии, а также дисперсия, исключают «анкл» (выполаживание) как особенность спектра, где происходит переход от галактических к внегалактическим КЛ. «Анкл» в работах настоящего проекта объясняется как часть электрон-позитронного дипа, автоматически получаемого в рамках взаимодействия протонов с реликтовым излучением. Переход от галактическим к внегалактическим космическим лучам происходит при более низкой энергии $E \approx 0.1$ ЕэВ.

Изучена обратная реакция аккрецируемого вещества на метрику чёрной дыры и стабильность горизонта Коши в заряженных и вращающихся чёрных дырах. Найдены стационарные решения уравнения Дирака для электрона под горизонтом Коши заряженной черной дыры. Развит новый метод анализа квазипериодических орбит вблизи вращающихся черных дыр и с его помощью найден угловой момент сверхмассивной черной дыры в центре Галактики. Исследовано образование сверхплотных сгустков тёмной материи и аннигиляция частиц тёмной материи в сгустках.

В рамках проекта «Нейтринные эксперименты ИЯИ РАН во ФНАЛ» (тематическое направление «Участие в глобальных проектах фундаментальной физики») выполнены теоретические и экспериментальные исследования и получены новые результаты по ряду актуальных направлений.

В эксперименте E938 (МИНЕРВА) проведен анализ инвариантных сечений рождения пионов при взаимодействии протонов с энергией 120 ГэВ с углеродной мишенью. Анализируются данных об эксклюзивном процессе квазиупругого рассеяния нейтрино на на ядрах углерода с рождением мюона и протона в конечном состоянии. Кроме того, в этом эксперименте впервые была продемонстрирована возможность передачи информации с помощью нейтринного пучка

В эксперименте E929 (НОВА) выполнялись работы по замене блоков электроники на прототипе ближнего детектора, а также точность геометрической установки модулей детектора.

В рамках релятивистской модели искаженных волн в импульсном приближении, которая хорошо описывает данные по квазиупругому рассеянию модели электронов на ядрах, были вычислены сечения квазиупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах хлора, аргона и кальция.

Исследовалась динамическая связь между топологией магнитного поля, гелиосферой и магнитосферой вращения Солнца.

Разработана концепция низкофонового газового детектора с порогом ниже 1 кэВ для регистрации когерентного рассеяния антинейтрино от реактора. Изготовлена опытная конструкция детектора, проведены ее испытания и по результатам испытаний проведена

доработка конструкции. На стендовой установке отработана методика дискриминации шумов и электромагнитных наводок по форме импульса для амплитуды импульсов менее 1 кэВ и коэффициенте газового усиления $4x10^4$, измеренного при калибровке источником рентгеновского излучения от $^{55}Fe$. Показано, что дискриминация по форме импульса позволяет эффективно подавить фон от электромагнитных наводок и микрофонного эффекта в области, где ожидается эффект от когерентного рассеяния нейтрино на ядрах с фактором примерно $10^3$. Рассмотрены вопросы фона от нейтронов, генерированных мюонами космических лучей. Предложена схема экспериментальной установки.

В рамках международной Европейской коллаборацией Герда разрабатывается проект установки нового поколения по поиску безнейтринного двойного бета распада (БДБР) $^{76}Ge$. Поиск БДБР ядер является в настоящее время одной из центральных задач экспериментальной физики низких энергий. Открытие БДБР имело бы фундаментальные следствия как для физики частиц, так и для космологии. Для решения этой задачи в настоящее время проводятся эксперименты в нескольких десятках лабораторий с различной методикой. До сих пор в большинстве экспериментов получены только верхние пределы для времени БДБР. Только в эксперименте Гейдельберг-Москва часть коллектива во главе с проф. Клабдором заявила 10 лет назад о наблюдении положительного эффекта. В любом случае необходимы как другие аналогичные эксперименты для его надежного подтверждения, так и подготовка новых экспериментов с повышенной чувствительностью

В подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН, расположенной на глубине 4900 м.в.э., совместно с сотрудниками обсерватории, завершён монтаж сцинтилляционного детектора для измерения ультранизких концентраций изотопа $^{14}C$. Кварцевая ячейка, объёмом ~2 л, заполнена жидким органическим сцинтиллятором на основе ЛАБа (ВРО- 2 г/л). С помощью гамма источников $^{241}Am$, $^{137}Cs$, $^{60}Co$ проведены калибровочные измерения энергетической шкалы. Начато измерение фона. Предварительные результаты дают величину 0.04 соб./сек в диапазоне 0-3.5 МэВ.

Продолжается разработка методов мониторинга нейтронного потока для решения задач ядерной и термоядерной физики, геохронологии.

По теме «Исследование анизотропии и вариаций космических лучей $10^{11}$ – $10^{20}$ эВ» получены новые результаты:

1. Экспериментально обнаружено локальное подавление во время гроз возмущений глобального геомагнитного поля.
2. Стабилизация магнитных пульсаций протекает в режиме медленного пробоя стратосферы убегающими электронами в припороговом режиме.

3. Зарегистрирован факт взаимного влияния возмущений геомагнитного поля и приземной напряжённости электростатического поля.

4. Наблюдается магнитное поле, вызванное током ионов образуемых при медленном пробое на убегающих электронах.

По вариационной программе были получены следующие новые данные:

- О потоках тепловых нейтронов во время Форбуш-понижений интенсивности космических лучей, путем измерений с помощью глобальной сети эн-детекторов, как над земной поверхностью, так и под ней. Показано хорошее согласие с данными нейтронных мониторов и продемонстрирована принципиальная возможность использования эн-детекторов под различными поглотителями для спектрометрии частиц вовлеченных в Форбуш эффект.

- По измерению нейтронных потоков во время гроз с целью проверки сообщений о возможной генерации нейтронов молниями. Был получен отрицательный результат: ни в одной из гроз в Москве за 2011-2013 гг. не было зафиксировано превышения потока тепловых нейтронов над фоновым потоком.

Впервые в мировой практике, с помощью двух уникальных методик получены совместные гибридные данные по Широким Атмосферным Ливням (ШАЛ) на рекордной высоте 4300 м над уровнем моря.

За 2012 - 2013 гг. на установке ProtoPRISMA, благодаря обеспечению её непрерывной работы, был накоплен большой объем информации по спектру мощностей ШАЛ, как по числу частиц, так и по числу нейтронов.

В конце 2013 г. на БНО создана новая нейтронная вариационная установка из 4-х эн-детекторов, находящимися под разными поглотителями – Нейтрон-БНО. Основная цель установки – изучение Форбуш-эффекта, поведение нейтронного потока во время гроз и прочих спорадических вариаций. С 6.12.13 пошел непрерывный набор информации с этой установки.

В отчёте приведены результаты работы по теме “Исследование характеристик потоков частиц космического излучения высоких и сверхвысоких энергий на комплексе установок БНО” за 2013 год. В течение года поддерживался режим непрерывного набора информации установок БПСТ и “Ковёр-2” и проводился мониторинг потоков частиц космического излучения на этих установках. На установке “Андырчи” продолжалась наладка новой системы сбора информации, позволяющей, в том числе, измерять темп счёта установки каждую миллисекунду. Продолжались работы по созданию установки “Ковер-3” и по разработке проекта модернизации БПСТ. По экспериментальным данным комплекса установок получены новые результаты, обсуждаемые в отчёте.

В международном эксперименте GERDA по поиску безнейтринной моды двойного бета-распада изотопа 76Ge завершена первая фаза эксперимента. Получен наивысший предел на безнейтринную моду двойного бета распада изотопа Ge-76 на уровне $2{,}1*10^{25}$ лет. С учетом результатов предыдущих экспериментов, получен предел на уровне $3{,}0*10^{25}$ лет, что соответствует ограничению сверху на массу «Майорановского» нейтрино на уровне 0,2÷0,4эВ в зависимости от методов вычисления матричных элементов ядра.

В течение года было выполнено измерение радиационной чистоты семи образцов различных материалов:

- обрезанный и отполированный образец кристалла молибдата кальция (були)
- молибдат кальция порошкообразный, образец №1
- вольфрамовые кубики для низкофоновой защиты (для ГГНТ)
- молибдат кальция порошкообразный, образец №2
- карбонат кальция, сырье для выращивания кристаллов молибдата кальция
- молибдат кальция кристаллический, кристалл не обрезанный (буля)
- формиат кальция, сырье для выращивания кристаллов молибдата кальция.

Для всех образцов получены активности радиоактивных примесей K-40, Tl-208 (ряд Th-232), Bi-214 (ряд u-238), Ac-228 (ряд Th-232).

В новом этапе эксперимента по поиску 2К-захвата в 78Kr и 124Xe разработана простая и дешёвая процедура очистки ксенона от следового количества криптона. По результатам обработки информации, накопленной за 1130час. установлен предел на период полураспада $^{124}$Xe относительно 2К-захвата: $T_{1/2}(2K,2\nu) \geq 3.9\cdot10^{20}$ лет (90% у.д.).

Завершена комплектация промышленными электронными блоками экспериментального варианта мобильного высокочувствительного монитора радона в воздухе на основе импульсной ионной ионизационной камеры высокого давления (ИКВД). Собран тестовый вариант монитора. При регистрации α-частиц от распада Rn-222 в образце воздуха, находящегося в ИКВД при давлении 620 мм рт.ст., по линии 5.49 МэВ достигнуто уникальное для данного типа детекторов разрешение 1.9%.

При изучении вариаций потока тепловых нейтронов природного происхождения в подземной лаборатории с помощью детекторов на основе тонкого сцинтиллятора из ZnS(Ag) с добавками 6LiF набрана статистика за ~9500 часов. Обнаружена гармоника в темпе счета всех четырех детекторов с периодом ~360дней (годовая волна). Амплитуда годовой волны темпа счетов детекторов составляет не менее 7% от среднегодового темпа счета.

В международном эксперименте AMORE по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа 100Mo продолжались измерения радиационной чистоты различный образцов сырья для производства кристаллов $CaMoO_4$, полученных с применением различных технологий.

Для исследования содержания изотопа 14C в жидких органических сцинтилляторах собрана низкофоновая установка на основе сцинтилляционного детектора с рабочим веществом из органического сцинтиллятора полученного из первого исследуемого образца. Сцинтилляционный детектор окружён пассивной защитой из 15см меди и 5 см свинца. Установка расположена в низкофоновом боксе НЛГЗ. Начаты измерения.

Содержание


| | Стр. |
|---|---|
| Реферат | 3 |
| Введение | 9 |
| Основные результаты | 18 |
| 1 Нейтринная астрофизика | 18 |
| 1.1 Генератор сильных взаимодействий адронов при энергиях $10^{11}$ – $10^{20}$ эВ | 18 |
| 1.2 Космические лучи сверхвысоких энергий | 19 |
| 1.3 Тёмная материя и тёмная энергия в астрофизике космических лучей | 20 |
| 1.4 Нейтринные эксперименты ИЯИ РАН во ФНАЛ: эксперименты E938 (MINERvA) и E929 (NOvA) | 22 |
| 1.4.1 Сечения квазиупругого рассеяния нейтрино на ядрах: эксперимент МИНЕРВА | 22 |
| 1.4.2 Измерение параметров нейтринных осцилляций: эксперимент E929 (НОВА) | 23 |
| 1.5 Топология магнитного поля, динамика Солнца и потоки нейтрино | 22 |
| 1.6 Разработка методики регистрации нейтрино промежуточных энергий | 23 |
| 1.7 Эксперимент GERDA по поиску двойного безнейтринного ß-распада 76Ge | 23 |
| 1.8 Разработка сцинтиллятора с низким содержанием изотопа 14C для регистрации нейтрино низких энергий | 32 |
| 1.9. Разработка методов мониторинга нейтронного потока | 34 |
| 2 Исследование анизотропии и вариаций космических лучей $10^{11}$ – $10^{20}$ эВ | 35 |
| 2.1 Исследований вариаций космических лучей во время гроз | 35 |
| 2.1.1 Исследование связи возмущений космических лучей с геомагнитными пульсациями | 44 |
| 2.3 Тепловые нейтроны в широких атмосферных ливнях и окружающей среде | 45 |
| 4 Исследование характеристик потоков частиц космического излучения высоких и сверхвысоких энергий на комплексе установок БПСТ | 51 |
| 4.1 Мониторинг потоков частиц космического излучения высоких и сверхвысоких энергий на комплексе установок БПСТ | 51 |
| 4.2 Исследование первичных космических лучей в области энергий $10^{13}$ – | 53 |

$10^{18}$ эВ на комплексе установок БПСТ
4.3 Подготовка проекта модернизации Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа 54
4.4 Гамма-астрономия высоких, сверхвысоких и ультравысоких энергий 55
4.5 Создание установки “Ковер-3” для изучения спектра и состава ПКИ в области первичных энергий 50 ТэВ – $10^4$ ТэВ 55
4.6 Нейтринные эксперименты на БПСТ 55
4.7 Исследование анизотропии и вариаций космических лучей $10^{11}$ – $10^{20}$ эВ 57
4.8 Международный эксперимент EMMA 57
5 Исследование редких распадов и процессов в низкофоновых условиях 59
5.1 Участие в международном эксперименте GERDA по поиску безнейтринной моды двойного бета-распада изотопа 76Ge 59
5.2 Исследование радиоактивных загрязнённостей различных материалов 59
5.3 Новый этап эксперимента по поиску 2К-захвата в 78Kr и 124Xe 59
5.4 Создание воздушной ионной камеры высокого давления для измерения содержания 222Rn в подземных условиях 61
5.5 Изучение вариаций потока тепловых нейтронов природного происхождения в подземной лаборатории с помощью детекторов на основе тонкого сцинтиллятора из ZnS(Ag) с добавками 6LiF 61
5.6 Участие в международном эксперименте AMORE по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа 100Mo 62
5.7 Экспериментальная проверка стабильности периода полураспада альфа-активного ядра 214Po 62
5.8 Исследование содержания изотопа 14C в жидких органических сцинтилляторах 63
Заключение 64
6 Публикации 69
6.1 Публикации к разделу 2.1 69
6.2 Публикации к разделу 2.2 72
6.3 Публикации к разделу 2.3 75
6.4 Публикации к разделу 2.4 76

# Введение

По теме Физики космических лучей и нейтринной астрофизики существует ряд фундаментальных проблем, решение которых важно для выяснения вопросов о происхождении космических лучей в широком диапазоне энергий (в том числе, через образование черных дыр), их распространения в космическом пространстве и регистрации научными установками, а также свойств темной материи. Космические лучи сверхвысоких энергий могут дать уникальную информацию о характере взаимодействий частиц при энергиях, недоступных в обозримом будущем на ускорителях, и о свойствах источников космических лучей. Вероятными астрофизическими источниками космических лучей сверхвысоких энергий и нейтрино могут служить черные дыры в ядрах галактик и сверхновые, поэтому их исследование представляет большой интерес.

Наземные астрофизические эксперименты невозможны без использования расчетов развития атмосферных ядерно-электромагнитных каскадов, инициируемых частицами первичного космического излучения (ПКИ) при энергии $E_0 \gtrsim 10^{11}$ эВ. Модели адрон-ядерных взаимодействий пакета CORSIKA отлажены с использованием результатов широких атмосферных ливней (ШАЛ) на уровне моря. Тем не менее, не существует модели, которая описывает все данные по ШАЛ,

Данные высокогорных рентгено-эмульсионных камер (РЭК) при этом не принимаются во внимание, хотя именно техника РЭК позволяет регистрировать группы наиболее энергичных частиц ($\gamma$, $e\pm$, h) (т.н. гамма-адронные семейства) в составе стволов ШАЛ, наиболее чувствительные к изменениям моделей. Кроме того, большинство $\gamma$-семейств порождено протонами, что уменьшает неопределенности, связанные с составом ПКИ. В целом, $\gamma$-h семейства могут быть использованы для настройки моделей при $\sqrt{s} \approx 1 - 20$ ТэВ ($E_0 \approx 10^{15} - 5\cdot10^{17}$ эВ).

Тенденция к выстроенности самых энергичных объектов в $\gamma$-*h* семействах при $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ также требует своего описания.

Наконец, в последнее время появились данные эксперимента LHCf на коллайдере LHC, которые также не описываются моделями, используемыми пакетом CORSIKA.

Таким образом, необходимо разработать модель, которая в состоянии описать все четыре группы независимых и взаимодополняющих друг друга экспериментальных данных.

Систематическое изучение космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ, $E > 10^{18}$ эВ) началось в конце пятидесятых годов прошлого столетия, после создания экспериментальных установи Volcano Ranch и установки по регистрации широких

атмосферных ливней в Московском государственном университете. Понимание проблемы происхождения частиц таких энергий остается всё ещё нерешённой проблемой астрофизики высоких энергий. В данной работе изучаются спектры протонов и ядер сверхвысоких энергий, распространяющихся в пространстве, заполненном фоновыми излучениями: реликтовыми фотонами $\gamma_{CMB}$ и внегалактическим фоновым излучением ВФИ (EBL), включающем ультрафиолетовое, оптическое и инфракрасное излучения. Взаимодействия с этими фоновыми излучениями оставляют след на энергетических спектрах частиц сверхвысоких энергий. По этим особенностям в спектрах можно судить о природе первичных частиц и их происхождении. Особое внимание было уделено тем особенностям в спектре, по которым можно судить, являются ли первичные частицы протонами или ядрами.

Возможными источниками космических лучей и нейтрино могут служить сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик, а также аннигиляция частиц темной материи в мелкомасштабных сгустках. Поэтому исследование различных аспектов физики черных дыр и сгустков темной материи представляет большой интерес для тематического направления «Физика космических лучей и нейтринной астрофизики».

Существуют мощные математические методы – методы тонких оболочек, с помощью которых можно исследовать глобальную пространственно-временную геометрию в различных задачах. С их помощью было выполнено детальное исследование глобальной геометрии пространства-времени с заряженной массивной оболочкой вокруг черных дыр в классическом (неквантовом) режиме. Это направление важно как для прояснения общих фундаментальных свойств теории гравитации, так и может оказаться полезным для проблемы рождения микроскопических черных дыр на ускорителях.

Исследование уравнения Дирака в гравитационном поле заряженной черной дыры Рейсснера-Нордстрема важно для прояснения высокоэнергетических эффектов на финальных стадиях испарения первичных черных дыр, когда могут генерироваться мощные всплески гамма-излучения. Впервые были найдены стационарные состояния электронов под горизонтом Коши - внутренним горизонтом черной дыры и показано, что в случае экстремальной черной дыры стационарное регулярное решение является физически самосогласованным.

Для процесса ускорения космических лучей в ядрах галактик большое значение имеет угловой момент центральной черной дыры. В рамках данного направления был разработан новый метод анализа квазипериодических неэкваториальных финитных орбит вблизи вращающейся черной дыры, что позволило найти угловой момент черной дыры в центре нашей Галактики. Квазипериодические осцилляции неэкваториальных орбит горячих сгустков плазмы (ярких пятен в аккреционном потоке) могут быть использованы для

измерения скоростей вращения черных дыр и в других галактиках.

Выяснение природы темной материи является одной из самых актуальных задач современной астрофизики и космологии. Помимо экспериментов по прямой регистрации частиц темной материи, которые пока не принесли однозначных результатов, перспективным направлением является поиск продуктов аннигиляции частиц темной материи. Аннигиляция суперсимметричных частиц темной материи в гало Галактики может быть значительно усилена в том случае, если темная часть темной материи собрана в плотные сгустки. В данном тематическом направлении были исследованы возможные свойства сгустков и рассчитан ожидаемый аннигиляционный сигнал.

Физика нейтрино играет уникальную роль в исследованиях свойств слабого взаимодействия. Но еще важнее то, что изучение свойств нейтрино является одним из направлений, которые могут привести к расширению Стандартной Модели. Особенно это стало очевидным благодаря результатам экспериментов с атмосферными, солнечными, реакторными и ускорительными нейтрино, где было установлено, что нейтрино осциллируют. Одно из простых объяснений этого явления – нейтрино, рожденное в определенным слабом состоянии, имеет массу и является суперпозицией собственных состояний. Эффекты осцилляций зависят от двух разностей квадратов масс нейтрино и трех углов смешивания. Значения этих параметров измерены в различных экспериментах, но данные все еще не полные. Уточнение значений параметров осцилляций позволит существенно сузить выбор моделей, претендующих на описание механизма генерации масс лептонов. Имеется еще ряд важных вопросов, а именно: а) нарушается ли, и как сильно CP-инвариантность в лептонном секторе и б) какова иерархия масс нейтринных состояний.

В настоящее время большинство экспериментов по изучению осцилляций нейтрино проводятся с ускорительными дальними нейтрино (long base-line neutrino experiments). Для уменьшения статистической ошибки (<3%) используются пучки нейтрино высокой интенсивности в области энергий 0.2-5 ГэВ. Для уменьшения систематических ошибок используют два детектора, один из которых находится на близком расстоянии от источника нейтрино, где эффекты осцилляций незначительны.

Важнейшие источники систематических неопределенностей – ошибки в потоках и спектрах нейтрино, а также в сечениях их взаимодействия с веществом. В указанной области энергий нейтринных пучков доминируют процессы квазиупругого рассеяния нейтрино на ядрах и процессы, связанные с рождением барионных резонансов. Их сечения измерены с точностью 20–30%. Даже в пределах таких больших ошибок некоторые результаты противоречат друг другу. Т.о., неопределенности в нейтринных сечениях являются одной из ключевых проблем для прецизионных измерений значений параметров нейтринных

осцилляций.

Для комплексного изучения Солнца важное значение имеет исследование динамической связи между топологией магнитного поля, гелиосферой и магнитосферой вращения Солнца.

В настоящее время заметно возросла активность зарубежных исследователей по созданию детекторов с низким порогом. В США наивысшим приоритетом обозначены работы по исследованию нейтрино на сильноточных пучках ускорителей, где генерируются интенсивные пучки нейтрино от распада остановившихся пи-мезонов и мюонов. Регистрировать нейтрино предлагается на специально разработанных детекторах с низким порогом, на которых ранее планировали поиск темной материи. Поскольку при малых энергия отдачи ядра нейтрино рассеивается когерентно, скорость счета получается значительной даже при сравнительно небольших массах детектора.

Это весьма привлекательно, но малая энергия отдачи ядра (менее 1 кэВ) делает эксперимент труднореализуемым. До сих пор этот процесс никем не наблюдался, и его открытие стало бы величайшим достижением современной физики. Когда методика детектирования когерентного рассеяния будет развита до такой степени, что позволит прецизионное измерение (с погрешностью 1-2%), она может быть использована для изучения тонких деталей этого процесса. Станет возможным измерить нейтронный форм-фактор различных ядер, более прецизионное измерение величины $\sin 2\theta_W$, которая входит в выражение слабого заряда ядра. Изучение когерентного рассеяния интересно также в плане новых открытий за пределами стандартной теории. Есть у этой темы и прикладной аспект. Использование детекторов когерентного рассеяние перспективно также в плане мониторинга атомных реакторов, есть предложение по созданию сети таких детекторов для регистрации нейтрино от Сверхновых. Спектр разрабатываемых детекторов довольно широк, здесь и криогенные и полупроводниковые и жидкостные одно- и двухфазные, а также газовые детекторы. Кооперация РЭД (Русский эмиссионный детектор) планирует создать двухфазный эмиссионный детектор с 100 кг ксенона для регистрации когерентного рассеяния антинейтрино от реактора. В планах этой кооперации также использование эмиссионного детектора для регистрации когерентного рассеяния нейтрино от распада остановившихся пи-мезонов и мюонов, генерированных на интенсивном пучке протонов сильноточного ускорителя лаборатории Оук Ридж в США. В физике существенным моментом является подтверждение полученного результата в независимом эксперименте, желательно проведенном с использованием отличной от первого методики и другим коллективом исследователей. Нами планируется создание газового детектора с низким порогом (< 1 кэВ) для регистрации антинейтрино от реактора.

Двойной Бета-Распад (ДБР) – особый вид бета-распада ядер, при котором ядро с зарядом Z испускает два электрона или позитрона, превращаясь в ядро-изобару с зарядом Z±2. В случае сохранения лептонного числа ДБР сопровождается испусканием двух электронных антинейтрино или нейтрино:

$$\left.\begin{array}{l} A\,(Z,\ N) \to A\,(Z+2,\ N-2) + 2e^- + 2\tilde{\nu}_e; \\ A\,(Z,\ N) \to A\,(Z-2,\ N+2) + 2e^+ + 2\nu. \end{array}\right\} \quad (1)$$

Если лептонное число не сохраняется, нейтрино может быть истинно нейтральной частицей, т. е. совпадать со своей античастицей. Такое нейтрино называют майорановским. В этом случае возможен БДБР:

$$\left.\begin{array}{l} A\,(Z,\ N) \to A\,(Z+2,\ N-2) + 2e^-; \\ A\,(Z,\ N) \to A\,(Z-2,\ N+2) + 2e^+. \end{array}\right\} \quad (2)$$

Процесс БДБР происходит с нарушением закона сохранения лептонного числа и возможен только при выполнении двух условий:

1) нейтрино является майорановской частицей;
2) масса нейтрино отлична от нуля.

В современной “классической” Стандартной модели частиц масса нейтрино равна нулю, и БДБР невозможен. Однако одним из великих физических открытий начала 21-го века является открытие эффекта осцилляции нейтрино. Существование этого эффекта однозначно свидетельствует о наличии массы нейтрино и необходимости расширения Стандартной модели; процесс БДБР становится возможным. Результаты экспериментов позволяют определить только разности квадратов масс различных типов нейтрино, но не позволяют определить их абсолютные значения.

В простейшем расширении Стандртной модели БДБР происходит в результате обмена легкими Майорановскими нейтрино или смесью правых токов в слабом взаимодействии. Этот процесс может быть также инициирован обменом суперсимметричных частиц и рассматривается в некоторых суперсимметричных моделях. Распад ($0\nu\beta\beta$) является очень чувствительным источником для определения эффективной массы майорановского нейтрино, которая определяется как

$$\langle m_{ee} \rangle = \left| \sum_i U_{ei}^2 m_i \right|,$$

где $U_{ei}$ – матрица смешивания, $m_i$ – соответствующие собственные значения масс. Период полураспада для безнейтринного двойного бета-распада обратно пропорционален квадрату массы майорановского нейтрино:

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} \, |M_{GT}^{0\nu}|^2 \left( \frac{\langle m_{ee} \rangle^2}{m_e^2} \right),$$

где $G^{0\nu}$ – фазовый объем, $M_{GT}^{0\nu}$ – матричный элемент перехода. Таким образом поиск БДБР позволяет в случае положительного результата подтвердить майорановскую природу нейтрино (как и предполагается в простейших моделях расширения Стандартной модели, так и получить оценку ее массы. Другим следствием наблюдения БДБР, возможно даже более важным как для физики частиц, так и для космологии, было бы открытие нарушение закона сохранения лептонного числа.

Одной из фундаментальных задач нейтринной физики низких энергий является регистрация и измерение спектра солнечных pp-нейтрино, $E_\nu < 0.42$ МэВ. Действующий в настоящее время эксперимент Borexino (300 тонн жидкого органического сцинтиллятора), а также находящиеся на стадиях создания и проектирования сцинтилляционные детекторы SNO+ (1000 тонн), LENA (30 кт) и БНО ИЯИ РАН (15 кт) планируют достичь чувствительности необходимой для регистрации низкоэнергетической части нейтринного спектра Солнца. В жидких органических сцинтилляторах возможность регистрации редких событий в области низких энергий ограничивается содержанием радиоактивного изотопа $^{14}C$ ($E_\beta = 156$ кэВ). Измеренная на установках Borexino и KamLAND концентрация радиоуглерода составила $(2\text{-}4)\cdot 10^{-18}$ г/г. Важным этапом в исследованиях нейтрино низких энергий явилось бы создание жидкого сцинтилляционного детектора с ультранизким содержанием радиоуглерода, $^{14}C/^{12}C < 10^{-20}$ г/г. Теоретические оценки, основанные на возрасте, глубине залегания нефтяных месторождений, а также учёте химического состава окружающих пород, дают величину $^{14}C/^{12}C \sim 10^{-21}$ г/г.

Исследования содержания $^{14}C$ в образцах сцинтиллятора, приготовленных из различных источников сырья (нефть, каменный уголь) и взятых из разных месторождений, имеют дополнительный важный геофизический аспект. Полученная информация может быть важным аргументом в выборе модели образования нефтеносных месторождений, базирующейся на биогенной или абиогенной гипотезе.

Работы, связанные с радиоуглеродом, нашли в настоящее время очень широкое применение. Каждые три года проводятся международные конференции по $^{14}C$, где помимо вопросов традиционной датировки, обсуждаются вопросы, связанные с использованием

радиоуглерода, в качестве трассёра, в многочисленных исследованиях, включающих гидрологию, океанологию, экологию, медицину и т.д.

Чувствительность, т.е. минимальная концентрация изотопа $^{14}C$, которая может быть измерена, определяется двумя факторами: массой анализируемого образца и уровнём фона системы регистрации. В случае снижения фона до уровня ~ mHz, для образца массой ~ 2 кг, предел составляет порядка $10^{-18}$ ($^{14}C/^{12}C$).

Одной из важнейших задач ядерной и термоядерной физики, геохронологии является разработка методов мониторинга нейтронного потока

Исследования, проводимые в рамках данной темы, относятся к области фундаментальных исследований, получившей название “космомикрофизика” (в англоязычной литературе – “Astroparticle Physics”). Данная область исследований охватывает поиск и всестороннее изучение фундаментальных физических явлений и закономерностей, реализующихся на микроскопических и космологических масштабах и в быстропротекающих астрофизических процессах. С экспериментальной точки зрения речь идет об одновременном изучении свойств элементарных частиц и астрофизических явлений в экспериментах, использующих потоки частиц природного происхождения (в том числе - потоки частиц космического излучения). Исследования в области космомикрофизики привели к необходимости создания больших комплексов экспериментальных установок, возможности которых позволяют решать широкий круг современных научных проблем. В БНО ИЯИ РАН имеется уникальный комплекс экспериментальных установок (Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, расположенная над ним ливневая установка “Андырчи” и комплексная ливневая установка “Ковер-2”), на которых в течение многих лет проводятся исследования в данной области фундаментальных исследований.

Для выполнения исследований по данной теме необходимо, в первую очередь, обеспечить режим непрерывного набора информации на комплексе установок, для чего необходимо постоянно поддерживать работоспособность установок и проводить их модернизацию.

В низкофоновых лабораториях Баксанской нейтринной обсерватории созданы уникальные условия для исследования редких процессов.

# 1 Нейтринная астрофизика

## 1.1 Генератор сильных взаимодействий адронов при энергиях $10^{11}$ – $10^{20}$ эВ

Продолжался анализ результатов высокогорных экспериментов с рентген-эмульсионными камерами (РЭК) и разработка программы FANSY 2.0 для моделирования сильных взаимодействий адронов при сверхвысоких энергиях [1,2,3,4,5]. На основе расчетов по семи моделям взаимодействий адронов сверхвысоких энергий впервые были рассмотрены корреляции поперечного импульса $p_t$ адрон-ядерных взаимодействий при энергии $E_0 = 10^{16}$ эВ со средним расстоянием частиц от центров гамма-семейств $\langle R \rangle$ (наиболее энергичных гамма-квантов, электронов и позитронов в стволах молодых ШАЛ, регистрируемых в высокогорных исследованиях космических лучей с помощью рентгеноэмульсионных камер – РЭК). Впервые рассматривались параметры, представляющие собой величины среднего поперечного импульса $\langle p_t \rangle$, рассчитанные в различных кинематических областях $x_{Lab}=p_z/p_{tot}$, а именно $x_{min} < x_{Lab} < x_{max}$. Рассчитывались $x_{Lab}$-независимые, а также взвешенные по $x_{Lab}$ и $x^2_{Lab}$ значения. Была найдена кинематическая область $x_{Lab}$, в которой имеет место линейная корреляция используемых параметров с размерами семейств. Показано, что такие модели, входящие в пакет CORSIKA, как QGSJET II и SYBILL 2.1, не могут объяснить экспериментальные результаты [1,2].

Совместное рассмотрение результатов по гамма-адронным семействам, полученных с помощью РЭК при энергиях $E_0 < 10^{15}$ эВ и $E_0 > 10^{16}$ эВ в стратосферных и высокогорных исследованиях космических лучей с помощью РЭК, ещё раз показало важнейшую роль характеристик фрагментационной области в h-A взаимодействиях и позволило сформулировать параметры модели в широком диапазоне энергий [3,4,5]. Продолжается разработка программы FANSY 2.0 для компьютерного моделирования методом Монте-Карло сильных взаимодействий адронов в широком диапазоне энергий ($10^{11}$ – $10^{20}$ эВ) с протонами и ядрами, с учётом генерации чармированных частиц, описывающей как компланарную генерацию наиболее энергичных вторичных частиц при энергиях взаимодействий выше ~$10^{16}$ эВ с большими поперечными импульсами в плоскости компланарности, так и результаты LHCf.

Продолжалось сотрудничество с ФИАН в создании высокогорного комплекса по многокомпонентному изучению широких атмосферных ливней «Памир-XXI» [6] в рамках Международного научно-исследовательского центра «Памир-Чакалтая».

Проведена разборка/сборка двухуровневой РЭК, предназначенной для изучения генерации чармированных частиц в фрагментационной области взаимодействующих адронов космических лучей [7] в рамках участия в работе экспедиции на Памире.

## 1.2 Космические лучи сверхвысоких энергий

Распространяясь в поле реликтовых фотонов, протоны сверхвысоких энергий испытывают два основных взаимодействия: фотопионное рождение $p + \gamma_{CMB} \rightarrow N + \pi$ и рождение электро-позитронных пар $p + \gamma_{CMB} \rightarrow p + e^{+} + e^{-}$, которые изменяют их спектр, оставляя на нем характерный след. В результате фоторождения пионов в спектре КЛ образуется ГЗК при энергии $E \approx 5 \cdot 10^{19}$ эВ. Последняя реакция дает дип в спектре протонов . Форма дипа зависит не только от реакции взаимодействия, но и от модельных особенностей, таких как космологическая эволюция источников, моды распространения (диффузия или прямолинейное распространение), от расстояния между источниками и т.д. Несмотря на то, что дип является относительно слабой особенностью, он ясно виден в экспериментальных данных четырех экспериментов (Якутск, AGASA, HiRes и Telescope Array). В экспериментах HiRes и TA также зарегистрировано ГЗК обрезание.

При сравнении теоретических спектров с экспериментальными спектрами видно прекрасное согласие, достигаемое за счет только двух свободных параметров K и $\gamma_g$ для большого числа бинов. Это означает, что электрон-позитронный дип действительно наблюдается экспериментально. Присутствие дипа и ГЗК обрезания в спектре КЛСВЭ является свидетельством их протонного состава. Кроме того, данные HiRes и TA по химсоставу указывают также на протонный состав КЛСВЭ.

Были выполнены расчеты спектров КЛСВЭ для различных теоретических моделей происхождения и проведено сравнение с данными РАО.( данные совместимы с электрон-позитроннымдипом, но, как показывают наши детальные расчеты, ГЗК-обрезание нельзя согласовать с данными РАО: укручение спектра РАО происходит при заметно меньшей энергии (~ 30 ЕэВ вместо 50 ЕэВ) и форма обрезания, наблюдаемого в РАО, не совпадает с вычисляемой для ГЗК-обрезания. Экспериментальные данные, полученные РАО, говорят о протонном составе при энергии 1–4 ЕэВ, который становится тяжелее с ростом энергии и достигает железа при энергии $E \approx 35$ ЕэВ. Следовательно, ключевой проблемой физики космических лучей сверхвысоких энергий является химический состав.

Результат РАО требует изучения распространения ядер сверхвысоких энергий через поле реликтовых фотонов (CMB) и внегалактические фоновые излучения ВФИ (EBL). В работах [9,10] нами были разработаны аналитические методы для вычисления распространения ядер сверхвысоких энергий через поля излучения. Распространяясь в таких полях, ядра испытывают фоторасщепление (без изменения лоренц-фактора) и уменьшают свой лоренц-фактор, т.е. теряют кинетическую энергию в процессе образования электрон-позитронных пар. В этих работах вычисляются эволюционные траектории во времени, текущем назад, т.е. изучаются изменения массового числа A и лоренц фактора Γ с ростом

красного смещения z. Развиты три метода вычисления энергетических спектров: (1) метод траекторий A(z) и Γ(z); (2) метод решения кинетических уравнений, в комбинации с вычислениями траекторий A(z) и Γ(z); и (3) метод сцепленных кинетических уравнений. Эти три метода по-видимому исчерпывают аналитические методы вычислений. В наиболее прямолинейном методе вычислений используются только траекторные вычисления, которые связывают наблюдаемый поток (плотность частиц) со скоростью генерации первичных (ускоряемых) ядер $A_0$ в источнике. Во втором методе пространственная плотность частиц (первичных и вторичных ядер) вычисляется путем решения кинетических уравнений, и траекторные вычисления используются только для нахождения скорости генерации первичных ядер в источнике. Третий метод решения сцепленных кинетических уравнений состоит в последовательном решении кинетических уравнений сначала для первичных ядер $A_0$, затем для ядер $A_{0-1}$, где функция генерации ядер дается скоростью фоторасщепления ядер $A_0$ и т.д. Важным элементом вычислений является метод использования лоренц-фактора вместо энергии, т.к. лоренц-фактор сохраняется при фоторасщеплении. В практических вычислениях в основном использовался метод сцепленных уравнений, который позволил нам вычислить потоки первичных и вторичных ядер в задачах с однородным распределением источников. Полученные результаты хорошо согласуются с расчетами по методу Монте-Карло.

Было показано, что данные РАО по спектрам и анизотропии, а также дисперсия, исключают анкл как особенность спектра, где происходит переход от галактических к внегалактическим КЛ. Анкл в данной работе объясняется как часть электрон-позитронного дипа, автоматически получаемого в рамках взаимодействия протонов с реликтовым излучением. Переход от галактическим к внегалактическим космическим лучам происходит при более низкой энергии $E \approx 0.1$ ЕэВ

## 1.3 Тёмная материя и тёмная энергия в астрофизике космических лучей

Исследованы различные аспекты внутренней структуры черных дыр. Выполнено подробное исследование глобальной геометрии пространства-времени с заряженной массивной оболочкой в классическом (неквантовом) режиме [11]. Это исследование в будущем послужит основой для вычислений квантовых эффектов. Детально рассмотрены возможные типы геометрий пространства-времени, содержащие заряженные оболочки двух типов: оболочка служит единственным источником электрического заряда и массы с плоским пространством-временем Минковского внутри оболочки и с метрикой Рейсснера-Нордстрема снаружи; "нейтрализующая" оболочка с зарядом, противоположным заряду метрики Рейсснера-Нордстрема внутри, а снаружи реализуется метрика черной дыры

Шварцшильда. Исследована стабильность горизонта Коши в черных дырах [12]. Исследована аккреция тёмной энергии на чёрные дыры [13,14]. Для темной энергии применялся ряд полевых моделей, а также модель идеальной жидкости с различными уравнениями состояния. Анализ был выполнен как в приближении пробной жидкости, так и с учётом обратной реакции аккреции на метрику черных дыр (шварцшильдовских и заряженных).

Исследованы стационарные решения уравнения Дирака в метрике заряженной черной дыры – как снаружи черной дыры, так и под ее горизонтом событий [15]. Полученные решения описывают стационарные состояния массивных частиц-фермионов. Показано, что существует только одно стационарное регулярное состояние вне горизонта событий черной дыры Рейснера-Нордстрема и только одно стационарное регулярное состояние под горизонтом Коши. Решение является самосогласованным в случае экстремальной черной дыры. Оказалось, что нормировочный интеграл волновых функций расходится на обоих горизонтах, если черная дыра не экстремальная (ее масса не равна заряду в соответствующих единицах). Это может означать, что найденное решение может быть лишь асимптотическим пределом нестационарного решения. Данные результаты могут найти приложение к исследованию эффекта квантового испарения заряженных черных дыр.

Рассмотрены характерные примеры квазипериодических неэкваториальных финитных орбит вблизи вращающейся черной дыры. Естественные квазипериодические осцилляции неэкваториальных орбит горячих сгустков плазмы (ярких пятен в аккреционном потоке) могут быть использованы для измерения скоростей вращения черных дыр. Показано, что наиболее перспективными характеристиками для измерения параметра вращения в метрике Керра являются две частоты осцилляций. Это частота вращения падающего внутрь черной дыры горячего сгустка плазмы в непосредственной близости от горизонта событий и частота широтной осцилляции орбиты горячего сгустка вблизи минимального радиуса устойчивого кругового движения. С использованием этих частот из известных данных наблюдений квазипериодических осцилляций излучения черной дыры в центре Галактики Sgr A* (в ближнем ИК диапазоне на VLT и в рентгене телескопами XMM-Newton и Chandra) определена величина параметра вращения сверхмассивной черной дыры в центре Галактики $a=0.64\pm0.01$ [16].

Показано, что аннигиляция суперсимметричных частиц темной материи в гало Галактики может быть усилена за счет кластеризации частиц темной материи в самогравитирующие мелкомасштабные сгустки с большой плотностью [17,18,19]. Исследовано влияние несферичности начальных возмущений плотности на эволюцию сгустков темной материи в модели их образования на стадии радиационного доминирования из адиабатических

возмущений большой амплитуды. Ранее образование таких сгустков исследовалось лишь в приближении сферически-симметричного коллапса. Для исследования несферичности использована модель однородного эллипсоида, обобщенная на случай его сжатия на стадии радиационного доминирования с учетом начальных пекулярных скоростей по трем осям. Найдены ограничения на возможные начальные условия, при которых итоговая несферичность не препятствует вириализации сгустка. С помощью теории гауссовых случайный полей это ограничение позволяет рассчитать массовую долю образовавшихся сгустков в составе темной материи.

## 1.4 Нейтринные эксперименты ИЯИ РАН во ФНАЛ: эксперименты E938 (MINERvA) и E929 (NOvA)

### 1.4.1 Сечения квазиупругого рассеяния нейтрино на ядрах: эксперимент МИНЕРВА

Целью эксперимента МИНЕРВА является изучение сечений рассеяния нейтрино на ядрах. Программа эксперимента включает измерение сечений взаимодействия нейтрино с различными ядерными мишенями в области энергий 1–20 ГэВ. Эксперимент находится в стадии набора данных и их анализа. Наибольший интерес представляют ядра углерода (пластик) и кислорода (вода), которые являются основной компонентой вещества из которых состоят полностью активные нейтринные детекторы (эти материалы являются и мишенью, и регистрирующей средой). Весьма перспективными представляются и детекторы с жидким аргоном. Они имеют низкие энергетические пороги регистрации частиц и позволяют с хорошей точностью идентифицировать типы рожденных частиц. Как уже отмечалось, сечения квазиупругого рассеяния (анти) нейтрино на этих ядрах измерены с большими неопределенностями, т.е. аксиальный форм-фактор нуклона, который необходимо знать при вычислениях этих сечений, также определен с большими погрешностями. В частности, значение аксиальной массы нуклона находится в пределах 1 – 1.4 ГэВ.

Процессы квазиупругого рассеяния лептонов на свободных нуклонах в настоящее время хорошо изучены. Описание процесса взаимодействия нейтрино с ядрами значительно усложняется. Необходимо учитывать различные ядерные эффекты, которые изменяют форму дифференциальных сечений и уменьшают полные сечения на нуклон. Для описания этих эффектов нами используется релятивистская модель искаженных волн в импульсном приближении, которая хорошо описывает данные о квазиупругом рассеянии электронов на ядрах.

В рамках этой модели были вычислены сечения рассеяния нейтрино заряженным током на ядрах хлора, аргона и кальция. Определена зависимость полных сечений (на нуклон) этого процесса от массы ядра [20]. В рамках коллаборации МИНЕРВА

продолжается анализ данных об эксклюзивном процессе квазиупругого рассеяния нейтрино на ядрах углерода с рождением мюона и протона в конечном состоянии. Определена система критериев, их эффективность и мощность, позволяющая отбирать квазиупругие события, которые являются хорошей сигнатурой квазиупругого рассеяния нейтрино заряженным током.

### 1.4.2 Измерение параметров нейтринных осцилляций: эксперимент E929 (HOBA)

Целью эксперимента HOBA является изучение осцилляций мюонных нейтрино в электронные. Программа эксперимента включает измерение числа событий, обусловленных взаимодействием электронных (анти)нейтрино, которые появляются в пучках мюонных (анти)нейтрино в результате осцилляций. Это дает возможность измерить угол смешивания $\theta_{13}$ и фазу нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе, а также определить иерархию масс нейтринных состояний. Эксперимент находится в процессе подготовки. Набор данных начался в конце 2013 года.

Сотрудниками ИЯИ РАН проделана большая работа по монтажу, настройке и установке блоков электроники, включающих в себя лавинные фотодиоды, на прототипе ближнего детектора, который войдет в состав ближнего детектора. Оценена геометрическая точность установки регистрирующих модулей этого детектора и ее влияние на точность восстановления траекторий частиц.

## 1.5 Топология магнитного поля, динамика Солнца и потоки нейтрино

При изучении связи между топологией магнитного поля, гелиосферой и магнитосферой и сопоставлении скорости дифференциального вращения Солнца и скорость вращения солнечной короны и их динамику во времени, удалось установить, что корона вращается со скоростью, соответствующей вращению фотосферы на широтах 55–60 градусов, что совпадает со скорость вращения на дне конвективной оболочки, где генерируется долготная структура.

Выявлено четко выраженное присутствие долготной структуры структуры фотосферного магнитного поля в период аномально низкой солнечной активности последних лет, не закамуфлированной спорадическими возмущениями, связанными с солнечной активностью.

Исследована скорость дифференциального вращения магнитного поля Солнца в годы нарастающей солнечной активности 2011–2012. Выявлена закономерность, что вращение тем быстрее, где и когда меньше магнитное поле.

Продолжено сопоставление результатов изучения топологии магнитного поля с геофизическими явлениями: геомагнитными индексами, землетрясениями, цунами, и т.д. Обнаруживается их корреляция, но уровень достоверности в силу неоднородности экспериментальных геофизических данных не высок.

Продолжалось феноменологическое моделированию топологии и динамики магнитного поля Солнца на протяжении 21, 22 и 23 циклов.

## 1.6 Разработка методики регистрации нейтрино промежуточных энергий

В качестве источника (анти)нейтрино обсуждаются атомные реакторы, ускорители и даже взрывы Сверхновых. Для реакторов характерны высокие потоки антинейтрино (порядка $10^{13}$ см$^{-2}$сек$^{-1}$), но относительно невысокие энергии (1 – 3 МэВ). На ускорителях нейтрино генерируются в распадах $\pi$+ мезонов и мюонов с энергиями до 50 МэВ, но получить можно только сравнительно невысокие потоки нейтрино (порядка $10^{13}$ см$^{-2}$сек$^{-1}$). Максимальная кинетическая энергия отдачи ядра составляет $2k^2/M$ (k – энергия нейтрино, M – масса ядра). Для реакторных антинейтрино с энергией 3 МэВ и аргона в качестве мишени получаем примерно 450 эВ. Для нейтрино от ускорителя энергия отдачи будет на порядок больше. Однако только малая ее доля, примерно 15%, перейдет в энергию ионизирующих частиц.

Для экспериментов на реакторе детектор может быть мал, с массой порядка 1 кг, но с порогом регистрации несколько эВ. Для ускорительного эксперимента потребуется уже многотонный детектор с порогом регистрации примерно 100 – 300 эВ. Ожидаемый темп счета событий от когерентного рассеяния – на уровне нескольких событий в сутки для реакторного эксперимента (для ускорительного – и того меньше, в зависимости от массы мишени). Нужны длительные (порядка года) измерения с включенным и выключенным источником нейтрино и при этом низкофоновые условия, чтобы выделить эффект из фона. В этом – специфика предлагаемого эксперимента. Нужно показать, что спектр, полученный при включенном источнике содержит, по сравнению со спектром для выключенного источника, избыток событий, не связанный с сопровождающим гамма- или нейтронным фоном и который, по его энергетическому спектру, соответствует когерентному рассеянию нейтрино. Последнее облегчает задачу, т.к. эффект от когерентного рассеяния должен иметь обрезание при энергии произведенной в газе ионизации примерно 100 эВ, а фон от гамма-излучения и нейтронов простирается в область более высоких энергий. По этому параметру можно отделить вклад от когерентного рассеяния от фона при условии, конечно, что эффект не слишком мал по сравнению с фоном. Используя разные мишени (например, аргон,

ксенон) можно провести сравнительный эксперимент. Это может дать дополнительную информацию, полезную для интерпретации экспериментальных данных.

Нами рассматривались вопросы использования газового детектора для решения этой задачи [21]. Этот метод регистрации ионизирующего излучения широко использовался еще ~70-х лет назад. Б.М.Понтекорво и др. в 1949 г. получили спектр от L-пика $^{37}$Ar в смеси аргон-метан. Энергия в максимуме пика составляет 246 эВ. Для полупроводниковых детекторов это примерно соответствует минимально регистрируемой энергии, в то время как с помощью пропорциональных счетчиков уверенно регистрируются даже одноэлектронные события, которым в аргоне соответствует средняя энергия на образование пары электрон-ион 26 эВ. Это достигается за счет высокого коэффициента газового усиления в пропорциональных счетчиках. Вопросы статистики развития электронной лавины в газе, вариации коэффициента газового усиления и формы спектра одноэлектронных импульсов освещались во многих работах. Был исследован отклик пропорционального счетчика со смесью аргон-метан на монохроматическое рентгеновское излучение в диапазоне 99 – 277 эВ. Это довольно близко к диапазону регистрации когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на ядрах атомов аргона. Однако, только небольшая доля (~15%) кинетической энергии ядра отдачи преобразуется в энергию ионизирующего излучения.

При выборе газового пропорционального счетчика в качестве детектора когерентного рассеяния делается ставка на следующие преимущества использования этого метода:

1. Высокий коэффициент газового усиления ($>10^4$).
2. Возможность работать с высоким давлением газа (≈10 бар), чтобы набрать необходимую массу.
3. Хорошая сигнатура события по форме импульса при высоком давлении (характерный фронт и спад импульса).
4. Возможность дискриминации шумов и микрофонного эффекта по форме импульса,
5. Наличие эффективных методов высокой очистки газа.
6. Детектор может быть изготовлен только из сверхчистых материалов, без ФЭУ, как источника радиации, и прочее.
7. Возможность менять рабочее вещество (газ) в детекторе, не меняя конфигурации, что важно для проведения сравнительных измерений в одних и тех же условиях.

На стендовой установке были измерены спектры импульсов от источника рентгеновского излучения $^{55}$Fe. Счетчик имел диаметр катода 37 мм, диаметр нити 20 мкм, заполнялся аргон-метановой смесью при давлениях 1 и 4 бар. Импульсы с выхода

зарядочувствительного предусилителя с чувствительностью примерно 0.5 В/пКл подавались на плату оцифровки 8 бит. Целью измерений было посмотреть, насколько эффективно можно дискриминировать шумы и электронику в области ниже 100 эВ, т.е. там, где ожидается эффект от когерентного рассеяния. На рис.1 показаны кадры длительностью 400 мкс, на одном из которых хорошо виден импульс с сигнатурой, характерной для точечной ионизации, а на другом - импульс от электромагнитных помех.

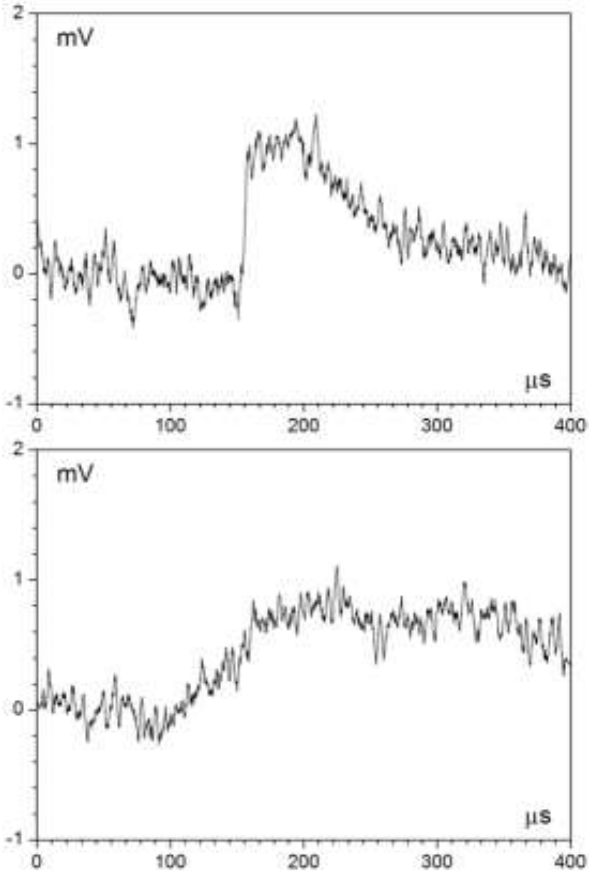



Рисунок 1. Импульсы с выхода предусилителя: от точечной ионизации (вверху) и от электромагнитной наводки (внизу), чувствительность тракта 100 мкВ/эВ

Электромагнитные наводки имеют, как правило, нерегулярную форму, импульсы от микрофонного эффекта отличаются характерной «звуковой» частотой колебаний с синусоидальной (или близкой к синусоидальной) формой. Для полезных импульсов, вызванных ионизацией в газе, характерны короткий (микросекунды) фронт, соответствующий времени дрейфа ионов к катоду и длинный (сотни микросекунд) спад, определяемый временем восстановления нулевого уровня в зарядочувствительном предусилителе. Амплитуды пиков 5.9 кэВ и 2.85 кэВ позволили установить близкую к линейной шкалу преобразования энергия-амплитуда и определить коэффициент газового усиления $4 \cdot 10^4$. Хорошо просматривалась область энергий от 20 эВ и выше. В области ниже 100 эВ дискриминация по форме импульса подавляла фон от электромагнитных наводок и

микрофонного эффекта примерно с фактором $10^3$. Таким образом, видно, что область энергий от 20 эВ до 100 эВ, где ожидаются события от когерентного рассеяния, может быть вполне использована для счета единичных событий.

Аналогичная задача решается с помощью криогенных детекторов. Так, еще в 1997 году нами совместно с лабораторией проф. С. Витале из Генуи (Италия) были впервые в мире зарегистрированы пики 57 эВ и 112 эВ от распада изотопа $^7$Be для порога регистрации примерно 40 эВ. Этого удалось достичь именно благодаря эффективной дискриминации по форме импульса электромагнитных помех и микрофонного эффекта.

Скорость счета от когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на аргоне составляет несколько событий в сутки на кг аргона в диапазоне от 20 до 100 эВ. Для того, чтобы набрать массу аргона порядка 1 кг, детектор должен обладать значительным объемом даже при давлении газа 10 бар. В то же время, чтобы получить коэффициент газового усиления $10^4$ и выше при высоком напряжении порядка 3 кВ диаметр катода должен быть примерно 40 мм. Поэтому для увеличения объема счетчика нами выбрана конструкция с наружным, дрейфовым объемом диаметром 140 мм. Помимо этого, снаружи этот объем окружен слоем кольцевого счетчика в качестве антисовпадения по корпускулярному и рентгеновскому излучению и одновременно играющим роль пассивной защиты от флуоресценции из стенки. Вся сборка помещена в цилиндрический корпус из титана в качестве относительно чистого по радиоактивным примесям материала. На рисунке 2 приведена фотография с общим видом этого счетчика.

Рисунок 2. Детектор перед сборкой.

Планируется использовать сборку из 16 таких счетчиков, работающих каждый на свой предусилитель и плату оцифровки. Счетчики будут уложены слоями в 4 ряда по 4 счетчика в каждом ряду. Ориентировочный размер сборки 1000x1000x1000 мм$^3$. Для защиты от фона, генерированного мюонами космических лучей, нейтронами и гамма излучения,

сопровождаемого работой реактора, а также от внутренней радиоактивности планируется разместить эту сборку в низкофоновом боксе. Он будет сложен из железных блоков, толщина стенки – 300 мм, внутренняя поверхность будет облицована слоем борированного полиэтилена толщиной 200 мм, снаружи планируется водяная защита от нейтронов из реактора толщиной 50 см и далее все это будет облицовано пластическим сцинтиллятором в качестве устройства антисовпадений для защиты от проникающих на глубину размещения установки (≈ 16 гг/см$^2$) ионизирующих частиц. Водяная защита снижает поток быстрых нейтронов примерно на порядок и позволяет определить путем прямого измерения с водой и без воды, насколько велик фон от нейтронов во время работы реактора. Внутренний объем камеры герметичен и заполняется азотом, очищенным от радона. Такая геометрия защиты была выбрана с целью получения максимального подавления потока γ-квантов от окружающей радиоактивности и нейтронов, генерированных космическими лучами в железе. Борированный полиэтилен такой толщины поглощает примерно 90% нейтронов из железа. Само железо эффективно подавляет окружающее гамма-излучение. На рисунке 3 приведены расчетные величины ожидаемого эффекта от когерентного рассеяния реакторных антинейтрино и величины фона от нейтронов на глубине 16 гг/см$^2$ для аргона и ксенона в качестве рабочего вещества детектора.

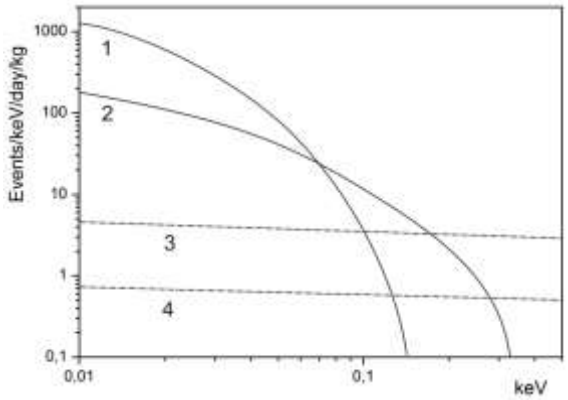



Рисунок 3. Спектр ионизации от ядра отдачи при когерентном рассеянии реакторных антинейтрино (1 – ксенон, 2 – аргон) и от рассеяния нейтронов, генерированных мюонами (3 – ксенон, 4 – аргон).

Энергетический спектр ядер отдачи, приведенный на рисунке 3, взят нами из ранее проведенных работ [22–26]. При расчете фона мы использовали данные о спектре быстрых нейтронов, генерированных мюонами космических лучей. Для количественной интерпретации обнаруженного эффекта необходимо прецизионное (с точностью в несколько процентов) измерение quenching factor в газообразном аргоне и ксеноне, который при энергии отдачи ядра ниже 500 эВ ожидается на уровне 10-15% по результатам проведенных

измерений в других веществах. Дальнейшее развитие описанной здесь методики представляется перспективным в плане получения значимого физического результата за сравнительно короткое время примерно 5 лет. Конечно, при условии, что эта работа получит хотя бы минимально необходимое финансирование, на уровне 500 000 рублей в год на материалы и оборудование. В истекшем году нами было получено 8 000 рублей!

## 1.8 Эксперимент GERDA по поиску двойного безнейтринного ß-распада 76Ge

Эксперимент GERDA (Germanium Detector Array) предполагает создание детектора нового поколения с ультранизким фоном для поиска безнейтринного двойного бета-распада $^{76}$Ge. Сотрудничество GERDA состоит из 13 институтов из 5 стран. Принципиальная схема эксперимента GERDA основана на более раннем предложении расположить открытые Ge детекторы внутри жидкого газа большого объема. Эта идея основана на выводе из результатов предшествующих экспериментов с германиевыми детекторами, что фоновые сигналы в значительной мере определяются внешним излучением Для достижения низкого уровня фона используется комбинированная защита: в большой водяной бак со сверхчистой водой установлен цилиндрический криогенный сосуд диаметром 4 м и длиной 6 м из нержавеющей стали, содержащий жидкий аргон высокой чистоты. Для снижения фона от материала криостата на его внутренней поверхности установлена дополнительная защита из меди высокой чистоты.

В центре криостата установлены безоболочечные германиевые детекторы, обогащенные по изотопу $^{76}$Ge (86%) с общей массой 20 кг на первой стадии эксперимента. Для контроля фона установлено также 2 кристалла из германия натурального состава. Эскиз принципиальной схемы GERDA изображен на рис. 4.

Жидкий инертный газ, используемый в качестве пассивной защиты, может быть очищен до высокой степени чистоты по радиоактивным примесям, недоступной для твердотельной защиты, используемой в предыдущих экспериментах.

Рисунок 4. Схема установки GERDA

Помимо этого на последующем этапе эксперимента проект включает три последовательные фазы. Целью проекта является достижение индекса фона на уровне $10^{-3}$ /кэВ·кг·год к концу второй фазы эксперимента и на основании полученных результатов разработку крупномасштабного проекта с массой ~ 1 тонны $^{76}$Ge. В первой фазе эксперимента использовались обновленные детекторы $^{76}$Ge, которые применялись в предыдущих экспериментах HdM и IGEX (в общей сложности около 18 кг).

В процессе анализа экспериментальных данных построена модель фоновых процессов и идентифицированы основные источники фона. Разработана система дискриминации импульсов по форме, позволившая снизить фон в несколько раз.

В течение 2013 г. закончена первая фаза эксперимента. Используемые в анализе данные были получены в период ноябрь 2011 – май 2013 с полной экспозицией 21,6 кг·год. Достигнутый индекс фона составляет $10^{-2}$ /кэВ.кг.год при использовании дискриминации по форме импульса. Полученный результат представлен на рис. 5.

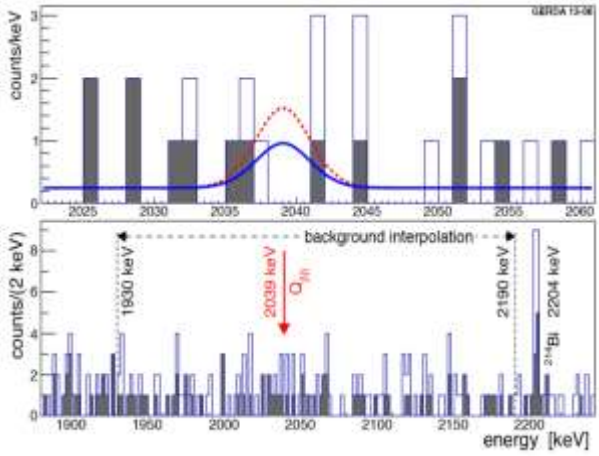



Рисунок 5. Спектр зарегистрированных событий при экспозицией 21,6 кг·год

В области БДБР зарегистрировано 3 события при ожидаемых 2,5 событиях от фона. Из отсутствия сигнала получен верхний предел для периода полураспада $^{76}Ge$ – $2{,}1\cdot10^{25}$ лет (90%).

Результат является наилучшим по сравнению с другими современными экспериментами по поиску двойного безнейтринного бета распада. Результат внес окончательную ясность в 10-летнюю проблему положительного результата в эксперименте Клапдора на основании данных эксперимента Гайдельберг-Москва.

Одновременно продолжалась работа по подготовке второй фазы эксперимента. Из обогащенного Ge (по изотопу $^{76}Ge$), наработанного и очищенного в России изготовлены первые образца германиевых кристаллов нового типа с точечным анодом. Детекторы на основе таких кристаллов позволяют с высокой эффективностью (~80%) дискриминировать протяженные события (фон от взаимодействия гамма квантов)и события, происходящие на поверхности детекторов, от точечных событий (события от искомого $0\nu2\beta$ распада). Помимо этого кристаллы имеют лучшее энергетическое разрешение. Собран первый стринг из пяти детекторов (с общей массой 3,5 кг) и опущен в жидкий азот. К настоящему моменту получена экспозиция 2,4 кг·год и подтверждена возможность использования новых кристаллов в долговременных экспериментах..

Отдельной задачей для группы ИЯИ является разработка и создание установки для возврата в процесс производства кристаллов отходов обогащенного германия, возникающих при их создании из исходного сырья.

В 2013 г разработаны техническое задание и проект установки по глубокой очистке отходов германия до уровня з исходного 6N химической чистоты. Установка будет выполнена по ректификационной схеме «газ-жидкость». Рабочее вещество – тетрахлорид германия. Установка включает в себя три блока: блок сушки сырья и синтеза тетрахлорида германия, ректификационный блок с раздельными колоннами для отгонки тяжёлых и лёгких примесных фракций и блок преобразования очищенного тетерахлорида германия в его двуокись. Для обеспечения минимальных технологических потерь установка будет выполнена с объемом загружаемого рабочего вещества 1 литр. Проектные безвозвратные потери германия в процессе очистки не превысят 10%. Разработан план создания и тестирования лабораторного прототипа установки. Проведены оценки стоимости работ по созданию установки включая работы с прототипом. Детально проект представлен на сайте эксперимента GERDA.

Основные полученные результаты опубликованы в работах [27–35].

## 1.8 Разработка сцинтиллятора с низким содержанием изотопа 14С для регистрации нейтрино низких энергий

Чтобы иметь возможность проводить измерения ультранизких концентраций изотопа $^{14}C$ на уровне ~$10^{-18}$ в образцах жидкого органического сцинтиллятора, в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900 м.в.э. (3700 м от входа в туннель) установлен жидкий сцинтилляционный детектор. На этой глубине поток мюонов составляет ~0.1м$^{-2}$час$^{-1}$, что позволяет практически полностью подавить этот источник фона. Сцинтилляционный детектор размещён в специальной низкофоновой камере, стены которой выложены последовательно из слоёв полиэтилена (25 см), кадмия (1 мм) и свинца (15 см). В конце года завершён монтаж непосредственно внутренней защиты, выложенной из брусков особо чистой меди, толщина стенок которой составляет 15 см и которая служит для более полного подавления фона от гамма квантов окружающей среды. Внутри медной защиты помещён сцинтилляционный модуль, представляющий собой сборку из кварцевой ячейки (Ф100х200 мм$^2$), заполненной жидким органическим сцинтиллятором ЛАБ (ВРО-2 г/л), двух световодов (100х100х300 мм$^3$) из акрила и двух 3"-ФЭУ-110. Вся сборка находится в коробе из орг. стекла. Для лучшего светосбора ячейка и световоды обёрнуты зеркальной отражающей плёнкой VM2000. На рис. 8.3 изображена принципиальная конструкция; на рис. 8.4 показан открытый сцинтилляционный модуль в защите.

Использованный для приготовления сцинтиллятора ЛАБ (линейный алкил бензол) – органический растворитель отечественного производства (г. Кириши, Ленинградская обл.), который выпускается в больших количествах (~50 кт/год) и в настоящее время рассматривается наиболее перспективным для применения в крупномасштабных сцинтилляционных нейтринных детекторах SNO+, LENA и др. Измеренная прозрачность промышленного ЛАБа составила ~ 15 м (430 нм). После заполнения ячейки сцинтиллятором, для удаления растворённого в жидкости кислорода воздуха, была осуществлена продувка газообразным азотом.

Для регистраций сцинтилляционных вспышек сигналы с двух ФЭУ, после ЗЧПУ, подаются на два входа цифрового осциллографа. Проводится програмный отбор событий на совpадение в интервале 80 нс. Для энергетической калибровки шкалы использовались радиоактивные гамма- источники. Пример спектра, полученный от $^{137}Cs$ суммированием сигналов с двух каналов осциллографа, приведён на рис. 8.

Рисунок 6. Принципиальная конструкция модуля

Рисунок 7. Сцинтилляционный модуль внутри медной защиты.

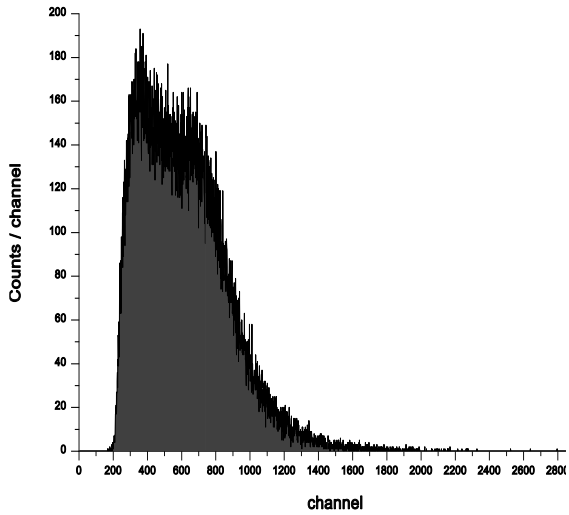



Рисунок 8. Спектр от источника Cs-137.

После калибровки система оставлена на набор фоновых событий в интервале до 4.0 МэВ. С течением времени, относительно начала набора статистики, наблюдалось падение суммарной скорости счёта, связанное с распадом оставшегося внутри защиты газообразного $^{222}$Rn. Так скорость счёта упала с величины 0.056 соб/сек (первые 24 часа регистрации) до 0.038 соб./сек (временной интервал 94-108 часов наблюдения). Спектр фона изображён на рис. 9. В настоящее время проводятся более детальные измерения фона с целью последующего его анализа.

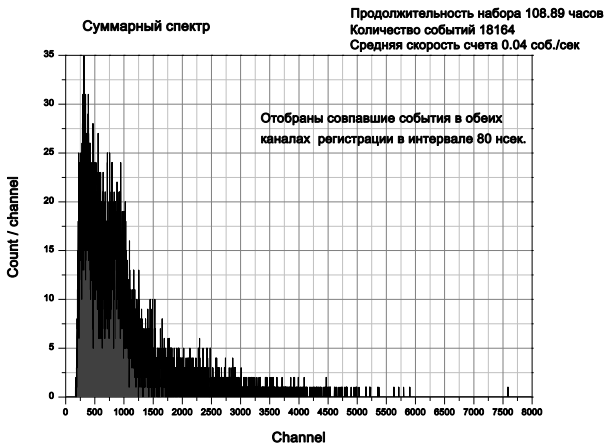



Рисунок 9. Суммарный спектр фона.

## 1.9. Разработка методов мониторинга нейтронного потока

Продолжалась разработка методов мониторинга нейтронного потока для решения задач ядерной и термоядерной физики, геохронологии.

Основные полученные результаты опубликованы в работах [36–43].

## 2 Исследование анизотропии и вариаций космических лучей $10^{11}$ – $10^{20}$ эВ

### 2.1 Исследований вариаций космических лучей во время гроз

В 2013 году велась работа по созданию и организации регулярного функционирования внешних удалённых наблюдательных пунктов. Пункты предназначены для удалённого исследования физических процессов происходящих в районе БНО. Было организовано два пункта. 1-ый (удаление 75 км) в с. Хасанья (окраина Нальчика), 2-ой (удаление 1 км от установки «Ковёр»), в п. Нейтрино. На первом этапе предполагалось размещение видеосистем (цифровой камеры и компьютера подключенного к Интернету) и организация непрерывного видео наблюдения за областью атмосферы над БНО. Отработан метод эксплуатации. Вся записанная на жёсткий диск видеоинформация с камеры хранится в течении 10 дней, затем стирается. За это время, она просматривается через интернет в режиме удалённого доступа. Наиболее интересные, срочные моменты скачиваются непосредственно. Основная масса видеоматериала, представляющая интерес, временно размещается в выделенной папке. Эта информация, со временем, переносится на жёсткий диск центрального накопителя посредством прямого перекопированния при личном посещении пункта. Видеоматериал этого сезона просматривался глазами. В настоящий момент разрабатывается автоматизация процесса. Что касается регистрации видеонаблюдением в оптическом диапазоне медленного пробоя на убегающих электронах, то пока статистика невелика. Явно зарегистрирован лишь один случай. Главная сложность наблюдения – плотные облака. Изначально планируемая дистанция удалённого наблюдения 75 км, как правило, недостаточна. Если гроза над установкой то, как оказалась, и над удалённым пунктом облачно. Необходимо создание дополнительных пунктов на большем удалении.

Несомненно, наиболее ярким результатом наблюдения в этом сезоне является регистрация длительного непрерывного диффузного свечения облаков, коррелирующего с аномальными возмущениями вторичных частиц космических лучей. Магнитной бури при этом не было. На странице [http://youtu.be/XXrlSWop_-o] приводится видео (45 мин) фиксирующее этот случай (грозовое событие 15.09.2013, рис. 10). На видео демонстрируется наблюдение области атмосферы над установкой «Ковёр» БНО ИЯИ РАН со стороны Нальчика, организованное в процессе проекта. На рис. 12 - 15 приводятся фотографии (яркость усилена в 25 раз) сделанные видеокамерой в период грозы, а на рис. 16 – дневной снимок. Время на фотографиях вверху местное летнее, опережает мировое на 4 часа, внизу – местное истинное. Везде, далее по тексту, приводится время местное истинное. Краткое описание хронологии. До 0ч 0м – лунная ночь, рис. 11. 0ч 30м луна скрылась за горизонт. 1ч

47м, справа, появился фронт непрерывно светящихся облаков, рис. 3. Двигался с севера на юг. Оценка скорости продвижения ~ 180 м/с. В 1ч 50м фронт достиг БНО, где сразу же началась гроза продолжительностью 3 часа. На видео видна динамика непрерывного диффузного свечения облаков. Угадывается три непрерывно действующих медленно меняющих яркость источника света, их подсвечивающих. 1 - слева за кадром, близко к камере, 2 - по центру и 3 - возле правого края. На рис. 13 такой пример. По времени он соответствует моменту положительного аномального возмущения в жёсткой компоненте. Для БНО (удалённость 75 км) характерная высота области подсветки (наиболее яркой части) соответствует диапазону 12.5 – 20.5 км над ур. моря, а размер по горизонтали 12.5 км. На рис. 5 и 6 приводятся фотографии относящиеся к моменту максимума отрицательного аномального возмущения в районе 2ч. На обоих снимках видна небольшая непрерывно светящаяся область внизу, по центру, с горизонтальным размером 6.2 км, расположенной локально над установкой, ниже уровня 6.5 км н. ур. м. (4 км – экранировка горами). В период до 1ч. 59м и после 2ч. 2м аналогичное свечение не выделяется. Грозовая деятельность постепенно сдвигалась в сторону наблюдательного пункта. Начиная с 3ч видимость сильно упала, по-видимому вследствие установления более плотной облачности. Поэтому, ещё более интересные моменты в динамике грозы, как видно из рис. 10, к сожалению, разглядеть уже крайне сложно. Обнаруженное, в ходе эксперимента удалённым видео регистратором продолжительное непрерывное диффузное свечение нижней области атмосферы в период регистрации максимума отрицательного аномального возмущения в мюонной интенсивности является новым интересным фактом, требующим объяснения.

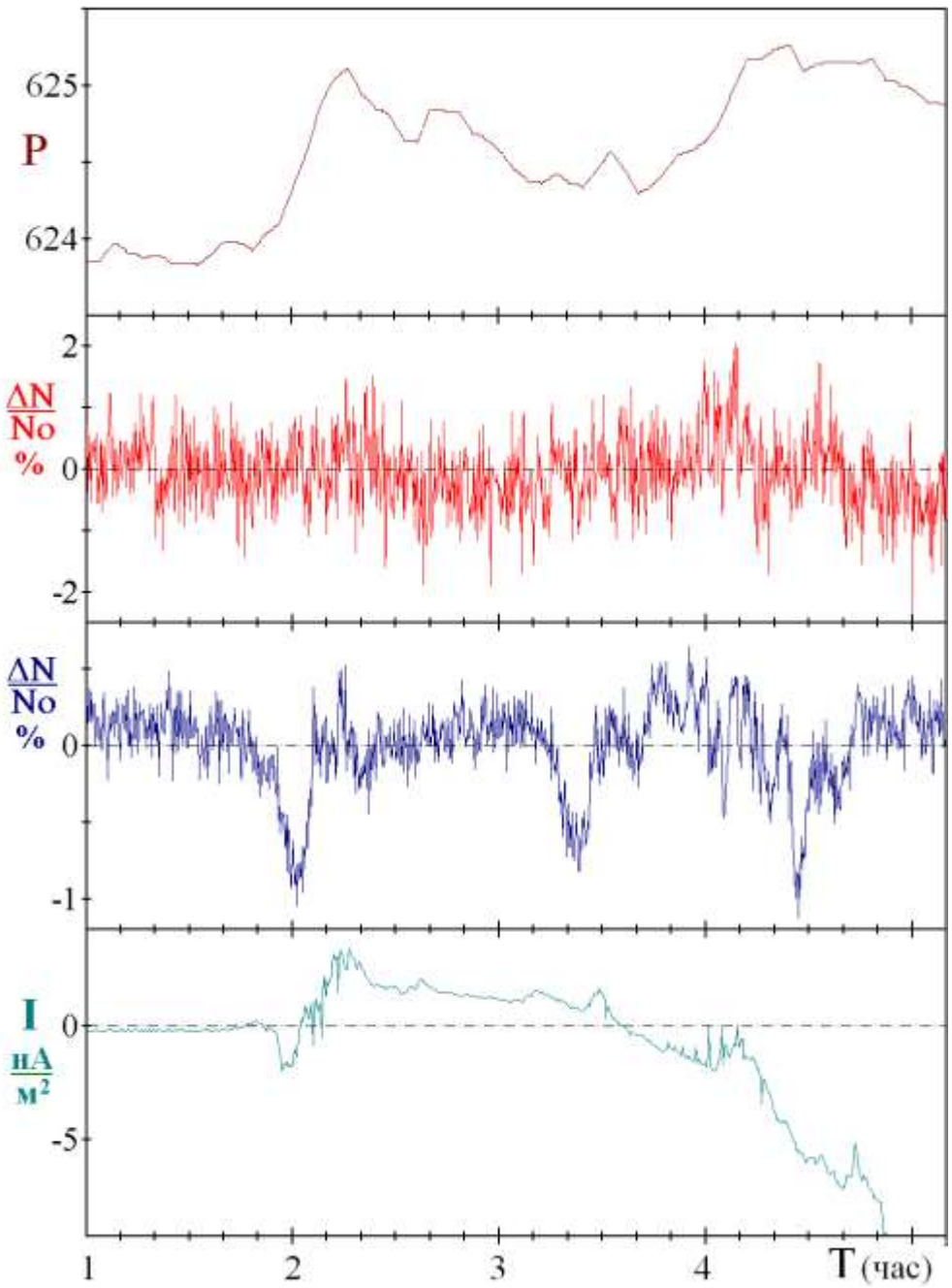



Рисунок 10. Грозовое событие 15.09.2013. Интервал усреднения 15 с.. Сверху вниз показаны: 1) Давление, 2) вариации интенсивности мягкой компоненты космических лучей в интервале 10-30 МэВ, 3) интенсивность мюонов с порогом по энергии 100 МэВ, 4) электрический ток дождя.

Рисунок 11. Грозовое событие 15.09.2013. Фотография атмосферы над установкой «Ковёр» с удалённого пункта «Хасанья». Отдалённость 75 км. Наверху приведено местное летнее время. Луна перед заходом за горизонт.

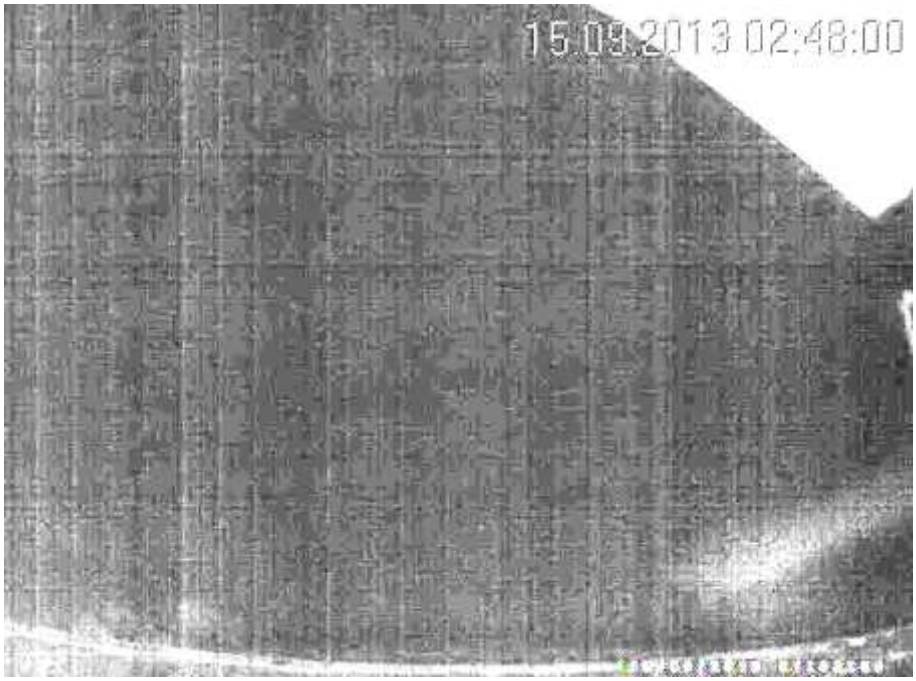



Рисунок 12. Грозовое событие 15.09.2013. Фотография атмосферы над установкой «Ковёр» с удалённого пункта «Хасанья». Отдалённость 75 км. Наверху приведено местное летнее время. Виден надвигающийся с севера на юг светящийся фронт.

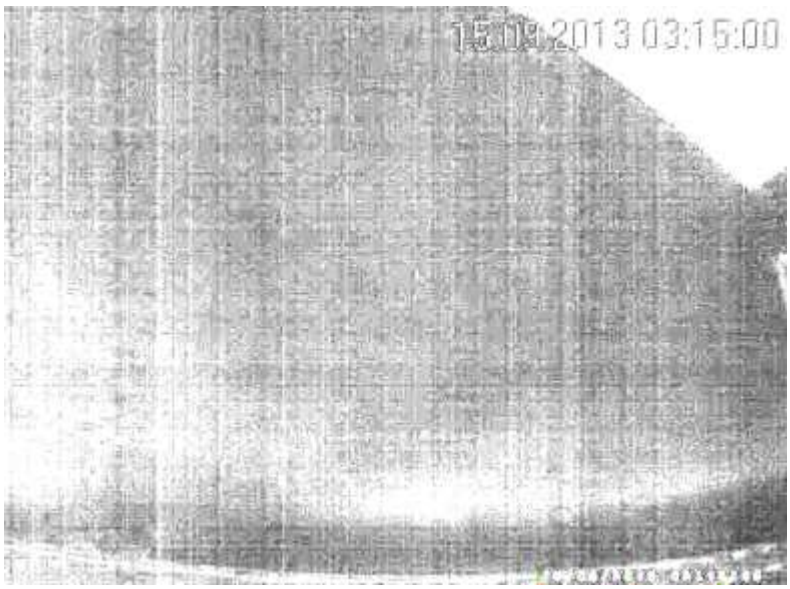



Рисунок 13. Грозовое событие 15.09.2013. Фотография атмосферы над установкой «Ковёр» с удалённого пункта «Хасанья». Отдалённость 75 км. Наверху приведено местное летнее время. Угадывается три непрерывно действующих медленно меняющих яркость источника света, их подсвечивающих. 1 - слева за кадром, близко к камере, 2 - по центру и 3 - возле правого края. Момент времени соответствует максимуму положительного аномального возмущения.

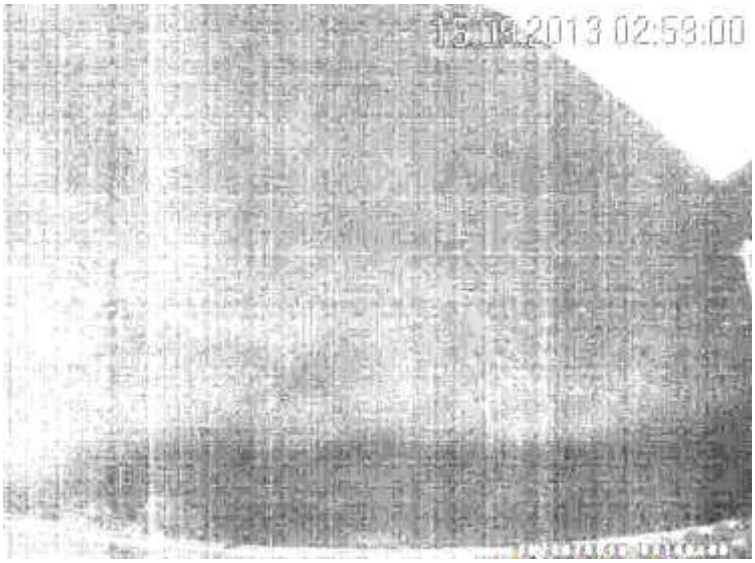



Рисунок 14. Грозовое событие 15.09.2013. Фотография атмосферы над установкой «Ковёр» с удалённого пункта «Хасанья». Отдалённость 75 км. Наверху приведено местное летнее время. Видна небольшая непрерывно светящаяся область внизу, по центру, с горизонтальным размером 6.2 км, расположенной локально над установкой, ниже уровня 6.5 км н. ур. м. (4 км – экранировка горами).

Рисунок 15. Грозовое событие 15.09.2013. Фотография атмосферы над установкой «Ковёр» с удалённого пункта «Хасанья». Отдалённость 75 км. Наверху приведено местное летнее время. Видна небольшая непрерывно светящаяся область внизу, по центру, с горизонтальным размером 6.2 км, расположенной локально над установкой, ниже уровня 6.5 км н. ур. м. (4 км – экранировка горами).

Рисунок 16. Грозовое событие 15.09.2013. Дневная фотография облачной атмосферы над установкой «Ковёр» с удалённого пункта «Хасанья». Отдалённость 75 км. Приведено местное истинное время.

Что касается видеонаблюдения из п. Нейтрино, то это грозовое событие (15.09.2013) камерой не фиксировалось. Причина – отсыревшие контакты вызвали сбой связи с компьютером. Но, во время другого грозового события (31.08.2013, рис. 18), наблюдение состоялось. К сожалению, оно единственное зафиксированное ближней камерой по причине поздней установки (с середины августа) и большого процента событий сбоя работы. Причины сбоев анализируются. На рис. 17, для общего представления, приводится снимок произведённый днём, после грозы. Камера установлена на стене 9-и этажного дома в п. Нейтрино. Просматривается часть неба выше склона горы. Слева, для ориентировки, объектив захватывает пик г. Андырчи. Установка «Ковёр» находится под нижней гранью снимка, чуть правее центра. Верхняя грань – близка к вертикали. Метод регистрации – ежесекундное фотографирование с максимальным временем экспозиции 1/3 с. Ночью, во время грозы, кроме молниевых разрядов ничего не выделялось. Анализировалась яркость шумов матрицы камеры до молниевого разряда и после. Сам момент разряда исключался. Для статистической обеспеченности просматривались ряды по 10 кадров. Выявилось четыре момента, когда яркость фотографии в течении минуты, после разряда молнии падала на несколько процентов. Эти моменты отмечены на рисунке 18. На рис. 19, то же событие, представленное подробнее. Из графиков видно, что 3 из 4 событий изменения освещённости явно проявились в период значительного аномального возмущения мюонной интенсивности, что говорит о быстром, но не мгновенном скачке разности потенциалов в стратосфере.

Этот предварительный результат, так же как и в случае с наблюдением из Хасаньи события 15.09.2013, указывает на корреляцию диффузного продолжительного свечения грозовых облаков с аномальными возмущениями вторичных частиц космических лучей.

Рисунок 17. Грозовое событие 31.08.2013. Дневной снимок атмосферы над установкой «Ковёр» с удалённого пункта «Нейтрино». Отдалённость 1 км. Внизу приведено местное истинное время.

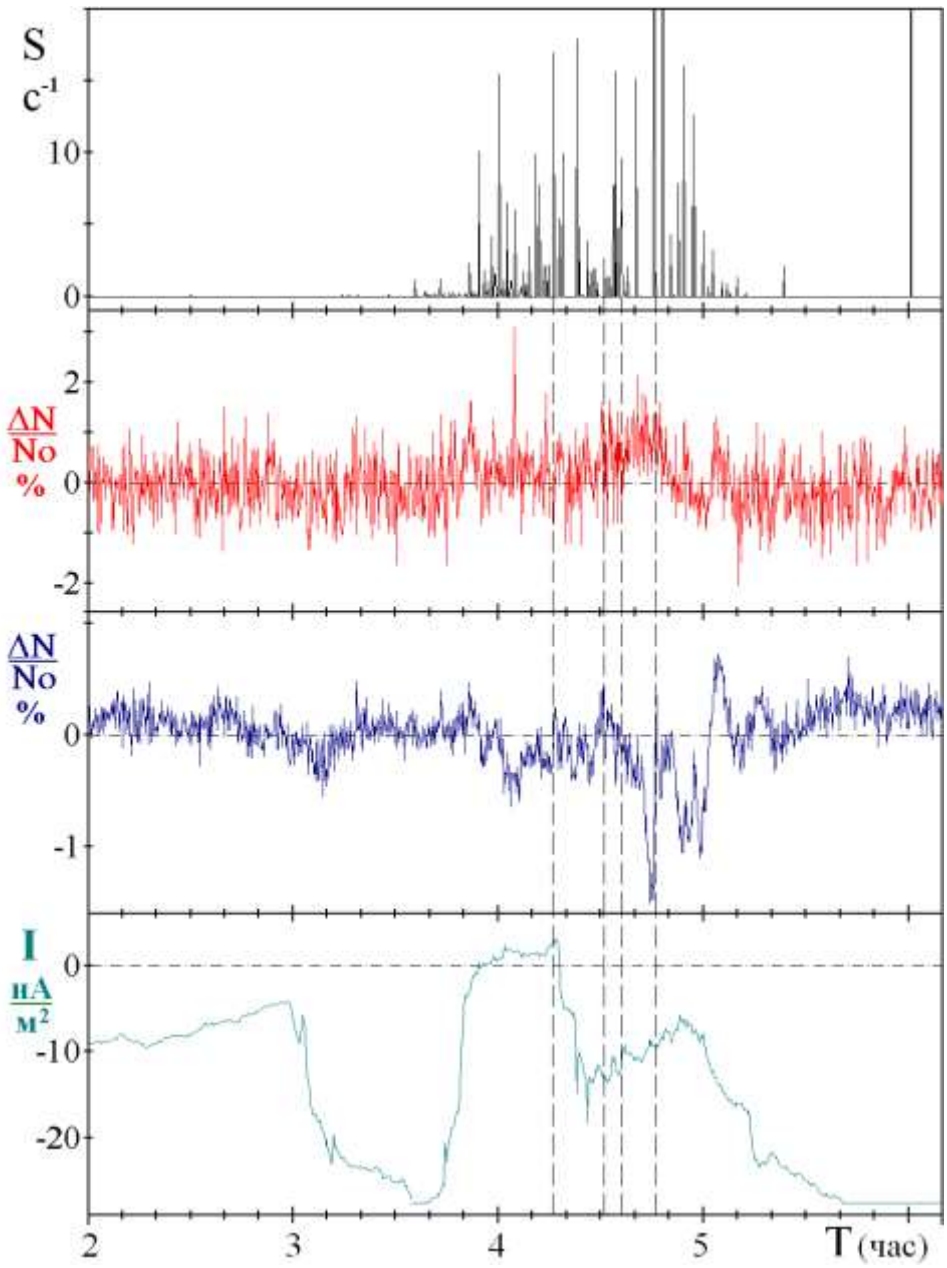



Рисунок 18. Пример коррелированных вариаций вторичных частиц космических лучей и свечения облаков зарегистрированного рядом расположенной камерой. Грозовое событие 31.08.2013. Интервал усреднения 15с. Сверху вниз показаны: 1) Отметчик молниевых разрядов, 2) вариации интенсивности мягкой компоненты космических лучей в интервале 10-30 МэВ, 3) интенсивность мюонов с порогом по энергии 100 МэВ, 4) электрический ток дождя. Вертикальные штриховые линии отмечают моменты времени, когда регулярная освещённость фотоснимков заметно падала.

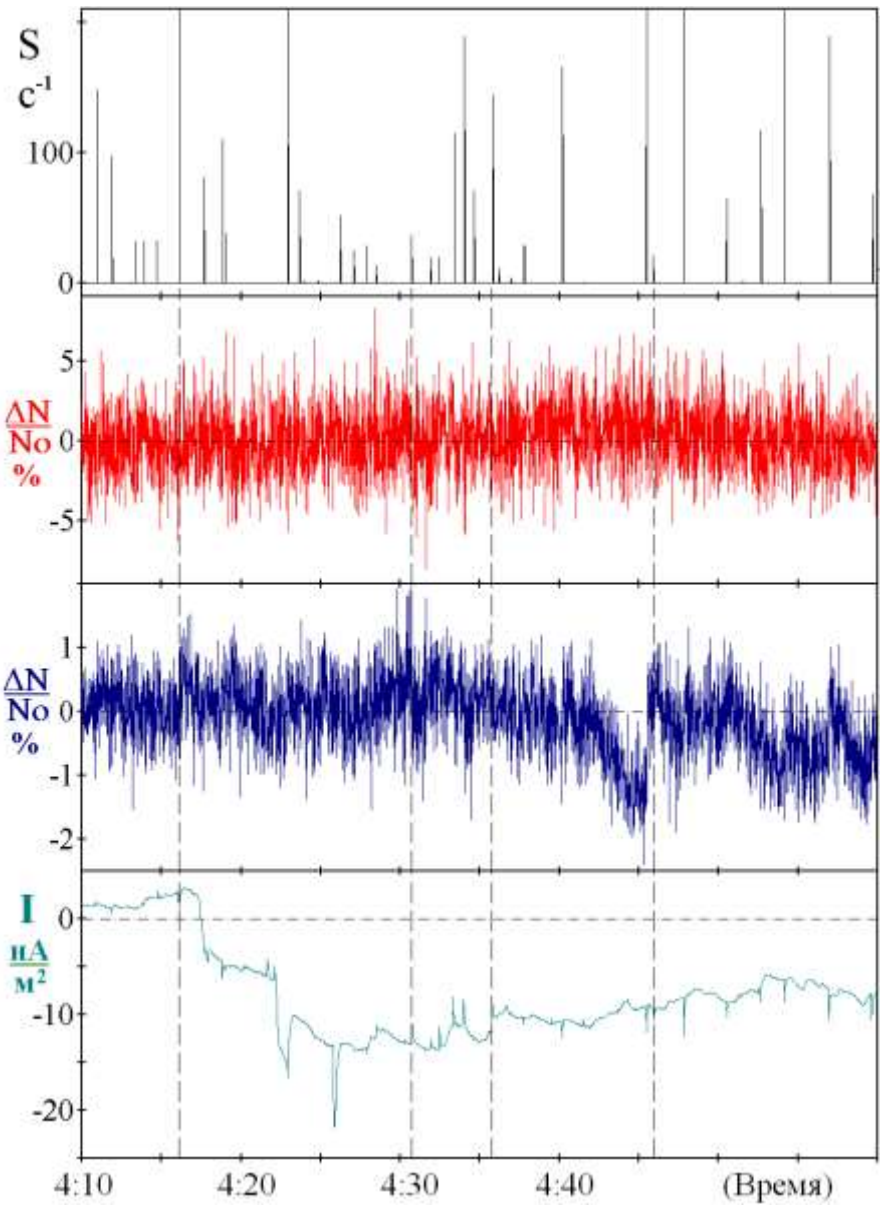



Рисунок 19. Пример коррелированных вариаций вторичных частиц космических лучей и свечения облаков зарегистрированного рядом расположенной камерой. Грозовое событие 31.08.2013. Интервал усреднения 1с. Сверху вниз показаны: 1) Отметчик молниевых разрядов, 2) вариации интенсивности мягкой компоненты космических лучей в интервале 10-30 МэВ, 3) интенсивность мюонов с порогом по энергии 100 МэВ, 4) электрический ток дождя. Вертикальные штриховые линии отмечают моменты времени, когда регулярная освещённость фотоснимков заметно падала.

Результаты по видео регистрации непрерывного диффузного свечения облаков во время гроз доложены на Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь».

### 2.1.1 Исследование связи возмущений космических лучей с геомагнитными пульсациями

За отчётный период 2013 г исследовались эффекты во время гроз, связанные с аномальными возмущениями вторичных частиц космических лучей.

1. На основе модели влияния электрического поля на интенсивность мюонов (см. отчёт 2012 г), восстановлен усреднённый высотный ход напряжённости в зависимости от приземного значения, не противоречащий экспериментальным наблюдениям вариаций космических лучей (за летне–осенний период). Регулярной причиной ограничения напряжённости поля на уровне земли во время гроз, является пробой на убегающих электронах в при пороговом режиме, происходящий на высоте нижнего зарядового слоя.

2. В отчёте 2012 г. показано, что существование медленно текущего пробоя стратосферы на убегающих электронах, во время гроз, не противоречит нашим результатам по регистрации возмущений интенсивности вторичных частиц космических лучей. Независимым источником информации о существовании такого пробоя была бы регистрация магнитного поля от токов ионов массово образуемых в этом процессе. В связи с чем исследовалась разность геомагнитного поля, зарегистрированная значительно разнесёнными станциями (Нейтрино и Москва) на предмет корреляции с аномальными возмущениями зарегистрированными установкой «Ковёр» во время гроз. Анализировался экспериментальный материал по грозовым событиям, зарегистрированным ранее на БНО, для которых имеются измерения геомагнитного поля в обоих станциях.

Выводы работы:

1. Экспериментально обнаружено локальное подавление во время гроз возмущений глобального геомагнитного поля.
2. Стабилизация магнитных пульсаций протекает в режиме медленного пробоя стратосферы убегающими электронами в припороговом режиме.
3. Зарегистрирован факт взаимного влияния возмущений геомагнитного поля и приземной напряжённости электростатического поля.
4. Наблюдается магнитное поле, вызванное током ионов образуемых при медленном пробое на убегающих электронах.

Результаты работ доложены на Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» и опубликованы в её материалах.

## 2.2 Тепловые нейтроны в широких атмосферных ливнях и окружающей среде

Предложенный нами ранее новый метод исследования ШАЛ и фоновых потоков тепловых нейтронов получил дальнейшее развитие.

В 2013 г. проводился набор и обработка экспериментальных данных, полученных с помощью разработанных нами нейтронных детекторов (эн-детекторов) по теме «Тепловые нейтроны в широких атмосферных ливнях и окружающей среде» на вариационных установках: «Нейтрон» в МИФИ, в Обнинске (Геофизическая служба РАН), в НИИЯФ МГУ, в БНО и в Лаборатории Гран Сассо (Италия), как на земной поверхности, так и под землей а также на прототипе ProtoPRISMA - установки нового типа для изучения ШАЛ (проект PRISMA). В ноябре 2013 г. была создана новая вариационная установка «Нейтрон-БНО» из 4-х эн-детекторов, которая с 06.12.2013 включена в режим непрерывного набора данных.

1). По вариационной программе были получены следующие новые данные:

- О потоках тепловых нейтронов во время Форбуш-понижений интенсивности космических лучей, путем измерений с помощью глобальной сети эн-детекторов, как над земной поверхностью, так и под ней. Показано хорошее согласие с данными нейтронных мониторов и продемонстрирована принципиальная возможность использования эн-детекторов под различными поглотителями для спектрометрии частиц вовлеченных в Форбуш эффект.

- По измерению нейтронных потоков во время гроз с целью проверки сообщений о возможной генерации нейтронов молниями. Был получен отрицательный результат: ни в одной из гроз в Москве за 2011-2013 гг. не было зафиксировано превышения потока тепловых нейтронов над фоновым потоком. Более того, во время самой мощной грозы 20.07.2012, когда молния попала в здание, где проводятся измерения, было зафиксировано понижение потока тепловых нейтронов на несколько часов, связанное, как мы полагаем, с большим количеством выпавших осадков. При этом понижение на 6% наблюдалось только в одном (D2) из 4 детекторов установки «Нейтрон», имеющим минимальное количество поглотителя (расположен в стеклянной галерее). В 3-х остальных детекторах никакого изменения потока нейтронов не наблюдалось. Этот результат приведен на рис. 20. Следует отметить, что только в нашем эксперименте проводится оцифровка импульсов с детекторов и отбор нейтронных событий по форме импульса, что позволяет нам быть абсолютно уверенными в отсутствии ложных срабатываний, связанных электромагнитными наводками, производимых молниевыми разрядами. В 2013 г. схожие понижения темпа счета нейтронов

были зарегистрированы также на нашей установке в Гран Сассо. По этим результатам подготовлена статья в высоко рейтинговый журнал.

- Было получено, что в вариациях нейтронных потоков присутствуют периоды (вероятность случайной реализации < $10^{-3}$) в диапазоне десятков минут, характерные для собственных колебаний Земли (12, 15, 35, 43, 54 мин.). В настоящее время идет набор статистики и поиск корреляций амплитуды этих колебаний с мощными землетрясениями. Готовится публикация.

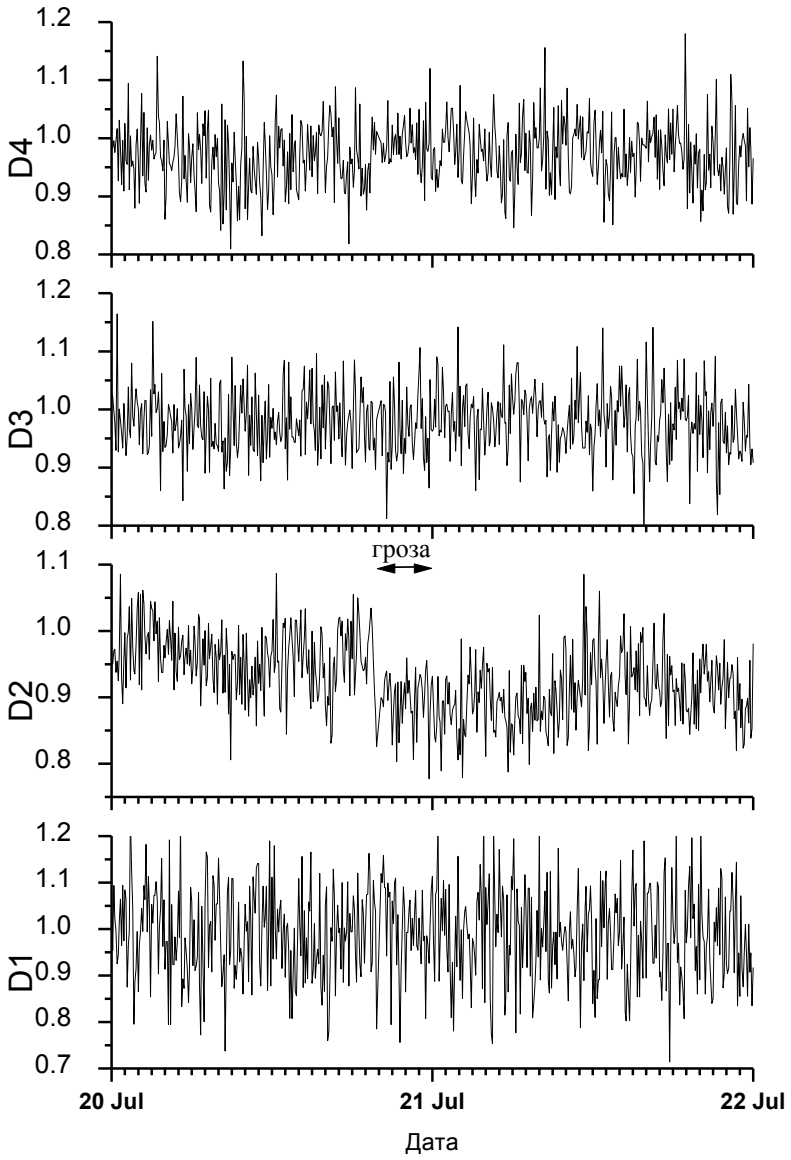



Рисунок 20. Гроза 20.07.2012. Показания 1,2,3,4 детекторов установки «Нейтрон», поправленные на давление.

2) По программе изучения ШАЛ методом регистрации генерируемых в них нейтронов в 2013 г. совместно со студентами и сотрудниками МИФИ была проведена большая работа по обеспечению непрерывной работы установки ProtoPRISMA на базе эксперимента НЕВОД в МИФИ). К настоящему времени получены экспериментальные данные по временному распределению регистрируемых нейтронов ШАЛ и по их временному и пространственному распределению. Эти результаты были доложены на 33-й Международной конференции по космическим лучам в Рио де Жанейро.

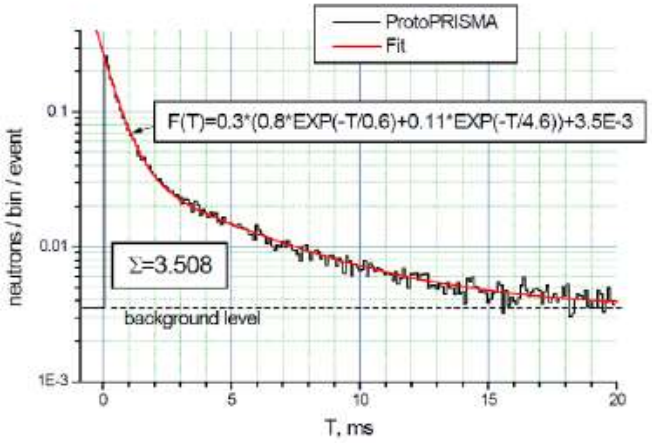



Рисунок 21. Временное распределение регистрируемых нейтронов.

В качестве иллюстрации на рис. 21 показано временное распределение зарегистрированных нейтронов в ШАЛ. Как и в наших прежних измерениях, временные распределения хорошо описываются двойными экспоненциальными функциями.

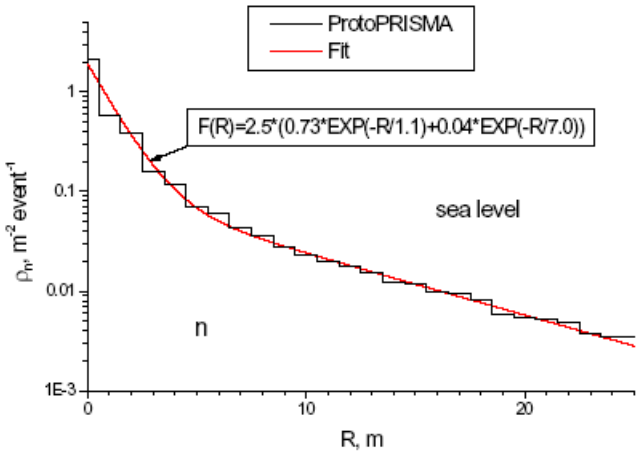


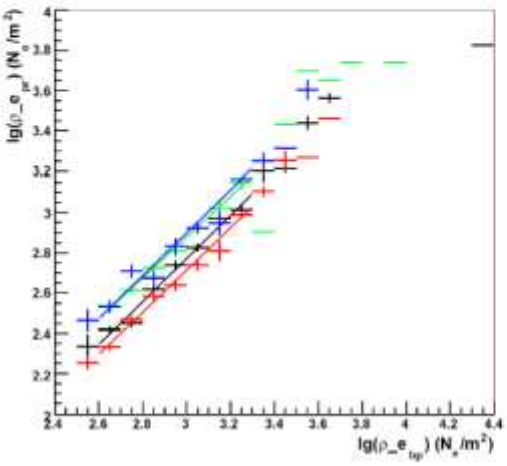

Рисунок 22. Пространственное распределение регистрируемых нейтронов.

R – расстояние до оси ШАЛ.

На рис. 22 представлено пространственное распределение тепловых нейтронов в ШАЛ относительно оси ливня. Это распределение хорошо описывается двойной экспоненциальной функцией с параметрами 1.1 м и ~7 м. При этом первый параметр есть характерное расстояние регистрируемого нейтрона от родительского адрона, тогда как второй – характерное расстояние родительского адрона от оси ШАЛ, как и следует ожидать из экспоненциального распределения по поперечному импульсу родительских адронов.

3) В январе 2013 г. в Тибете на высоте 4300 м над уровнем моря (в ангаре эксперимента ARGO-YBJ) в содружестве с Институтом физики высоких энергий Китайской академии наук был создан высокогорный прототип установки PRISMA, состоящий их 4-х эн-детекторов идентичных детекторам установки ProtoPRISMA с идентичной системой регистрации и калибровки (PRISMA-YBJ). На этом прототипе был проведен сеанс тестовых и калибровочных измерений совместно с установкой ARGO-YBJ. В результате измерений, впервые в мировой практике, с помощью двух уникальных методик получены совместные гибридные данные по Широким Атмосферным Ливням (ШАЛ) на рекордной высоте 4300 м над уровнем моря. Полученный в этом эксперименте результат демонстрирует очень хорошее согласие в измерении плотности частиц ШАЛ двумя независимыми методами. Получена линейная зависимость показаний эн-детекторов, как в сумме, так и каждого в

electron density measured by PRISMA-YBJ ($\rho_e_{pr}$) and ARGO-YBJ ($\rho_e_{bp}$)



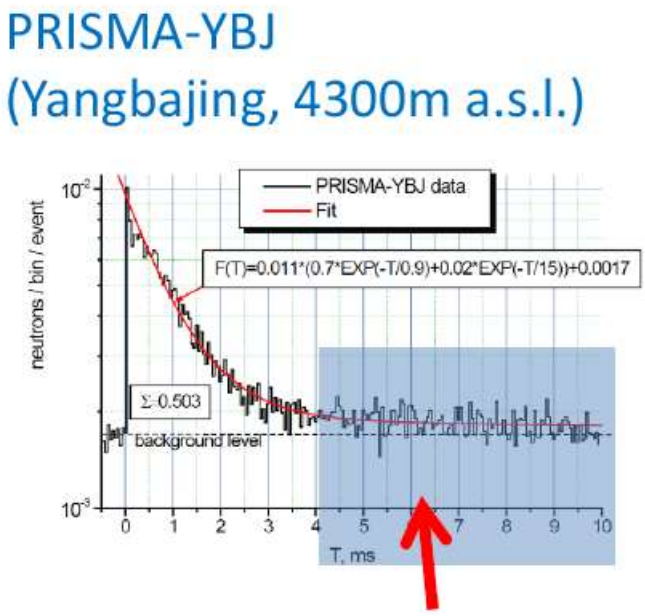

Fitting : lgy=a×lgx+b

| Detector Number | Slope (a) | Intersection (b) |
|---|---|---|
| 1 | 1.07±0.04 | -0.44±0.13 |
| 2 | 1.05±0.04 | -0.43±0.12 |
| 3 | 1.01±0.06 | -0.15±0.16 |
| 4 | 1.06±0.03 | -0.28±0.11 |

- Slope=1: Very good linear correlation between two detectors!
- Intersection≠0: A shift factor means the careful calibration is needed.

отдельности, от показаний детектора ARGO-YBJ. Проведенная калибровка позволила уточнить абсолютный энергетический отклик нашей установки на электромагнитную компоненту ШАЛ.

С 30.08.2013 г. установка PRISMA-YBJ включена в режим непрерывного набора данных. В 2013 г. на ней, также как и в Москве, были получены параметры временных и пространственных распределений тепловых нейтронов сопровождающих ШАЛ. Вновь измеренные распределения оказались очень близкими по форме к полученными нами ранее на других прототипах и хорошо описываются двойными экспоненциальными функциями. Параметры же этих экспонент зависят от высоты над уровнем моря, как и следует ожидать из феноменологии ШАЛ. Существенным отличием установок, помимо высоты над ур. моря, является наличие достаточно толстой бетонной крыши и бассейна с водой в МИФИ. Это отличие проявилось в результатах экспериментов. Так отсутствие толстой крыши в ангаре ARGO позволило нам впервые зарегистрировать нейтроны, рожденные в воздухе над установкой - атмосферные нейтроны, приходящие с большой задержкой, порядка десятков мс. Наличие большого объема воды в экспериментальном здании НЕВОД в МИФИ сказалось на величине первой временной экспоненты регистрируемых локальных нейтронов: 0.6 мс, вместо 0.9 мс полученной в Янгбаджинге и ожидаемой из расчетов для стандартного грунта (~1 мс).




*атмосферные нейтроны?*

Рисунок 23. Временное распределение регистрируемых нейтронов в Янгбаджинге.

Из пространственных распределений было получено, что характерное расстояние регистрируемых нейтронов от траектории родительского нейтрона составляет 1.1 м (независимо от высоты над уровнем моря), а характерное расстояние родительских адронов от оси ШАЛ составляет м в Янгбаджинге ~12.5, что и должно наблюдаться при разреженной атмосфере высокогорья.

Кроме того, за 2012 - 2013 гг. на установке ProtoPRISMA, благодаря обеспечению её непрерывной работы, был накоплен большой объем информации по спектру мощностей ШАЛ, как по числу частиц, так и по числу нейтронов. В настоящее время идет обработка и анализ этой информации. Готовятся публикации.

4) В ноябре 2013 г. на БНО создана новая нейтронная вариационная установка из 4-х эн-детекторов, находящимися под разными поглотителями – Нейтрон-БНО. Основная цель установки – изучение Форбуш-эффекта, поведение нейтронного потока во время гроз и прочих спорадических вариаций. С 6.12.13 пошел непрерывный набор информации с этой установки.

В 2013 г. было опубликовано 9 статей в журналах и подготовлено 4 доклада на 33-ю Международной конференцию по космическим лучам.

# 4 Исследование характеристик потоков частиц космического излучения высоких и сверхвысоких энергий на комплексе установок БПСТ

## 4.1 Мониторинг потоков частиц космического излучения высоких и сверхвысоких энергий на комплексе установок БПСТ

Мониторинг потоков частиц космического излучения на установках комплекса БПСТ может проводиться только при условии функционирования установок в режиме непрерывного набора информации всем физическим задачам. Поддержание такого режима работы установок является одной из основных задач лаборатории ПСТ.

На установке БПСТ в 2013 году проводилась ежедневная диагностика информации, поступающей с установки. Еженедельно проводится текущий ремонт и настройка детекторов установки (с 01.01.2013 по 13.12.2013 было проведено 42 ремонтных дня общей продолжительностью 347 часов). Дополнительные потери информации: 168 часов – отладка новой on-line программы и 391 час – вследствие неисправностей системы регистрации.

За отчетный период были проверены и откорректированы коэффициенты усиления ФЭУ и пороги формирователя импульсного сигнала у 84 детекторов; заменены и отремонтированы 27 формирователей импульсного сигнала, заменены 36 потенциометров на делителях ФЭУ. Было сменено 2 ФЭУ (один – из-за повышенных шумов, второй - из-за падения уровня выходного сигнала), в 6 детекторах произведена смена оптической смазки между ФЭУ и иллюминатором бака. Отремонтировано 152 логарифмических преобразователя.

Проводились работы по поддержанию работоспособности системы сбора информации установки БПСТ, в том числе: ремонт низковольтного блока питания МИП стойки управления; ремонт и настройка трех дискриминаторов с временной привязкой КФ-2; ремонт прецизионных часов «DECAN»; ремонт платы формирования часовых отметок от GPS; ремонт блока управления многоканальной измерительной системы; устранение неисправностей годоскопа импульсных каналов и т.д.

В 2013 году набор информации на БПСТ проводился в течение 29666 15-и минутных интервалов, часть из которых являются неполными вследствие блокировок системы регистрации. Было зарегистрировано 444483261 событий (кадров), при условии срабатывания хотя бы одного детектора. В силу различных условий отбора событий, чистое время набора различается для различных физических задач. В качестве примера мониторинга потоков частиц на рис.24 показан временной ход приведённого к 1 секунде среднесуточного темпа счёта мюонов на БПСТ в 2013 году.

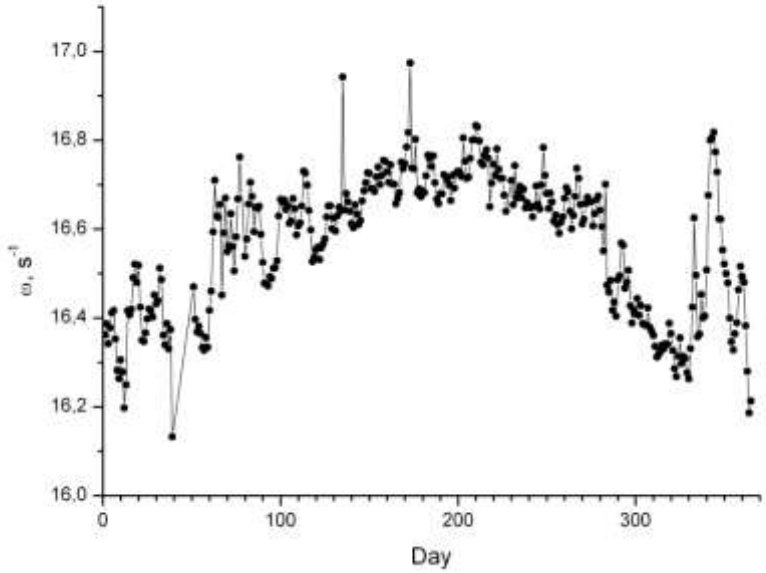



Рисунок 24. Поведение среднесуточного темпа счёта БПСТ за 2013 год.

На установке “Андырчи” продолжается наладка новой системы сбора информации. Новая система регистрации, созданная на основе интерфейса VME, позволяет набирать информация по всем решаемым на установке физическим задачам. Произведен монтаж плат выработки временных ворот для 32-х канального зарядо-цифрового преобразователя (QDC - блок V792AC) и плат для перехода с разъемов CP-50 на плоский шлейф с целью подачи на измерительные входы V792AC. Выполнена настройка порогов срабатывания компараторов во входных цепях устройств выработки временных ворот для QDC. Для монтажа плат подготовлены два крейта (за основу взяты крейты стандарта «Вишня»), размеры которых изменены так, чтобы можно было их установить в стойку «КАМАК». В этой же стойке будут размещены VME крейт (с блоками TDC и QDC) и промышленный компьютер системы сбора данных.

На установке “Ковёр-2” в течение 2013 года проводился постоянный мониторинг качества набранной информации. По результатам мониторинга проводилась настройка параметров и ремонт отдельных узлов детекторов. Разработана (в программе Quartus II 9.0) схема выработки мастера для микросхемы программируемой логики EP1K50TC144 в блоке управления новой системы сбора данных установки «Ковер-2». Полное время набора информации составляет 93.2% по задаче регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ и 93% по задаче регистрации мюонной компоненты ШАЛ от календарного времени. По программе регистрации вторичной нейтронной компоненты на нейтронном мониторе

полное время набора информации равно 99% и по задаче изучения вариаций интенсивности космических лучей во время гроз – 85% от календарного времени. По программе изучения ливней малой мощности (по совпадениям угловых модулей “Ковра”) полное время набора составляет 96% от календарного времени.

## 4.2 Исследование первичных космических лучей в области энергий $10^{13}$ – $10^{18}$ эВ на комплексе установок БПСТ

Разработан метод восстановления энергетического спектра всех частиц по спектру кратностей в БПСТ. Для этого предложена однокомпонентная модель первичного спектра с зависящим от энергии эффективным атомным номером $A_{eff}(E_0)$. Был рассмотрен класс моделей первичного спектра со степенными спектрами до и после излома (показатели степенного спектра $\gamma_1$ и $\gamma_2$, соответственно), излом при энергии на заряд предполагается резким ($E_{kZ} = Z \times E_{kp}$, где $E_{kp}$ – положение излома для первичных протонов). Для каждой конкретной модели вычисляется спектр кратностей, степень согласия которого со спектром, измеренным в эксперименте, определяется по $\chi^2$. Выбор минимального значения $\chi^2$, после всех возможных переборов параметров модели, позволяет получить энергетический спектр всех частиц и зависимость эффективного атомного номера от энергии первичной частицы. Следует заметить, что данный метод (вследствие перебора всех допустимых значений параметров) требует большого процессорного времени. Для рассмотренного класса моделей первичного спектра по критерию минимума $\chi^2$ выбрана модель с $\gamma_1 = 2.74$, $\gamma_2 = 3.10$, $E_{kZ} = Z \times 2 \cdot 10^{15}$ эВ и зависимостью эффективного атомного номера от энергии первичной частицы, представленной на рисунке 25.

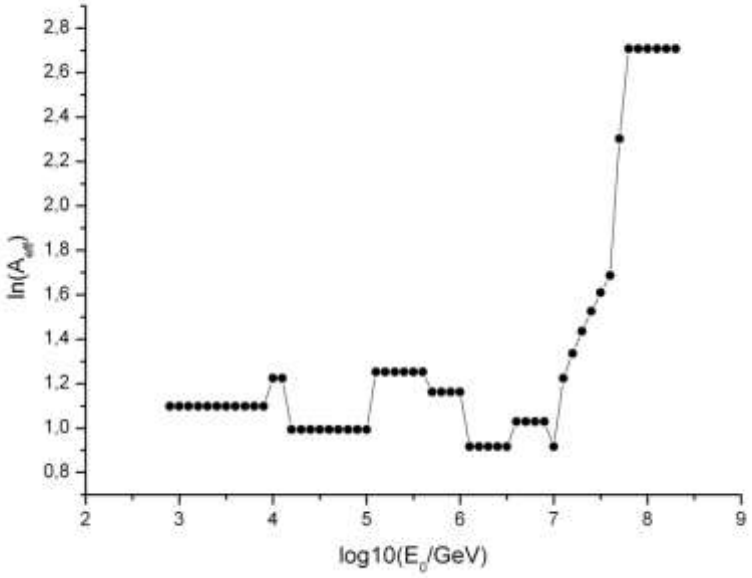



Рисунок 25. Зависимость эффективного атомного номера от энергии первичной частицы для выбранной модели первичного спектра.

## 4.3 Подготовка проекта модернизации Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа

Разработана подробная функциональная схема нового годоскопа импульсных каналов (ГИК) на 3200 каналов для БПСТ. Сбор информации будет осуществляться с помощью входного регистра V1495 стандарта VME. Через крейт VME в дальнейшем будет считываться вся временна́я и амплитудная информация. Для уменьшения монтажных работ электроника будет расположена в крейтах существующего годоскопа, с использованием существующих входных разъемов. Предполагается изготовить ГИК на новой элементной базе с минимальной переделкой кабельной сети, что приведёт к росту надежности и скорости передачи информации и уменьшению мертвого времени работы установки. В программной среде Quartus разработаны принципиальные схемы кассеты годоскопа импульсных каналов и управляющей кассеты. Собрана 2-х канальная электронная схема и с ее помощью произведено тестирование прохождения сигналов LVDS по заднему кроссу крейта КАМАК. Задачей тестирования было проверка частотных возможностей и влияние наводок соседних каналов друг на друга. Произведена разводка печатной платы, предназначенной для приема информации с годоскопических матриц, и произведена разводка печатной платы, расположенной в крейте и исполняющей роль контроллера (управляющая кассета).

## 4.4 Гамма-астрономия высоких, сверхвысоких и ультравысоких энергий

На установке “Андырчи” в течение 2533 часов чистого времени проведён набор информации с измерением темпа счёта установки каждую миллисекунду. Часть полученной информации обработана с целью поиска ультракоротких всплесков космического гамма-излучения. Для трёх моделей испарения получены ограничения на концентрацию испаряющихся первичных чёрных дыр в локальной области Галактики характерного размера ~ $3*10^{-3}$ парсек.

## 4.5 Создание установки “Ковер-3” для изучения спектра и состава ПКИ в области первичных энергий 50 ТэВ – $10^4$ ТэВ

Продолжаются работы по созданию установки “Ковер-3”. Закончена сборка, настройка и установка 235 пластических сцинтилляционных детекторов в подземных тоннелях, закончен монтаж всей кабельной сети, собраны 4 детектора тепловых нейтронов. Разработана принципиальная схема приемного блока регистрирующей системы мюонного детектора, включающая в себя переходники уровней NIM-ECL (LVDS) и схему формирования мастера ≥ 10 из 205. Конструктивно реализация схемы предполагается в двух отдельных крейтах по 205 каналов в каждом с выдачей отдельных мастерных импульсов ≥ 10 из 205 для каждого тоннеля мюонного детектора.

## 4.6 Нейтринные эксперименты на БПСТ

Продолжается набор информации по программе регистрации нейтринных всплесков (в том числе от Сверхновых с коллапсом ядра). В 2013 году чистое время регистрации по данной задаче составило 317.2 суток (86.9% от календарного времени за период с 01 января 2013 по 31 декабря 2013 года). За это время было зарегистрировано 660978 событий с единственным сработавшим детектором на одной из внутренних плоскостей. Из них 97200 событий не удовлетворяют критериям отбора, 563778 событий анализировались для обнаружения цепочки одиночных событий внутри 20 секунд. Претендентов на кластер сигналов от нейтринной вспышки внутри интервала в 20 секунд не обнаружено. Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2013 года составило 28.88 года. Верхняя граница на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике равна 0.080 в год на 90% доверительном уровне.

На БПСТ продолжается набор информации по программе регистрации мюонных нейтрино снизу. За 2013 год (с 01.01.2013 по 10.12.2013) живое время регистрации составило 7347.3 часа. За текущий год выделено 69 кандидата на нейтринные события, из них 53 снизу

(траектория через 3 и более плоскостей) и 16 горизонтальных. Чистое время наблюдения за весь период (1978 года) составляет 242943 часа (27.72 года). За это время зарегистрировано 2013 события, из них 1474 снизу и 539 горизонтальных.

По экспериментальным данным БПСТ за 24.12 года чистого времени проведен поиск сигнала от аннигиляции частиц темной материи в центре Солнца. Превышения сигнала от Солнца над фоном мюонных нейтрино атмосферного происхождения не было обнаружено. Получены новые ограничения на величину сечения различных типов взаимодействий реликтовых частиц темной материи с нуклонами.

Проведён поиск мюонных нейтрино, совпадающих по времени и направлению с космическими гамма-всплесками (КГВ). Для этого были отобраны нейтринные события с зенитными углами больше 100 градусов (1357 событий). В данной работе анализировались 1472 КГВ, попавших в поле зрения БПСТ (с зенитными углами больше 100 градусов). Из них 1099 всплесков (из полного числа 2702) были зарегистрированы BATSE в период с 1991 года по 2000 год и 373 (из полного числа 924) – в различных экспериментах (Swift и др.) в период с декабря 2004 года по декабрь 2013 года. Мюонных нейтрино, совпадающих по времени и направлению с КГВ, обнаружено не было. Получены новые пределы на поток нейтрино от КГВ (рис. 26).

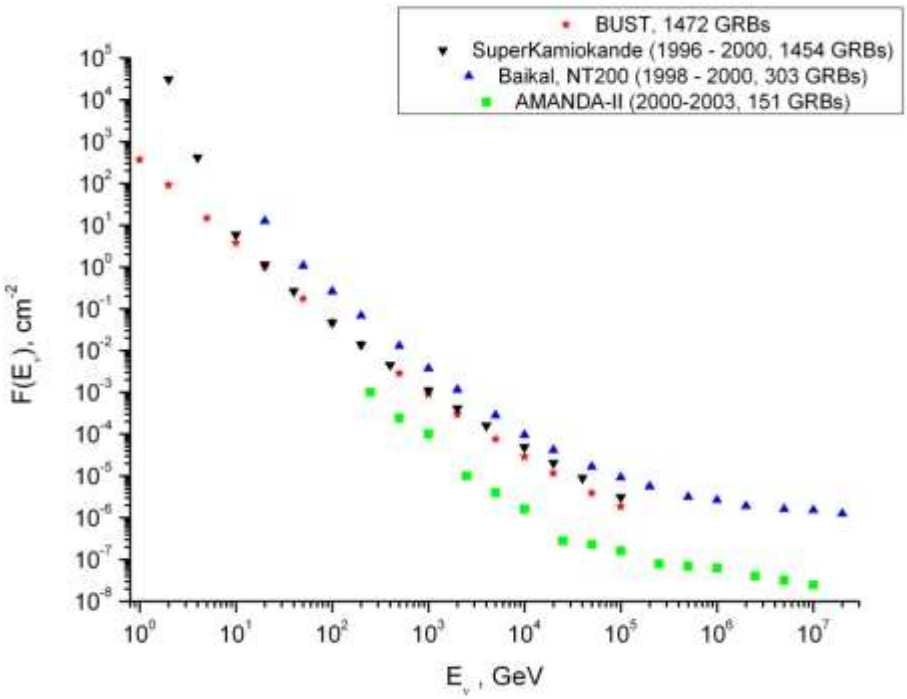



Рисунок 26. Ограничения на поток мюонных нейтрино от космических гамма-всплесков.

Рассматривалось влияние плотности и температуры среды на время жизни нейтрального пиона относительно распада на пару нейтрино-антинейтрино. Предложен и

изучен канал распада пиона под действием фотонов. Показано, что с ростом температуры вероятность распада, состояний с квантовыми числами нейтрального пиона на нейтрино-антинейтринные пары может резко возрастать на несколько порядков. Данный процесс может иметь место в нейтронных звездах, приводя к дополнительной потере энергии через излучение нейтрино; в кварк-глюонной плазме, образующейся в столкновениях ультрарелятивистских ионов. Последний процесс интересен тем, что в случае образования кварк-глюонной плазмы в столкновениях тяжелых ионов космических лучей с ядрами воздуха он может приводить к искажению спектра первичных космических лучей из-за потери энергии через нерегистрируемую компоненту (нейтрино) и одновременно генерировать дополнительный поток атмосферных нейтрино.

## 4.7 Исследование анизотропии и вариаций космических лучей $10^{11}$ – $10^{20}$ эВ

Продолжалось изучение взаимосвязей динамических процессов в атмосфере Земли и вариаций интенсивности мюонной компоненты космических лучей по экспериментальным данным БПСТ. Произведен предварительный анализ коэффициентов корреляции интегрального темпа счета мюнов с величиной, пропорциональной плотности вещества атмосферы на различных высотах. Эта величина вычислялась из уравнения Менделеева – Клапейрона по температуре и давлению, известным из измерений на метеозондах. Выявлены существенные корреляции в стратосфере, почти монотонно быстроспадающие с уменьшением геометрической высоты над уровнем моря.

Построены периодограммы Ломба–Скаргла для полученных за 9 лет мюонных и температурных временных рядов. Во всех случаях обнаруживается ярко выраженный период, равный 1 году. Для температурных временных рядов в окрестности тропопаузы добавляется дополнительный (ярко выраженный) период, равный приблизительно 0.5 года. С учетом других, существенно менее выраженных периодов, это обстоятельство может указывать на то, что в окрестности тропопаузы периодическая компонента более отличается от синусоиды, чем для других высот. Поскольку спектральная плотность температур в районе тропопаузы сосредоточена на двух гармониках, а для мюонов - на одной, это обстоятельство может служить исчерпывающим феноменологическим объяснением (посредством анализа «интегралов перекрытия») минимума в зависимости корреляционных и температурных коэффициентов от высоты.

## 4.8 Международный эксперимент EMMA

В период с 12.05.2013 по 20.05.13 в Пихасалми (Финляндия) проводились ремонтные и наладочные работы с детекторами SC-16. Выявлены и устранены неисправности в 5 детекторах. Из них: в 2х детекторах заменены фотосенсоры ЛФД, в одном детекторе

заменена микросхема в системе автоподстройки порога, в двух детекторах заменены цифровые платы из резервного комплекта. В целом, в проверенных 9 детекторах замечена общая тенденция снижения чувствительности отдельных фотосенсоров, в результате чего возникает необходимость повышения рабочего базового напряжения последних.

# 5 Исследование редких распадов и процессов в низкофоновых условиях

## 5.1 Участие в международном эксперименте GERDA по поиску безнейтринной моды двойного бета-распада изотопа 76Ge

Завершена первая фаза эксперимента. Получен наивысший предел на безнейтринную моду двойного бета распада изотопа Ge-76 на уровне $2{,}1*10^{25}$ лет. С учетом результатов предыдущих экспериментов, получен предел на уровне $3{,}0*10^{25}$лет, что соответствует ограничению сверху на массу «Майорановского» нейтрино на уровне 0,2÷0,4эВ в зависимости от методов вычисления матричных элементов ядра. По результатам первой фазы эксперимента опубликовано 4 статьи в реферируемых журналах. Начата подготовка ко фторой фазе эксперимента. В течение года по приглашению MPI-k (Институт Макса Планка по ядерной физике, г. Гейдельберг, Германия) два раза командирован сотрудник ЛНФИ (Гангапшев А.М.) в Гейдельберг для непосредственного участия в подготовительных работах ко второму этапу эксперимента в MPI-k и Gran-Sasso (Италия, лаборатория Гран-Сассо).

## 5.2 Исследование радиоактивных загрязненностей различных материалов.

В течение года было выполнено измерение радиационной чистоты семи образцов:

- обрезанный и отпалированный образец кристалла молибдата кальция (були)
- молибдат кальция порошкообразный, образец №1
- вольфрамовые кубики для низкофоновой защиты (для ГГНТ)
- молибдат кальция порошкообразный, образец №2
- карбонат кальция, сырье для выращивания кристаллов молибдата кальция
- молибдат кальция кристаллический, кристалл не обрезанный (буля)
- формиат кальция, сырье для выращивания кристаллов молибдата кальция.

Для всех образцов получены активности радиоактивных примесей K-40, Tl-208 (ряд Th-232), Bi-214 (ряд u-238), Ac-228 (ряд Th-232).

## 5.3 Новый этап эксперимента по поиску 2К-захвата в 78Kr и 124Xe.

Было проведено объединение образцов обогащённого ксенона №1а, №2, №3, №4, №5, №6 разных лет выпуска и получен образец объёмом 12.142 л с обогащением по $^{124}$Xe до ~62.95 % (7686 см$^3$ изотопа). Этим газом был заполнен счётчик до 1.1 атм. и проведено измерение его фона в течение 310 час. Фон в интервале 10-150 кэВ оказался равным ~60 час$^{-1}$. Избыточный фон создавался распадами изотопа $^{85}$Kr, присутствующего в ксеноне в составе примесного (~50 ppm) криптона. Были предпринята попытка «промыть» ксенон от криптона. Предполагалось, что при замораживании вмещающего баллона в жидком азоте (-196$^o$C)

ксенон в твёрдой фазе высадится на внутреннюю поверхность (давление насыщенных паров $1.93 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.), а криптон останется в газовой фазе из-за относительно большого при этой температуре давления насыщенных паров (~1.8 мм рт.ст.). Предварительно в ксенон в качестве газа-носителя планировалось добавить несколько см$^3$ криптона, не содержащего $^{85}$Kr. Предполагалось повторить процедуру несколько раз. Степень очистки контролировалась по величине остаточного фона счётчика. Данная схема очистки результата не дала. Можно предположить, что весь криптон осел на поверхность ксенона, как на активированный уголь. После консультаций со специалистами в качестве «промывочного» газа был опробован гелий. За одну процедуру в 2 л. баллон с ксеноном добавлялось 0.5 л. гелия. Баллон замораживался, гелий откачивался. После 6 процедур фон счётчика в интервале 15-150 кэВ стал равен ~12 час$^{-1}$, то есть требуемый результат был достигнут. В итоге этой работы разработана простая и дешёвая процедура очистки ксенона от следового количества криптона.

Счётчик был заполнен до максимально возможного для данного образца давления 1.1 атм. Измерения в подземной низкофоновой установке проводились в течение 1130 час. По результатам обработки информации, накопленной за 1130час. установлен предел на период полураспада $^{124}$Xe относительно 2K-захвата: $T_{1/2}(2K,2\nu) \geq 3.9 \cdot 10^{20}$ лет (90% у.д.).

За время проведения измерений в распоряжении коллектива появился ещё один образец обогащённого ксенона (№7) объёмом 56.9 л, содержащий $^{124}$Xe (7.27% - 4137 см$^3$), $^{126}$Xe (25.98%), $^{128}$Xe (41.86%), $^{129}$Xe (24.49%), $^{\geq 130}$Xe (0.4%). Если его использовать в качестве «балластного» газа для создания рабочего образца объёмом 50 л, то в составном образце будет содержаться 10438 см$^3$ $^{124}$Xe (20.88%). Для проверки фоновых характеристик нового ксенона счётчик был заполнен до 4.8 атм. За время измерений 146 час был набран спектр, на котором виден интенсивный пик в районе 28 кэВ. Скорость счёта в интервале 15-150 кэВ, равную ~48 час$^{-1}$. Оказалось, что эта величина экспоненциально снижается со временем с периодом полураспада ~30 дней. По набору признаков в качестве источника был идентифицирован радиоактивный изотоп $^{127}$Xe. Он может образовываться на поверхности Земли в реакциях $^{126}$Xe(n,γ)$^{127}$Xe и $^{128}$Xe(μ,n)$^{127}$Xe при взаимодействии вторичных частиц космических лучей с изотопами ксенона, входящими в состав образца. В литературе отсутствуют данные о величине сечений приведённых выше реакций. По-видимому, это можно объяснить тем, что в естественном ксеноне содержание исходных изотопов крайне мало - $^{126}$Xe-0.09%, $^{128}$Xe-1.91%. Образец №7 сильно обогащён этими изотопами и с его помощью можно измерить указанные сечения.

Для непосредственного использования образца №7 в эксперименте по поиску 2K-захвата $^{124}$Xe требуется время ≥4 мес. для того, чтобы фон от $^{127}$Xe снизился до приемлемого

уровня. В образце в значительном количестве присутствует $^{126}$Xe. Этот изотоп также может распадаться путём 2К-захвата. Энергия перехода составляет 897 кэВ. В результате измерений по программе поиска 2К-захвата $^{124}$Xe одновременно может быть получено высокое ограничение на этот процесс для $^{126}$Xe, если образец №7 будет использован в качестве дополнительной порции к готовому составному образцу $^{124}$Xe.

## 5.4 Создание воздушной ионной камеры высокого давления для измерения содержания 222Rn в подземных условиях.

Завершена комплектация промышленными электронными блоками экспериментального варианта мобильного высокочувствительного монитора радона в воздухе на основе импульсной ионной ионизационной камеры высокого давления (ИКВД). Собран тестовый вариант монитора. В процессе отладки и проверки рабочих характеристик была предложена и изготовлена новая схема малошумящего зарядо-чувствительного предусилителя для ИКВД. Разработан и реализован новый программный алгоритм обработки оцифрованных импульсов от α-частиц. При регистрации α-частиц от распада Rn-222 в образце воздуха, находящегося в ИКВД при давлении 620 мм рт.ст., по линии 5.49 МэВ достигнуто уникальное для данного типа детекторов разрешение 1.9%. Завершается подготовка условий для тестирования монитора при давлении сжатого воздуха до 3 атм.

## 5.5 Изучение вариаций потока тепловых нейтронов природного происхождения в подземной лаборатории с помощью детекторов на основе тонкого сцинтиллятора из ZnS(Ag) с добавками 6LiF.

На первом этапе измерений набрана статистика за ~9500 часов. Обнаружена гармоника в темпе счета всех четырех детекторов с периодом ~360дней (годовая волна). Амплитуда годовой волны темпа счетов детекторов составляет не менее 7% от среднегодового темпа счета. Ранее выявленная возможная лунно-месячная гармоника в темпе счета детекторов не подтверждена. Вероятно её амплитуда существенно меньше изменений связанных с изменением «климатических» факторов в лаборатории. Для определения влияния «климатических» факторов создана и введена в эксплуатацию «метеостанция» на сонове рекордера и трех датчиков: атмосферного давления, влажности и температуры воздуха. Метеостанция установлена рядом с детекторами. Начат второй этап измерений потока тепловых нейтронов с одновременной записью метеорологических условий в лаборатории.

## 5.6 Участие в международном эксперименте AMORE по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа 100Mo.

В рамках коллабрации продолжались измерения радиационной чистоты различный образцов сырья для производства кристаллов $CaMoO_4$, полученных с применением различных технологий. В том числе формиат кальция, карбонат кальция, кристалл молибдата кальция (два образца), молибдат кальция порошкообразный. Продолжается отладка технологии производства сверхнизкофоновых кристаллов $CaMoO_4$. По результатам измерений сделан доклад на международной конференции International workshop on Radiopure scintillators RPSCINT-2013.

## 5.7 Экспериментальная проверка стабильности периода полураспада альфа-активного ядра 214Po.

Установки были существенно модернизированы с целью повышения их чувствительности. В ТАУ1 однокристальный гамма-детектор Д2 был заменён на двух-кристальный, (аналогичный гамма-детектору Д2 в установке ТАУ2). Диски из пластического сцинтиллятора в альфа-детекторе Д1 были заменены на два поверхностно-барьерных кремниевых ППД с диаметром чувствительной области d=25 мм. В предварительных измерениях было выяснено, что размещение активного пятна источника радия на поверхности входного окна ППД по описанной выше технологии приводит к безвозвратной потере рабочих характеристик детектора в течение ~0.5 года. Поэтому для стабилизации характеристик ППД источник радия был изготовлен в виде отдельного герметичного пакета из двух лавсановых дисков толщиной по 2.5 мкм с активным пятном, нанесённым на внутреннюю поверхность одного диска. Далее источник устанавливался между ППД и герметизировался по окружности. Поскольку и в установке ТАУ2 наблюдалась деградация сцинтилляционных характеристик пластического сцинтиллятора в детекторе Д1, он был переделан под новый пакетированный источник аналогичным образом. Как показали последующие измерения, деградация детектирующих свойств детектора Д1 в обеих установках прекратилась. Измерения продолжаются. По результатам предыдущих измерений опубликована статья в зарубежном реферируемом журнале.

## 5.8 Исследование содержания изотопа 14C в жидких органических сцинтилляторах.

Собрана низкофоновая установка на основе сцинтилляционного детектора с рабочим веществом из органического сцинтиллятора полученного из первого исследуемого образца. Сцинтилляционный детектор окружён пассивной защитой из 15см меди и 5 см свинца. Установка расположена в низкофоновом боксе НЛГЗ. Начаты измерения.

# Заключение

По теме Физики космических лучей и нейтринной астрофизики получены результаты мирового уровня, являющиеся принципиально новыми, либо существенно обобщающие и дополняющие имевшиеся ранее работы. Полученные результаты уже цитируются и используются в ряде недавних публикаций других исследователей.

Впервые рассмотрены корреляции поперечных размеров гамма-семейств с поперечным импульсом в адронных взаимодействиях при $10^{16}$ эВ. Показано, что модели пакета CORSIKA не объясняют экспериментальные результаты. Показано, что модель адрон-ядерных взаимодействий должна обладать следующими свойствами вторичных частиц при $\sqrt{s} \approx 1 - 20$ ТэВ:

а) средний поперечный импульс $\langle p_t \rangle \sim 0.45 - 0.50$ ГэВ/с ($x_{Lab}$-взвешенное значение ~ $0.55 - 0.60$ ГэВ/с) при $x_{Lab} \approx 0.05 - 0.30$ и $\sqrt{s} \approx 5$ ТэВ;

б) имеет место компланарная генерация частиц при $\sqrt{s} \gtrsim 6$ ТэВ.

Начата разработка программы FANSY 2.0 моделирования взаимодействий адронов при $E_0 = 10^{11} - 10^{20}$ эВ.

Разработаны аналитические методы для вычисления спектров протонов и ядер сверхвысоких энергий, распространяющихся в пространстве, заполненном фоновыми излучениями: реликтовыми фотонами γ_CMB и внегалактическим фоновым излучением ВФИ (EBL), включающем ультрафиолетовое, оптическое и инфракрасное излучения. Взаимодействия с этими фоновыми излучениями оставляют след на энергетических спектрах частиц сверхвысоких энергий. По этим особенностям в спектрах можно судить о природе первичных частиц и их происхождении. Особое внимание было уделено тем особенностям в спектре, по которым можно судить, являются ли первичные частицы протонами или ядрами.

Выполнены расчеты спектров КЛСВЭ в различных теоретических моделях происхождения и проведено сравнение теоретических спектров с экспериментальными данными различных установок, регистрирующих КЛСВЭ.

Показано:

энергетический спектр остается мощным инструментом для определения происхождения космических лучей сверхвысоких энергий;

электрон-позитронный дип ясно виден в экспериментальных данных четырех экспериментов (Якутск, AGASA, HiRes и Telescope Array). В экспериментах HiRes и TA зарегистрировано ГЗК обрезание;

в данных PAO присутствует дип, но зарегистрированный обрыв в спектре при сверхвысоких энергиях не является ГЗК обрезанием;

главной нерешенной проблемой при выборе модели происхождения КЛСВЭ является определение химического состава КЛСВЭ.

По теме "Физика космических лучей и нейтринной астрофизики " развиты новые оригинальные методы исследования и получен ряд новых результатов. В рамках различных теоретических подходов изучена внутренняя структур черных дыр. В частности, применялись метод тонких самогравитирующих оболочек и метод учёта обратной реакции аккрецируемого вещества на метрику черных дыр. Впервые были найдены квантовые уровни электрона под горизонтом Коши заряженной черной дыры. Данный результат может оказаться важным для эффекта квантового испарения заряженных черных дыр. Исследованы квазипериодические орбиты вблизи вращающейся черной дыры, и найден параметр вращения в метрике Керра. Таким путем из известных данных наблюдений квазипериодических осцилляций излучения черной дыры в центре Галактики найдена величина параметра вращения сверхмассивной черной дыры в центре Галактики. Исследованы различные аспекты образования и эволюции мелкомасштабных сгустков темной материи. Изучено усиление аннигиляционного сигнала частиц темной материи за счет их кластеризации в сгустки с большой плотностью.

Проведена большая работа на ближнем детекторе НОВА. Продолжается набор и анализ данных об эксклюзивном процессе квазиупругого рассеяния нейтрино на ядрах углерода в эксперименте МИНЕРВА, в котором впервые была продемонстрирована возможность передачи информации с помощью пучка нейтрино. Проведены расчеты сечений квазиупругого рассеяния (анти)нейтрино на ядрах хлора, аргона и кальция в рамках релятивистской модели искаженных волн в импульсном приближении.

По теме «Участие в глобальных проектах фундаментальной физики» получены результаты мирового уровня, являющиеся принципиально новыми, либо существенно обобщающие и дополняющие имевшиеся ранее работы. Полученные результаты уже цитируются и используются в ряде недавних публикаций других исследователей.

Была исследована динамическая связь между топологией магнитного поля, гелиосферой и магнитосферой вращения Солнца и продолжено сопоставление результатов изучения топологии магнитного поля с геофизическими явлениями.

Разработана концепция низкофонового газового детектора с низким (менее 1 кэВ) порогом для регистрации антинейтрино от реакторов по рассеянию на электронах и по когерентному рассеянию на ядрах. На стендовой установке отработана дискриминация по форме импульса шумов и электромагнитных наводок. Рассмотрены вопросы фона от нейтронов, генерированных мюонами космических лучей. Предложена схема

экспериментальной установки. Материал изложен в статьях [21,22], где также можно найти ссылки на соответствующую литературу.

В рамках международной Европейской коллаборацией Герда получены важнейшие результаты по поиску двойного безнейтринного бета распада $^{76}$Ge.

По теме " Разработка сцинтиллятора с низким содержанием изотопа 14С для регистрации нейтрино низких энергий” выполнен важный этап, связанный с созданием низкофонового сцинтилляционного модуля для проведения систематических измерений ультранизких концентраций изотопа С-14 в образцах жидкого органического сцинтиллятора. Проведена калибровка энергетической шкалы и начаты фоновые измерения. По созданному низкофоновому сцинтилляционному модулю и его характеристикам готовится публикация.

Продолжается разработка методов мониторинга нейтронного потока для решения задач ядерной и термоядерной физики, геохронологии.

По теме «Исследование анизотропии и вариаций космических лучей $10^{11}$ – $10^{20}$ эВ» получены новые результаты:

1. Экспериментально обнаружено локальное подавление во время гроз возмущений глобального геомагнитного поля.
2. Стабилизация магнитных пульсаций протекает в режиме медленного пробоя стратосферы убегающими электронами в припороговом режиме.
3. Зарегистрирован факт взаимного влияния возмущений геомагнитного поля и приземной напряжённости электростатического поля.
4. Наблюдается магнитное поле, вызванное током ионов образуемых при медленном пробое на убегающих электронах.

По вариационной программе были получены следующие новые данные:

- О потоках тепловых нейтронов во время Форбуш-понижений интенсивности космических лучей, путем измерений с помощью глобальной сети эн-детекторов, как над земной поверхностью, так и под ней. Показано хорошее согласие с данными нейтронных мониторов и продемонстрирована принципиальная возможность использования эн-детекторов под различными поглотителями для спектрометрии частиц вовлеченных в Форбуш эффект.
- По измерению нейтронных потоков во время гроз с целью проверки сообщений о возможной генерации нейтронов молниями. Был получен отрицательный результат: ни в одной из гроз в Москве за 2011-2013 гг. не было зафиксировано превышения потока тепловых нейтронов над фоновым потоком.

Впервые в мировой практике, с помощью двух уникальных методик получены совместные гибридные данные по Широким Атмосферным Ливням (ШАЛ) на рекордной высоте 4300 м над уровнем моря.

За 2012 - 2013 гг. на установке ProtoPRISMA, благодаря обеспечению её непрерывной работы, был накоплен большой объем информации по спектру мощностей ШАЛ, как по числу частиц, так и по числу нейтронов.

В конце 2013 г. на БНО создана новая нейтронная вариационная установка из 4-х эн-детекторов, находящимися под разными поглотителями – Нейтрон-БНО. Основная цель установки – изучение Форбуш-эффекта, поведение нейтронного потока во время гроз и прочих спорадических вариаций. С 6.12.13 пошел непрерывный набор информации с этой установки.

В течение 2013 года на установках комплекса БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации всем физическим задачам и проводился мониторинг потоков частиц космического излучения. Проводилась работы по модернизации существующих установок и разработке проектов новых установок. Проводились обработка и анализ экспериментальных данных, полученных на установках. По измеренному на БПСТ интегральному спектру кратностей групп мюонов сделан вывод об утяжелении состава ПКИ в области после излома. Продолжается набор информации по программе регистрации нейтринных всплесков, получено новое ограничение на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике. Продолжена работа по программе регистрации атмосферных нейтрино, в том числе проведен поиск сигнала от аннигиляции частиц темной материи в центре Солнца и получены новые ограничения на величину сечения различных типов взаимодействий реликтовых частиц темной материи с нуклонами. Проведён поиск мюонных нейтрино, совпадающих по времени и направлению с космическими гамма-всплесками. Получены новые пределы на поток мюонных нейтрино от КГВ, в области энергий до 10 ГэВ полученные пределы в настоящее время являются наиболее сильными. По экспериментальным данным комплекса установок проводилось изучение взаимосвязей динамических процессов в атмосфере Земли и вариаций интенсивности вторичной компоненты космических лучей. Сотрудники лаборатории ПСТ принимают участие в международном эксперименте EMMA, в 2013 году проводились работы созданию и настройке системы регистрации эксперимента и настройке детекторов SC-16.

В международном эксперименте GERDA по поиску безнейтринной моды двойного бета-распада изотопа 76Ge завершена первая фаза эксперимента. Получен наивысший предел на безнейтринную моду двойного бета распада изотопа Ge-76 на уровне $2{,}1*10^{25}$ лет. С учетом результатов предыдущих экспериментов, получен предел на уровне $3{,}0*10^{25}$ лет, что соответствует ограничению сверху на массу «Майорановского» нейтрино на уровне 0,2÷0,4эВ в зависимости от методов вычисления матричных элементов ядра.

В течение года было выполнено измерение радиационной чистоты семи образцов различных материалов:

- обрезанный и отполированный образец кристалла молибдата кальция (були)
- молибдат кальция порошкообразный, образец №1
- вольфрамовые кубики для низкофоновой защиты (для ГГНТ)
- молибдат кальция порошкообразный, образец №2
- карбонат кальция, сырье для выращивания кристаллов молибдата кальция
- молибдат кальция кристаллический, кристалл не обрезанный (буля)
- формиат кальция, сырье для выращивания кристаллов молибдата кальция.

Для всех образцов получены активности радиоактивных примесей K-40, Tl-208 (ряд Th-232), Bi-214 (ряд u-238), Ac-228 (ряд Th-232).

В новом этапе эксперимента по поиску 2К-захвата в 78Kr и 124Xe разработана простая и дешёвая процедура очистки ксенона от следового количества криптона. По результатам обработки информации, накопленной за 1130час. установлен предел на период полураспада $^{124}$Xe относительно 2К-захвата: $T_{1/2}(2K,2\nu) \geq 3.9\cdot10^{20}$ лет (90% у.д.).

Завершена комплектация промышленными электронными блоками экспериментального варианта мобильного высокочувствительного монитора радона в воздухе на основе импульсной ионной ионизационной камеры высокого давления (ИКВД). Собран тестовый вариант монитора. При регистрации α-частиц от распада Rn-222 в образце воздуха, находящегося в ИКВД при давлении 620 мм рт.ст., по линии 5.49 МэВ достигнуто уникальное для данного типа детекторов разрешение 1.9%.

При изучении вариаций потока тепловых нейтронов природного происхождения в подземной лаборатории с помощью детекторов на основе тонкого сцинтиллятора из ZnS(Ag) с добавками 6LiF набрана статистика за ~9500 часов. Обнаружена гармоника в темпе счета всех четырех детекторов с периодом ~360дней (годовая волна). Амплитуда годовой волны темпа счетов детекторов составляет не менее 7% от среднегодового темпа счета.

В международном эксперименте AMORE по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа 100Mo продолжались измерения радиационной чистоты различный образцов сырья для производства кристаллов $CaMoO_4$, полученных с применением различных технологий.

Для исследования содержания изотопа 14C в жидких органических сцинтилляторах собрана низкофоновая установка на основе сцинтилляционного детектора с рабочим веществом из органического сцинтиллятора полученного из первого исследуемого образца. Сцинтилляционный детектор окружён пассивной защитой из 15см меди и 5 см свинца. Установка расположена в низкофоновом боксе НЛГЗ. Начаты измерения.

# 6 Публикации

## 6.1 Публикации к разделу 2.1


1 Kempa J., Mukhamedshin R., Tamada M. On pt(xL) dependence in h-A interactions and lateral features of most energetic particles in EAS cores. J. Phys.: Conf. Ser. 409 (2013) 012109; DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012109

2 Managadze A. and Mukhamedshin R. What can we know on hadron superhigh-energy interaction fragmentation range by XREC data? J. Phys.: Conf. Ser. 409 (2013) 012079; DOI:10.1088/1742-6596/409/1/012079

3 A.S. Borisov, Z.M.Guseva, V.G. Denisova, E.A. Kanevskaya, M.G. Kogan, V.M.Maximenko, A.E. Morozov, R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.E. Pyatovsky, M.D. Smirnova / Revised data on γ-families observed in X-ray emulsion chambers of the Experiment PAMIR / EPJ Web of Conferences 52, 04007 (2013) DOI: 10.1051/ epjconf/201 35204007

4 А.К. Манагадзе, Р.А. Мухамедшин / Характеристики фрагментационной области h-A взаимодействий при сверхвысоких энергиях по данным РЭК //. (доклад на ECRS 2012, Москва, 2-7.07.2012) Изв. РАН, сер. физ. (в печати).

5 A.K. Managadze and R.A. Mukhamedshin / Characteris-tics of fragmentation region in h-A interactions at superhigh energy by XREC data. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2013, Vol. 77, No. 11, pp. 1315–1318.

6 A.S. Borisov, V.I. Galkin, M.I. Ilolov, R.A. Mukhamedshin, H.H. Muminov, V.S. Puchkov, O. Saavedra. Modern status of the PAMIR-XXI Project. Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro (2013) (to be published)

7 A.S. Borisov, A.P. Chubenko, V.G. Denisova, V.I. Galkin, Z.M. Guseva, E.A. Kanevskaya, M.G. Kogan, V.M. Maximenko, A.E. Morozov, R.A. Mukhamedshin, S.I. Nazarov, V.S. Puchkov, S.E. Pyatovsky, M.D. Smirnova, A.V. Vargasov. On nature of long-flying component in cosmic rays according to X-ray emulsion chamber data of the Pamir experiment. Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro (2013) (to be published)

8 S.I. Grigorieva 2013. - Journal of Physics: Conference Series. - V. 409. - P. 012102.

9 R. Aloisio, V.S. Berezinsky, S.I. Grigorieva 2013. - Astropart. Phys. - V. 41. - P. 73.

10 R. Aloisio, V.S. Berezinsky, S.I. Grigorieva2013. - Astropart. Phys. - V. 41. - P. 94.

11 В.А. Березин и В.И. Докучаев / Глобальная геометрия пространства-времени с заряженной оболочкой // Препринт ИЯИ РАН № 1343/2013, 69 стр., Москва, 2013.

12 V.I. Dokuchaev / Mass inflation inside black holes revisited // электронный препринт arXiv:1309.0224 [gr-qc].

13 Е.О. Бабичев, В.И. Докучаев, Ю.Н. Ерошенко / Чёрные дыры в присутствии тёмной энергии // Успехи физических наук 183 1257–1280 (2013).

14 Е.О. Бабичева, В.И. Докучаев, Ю.Н. Ерошенко / Аккреция тёмной энергии на чёрные дыры // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, выпуск 2(31), стр. 223-227 (2013).

15 В.И. Докучаев, Ю.Н. Ерошенко / Стационарные решения уравнения Дирака в гравитационном поле заряженной черной дыры // ЖЭТФ, том 144, вып. 1(7), стр.85-91 (2013).

16 V. Dokuchaev / Spin of the nearest supermassive black hole // электронный препринт arXiv:1306.2033 [astro-ph.HE].

17 V.S. Berezinsky, V.I. Dokuchaev, Yu.N. Eroshenko / Formation and internal structure of superdense dark matter clumps and ultracompact minihaloes // JCAP 11, 059 (2013).

18 V. Berezinsky, V. Dokuchaev and Yu. Eroshenko / Dark matter annihilation in the Galaxy // J. Phys.: Conf. Ser. 409 012117 (2013)

19 В.С. Березинский, В.И. Докучаев, Ю.Н. Ерошенко / Формирование сверхплотных сгустков темной материи // Ядерная физика и инжиниринг, том 4, N 9-10, с. 922–925 (2013).

20 A.V. Butkevich/ Quasi-elastic neutrino charget current scattering jff medium-heavy nuclei:40Ca and 40Ar // Phys.Rev. C85 065501 (2012)

21 А.В. Копылов, И.В. Орехов, В.В. Петухов, А.Е.Соломатин / «Газовый детектор ионизирующего излучения для регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах» // Письма в Журнал Технической Физики, 2014, т.40, вып.5, сс.1 – 7

22 A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov, A.E.Solomatin / "Gaseous Detector of Ionizing Eradiation in Seach for Coherent Neutrino-Nucleus Scattering" // arXiv:1311.6564[physics.ins-det]

23 A.V.Kopylov, V.V.Petukhov / “The mixing in the solar core and the neutrino fluxes” // Препринт ИЯИ РАН 1357/2013, 2013 г.

24 N.I. Loginov, A.S.Mikheyev, V.A. Morozov, I.I. Zasorin, A.E. Solomatin, I.R. Kirillov, K.I. Tkachenko,V.I. Engelko / “Results of corrosion test of EUROFER 97 in lead-lithium alloy” // Proc. 11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology» (ISFNT-11), Barcelona, Spain, 16-20 September 2013

25 N.I.Loginov, A.S.Mikheyev, V.A.Morozov, I.I.Zasorin, A.E.Solomatin / “Some results of the experiments with lead-lithium alloys” // Труды IV международной конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ–2013), г. Обнинск, 23–27 сентября 2013 г.

26 Соломатин А.Е., Засорин И.И., Логинов Н.И, Михеев А.С., Морозов В.А., Арнольдов М.Н. / “Сплав свинец-литий – теплоноситель и тритий воспроизводящее вещество термоядерных установок» // Труды Всероссийской конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (Теплофизика – 2013), г. Обнинск, 29.10-1.11.2013 г.

27 I. Barabanov, L. Bezrukov, V. Gurentsov, E. Janovich, GERDAcol, “Resultson Neutrinoless Double-beta Decay of 76Ge from Phase I of the GERDA Experiment” PHYSICAL REVIEW LETTERS, 111, p.122501 (2013)

28 I. Barabanov, L. Bezrukov, V. Gurentsov, E. Janovich, GERDA Collaboration “The GERDA experiment for the search of 0νββdecay in 76Ge” Eur. Phys. J. C (2013), 73, 2330

29 I. Barabanov, L. Bezrukov, V. Gurentsov, E. Janovich, GERDA collaboration “Measurement of the half-life of the two-neutrino double beta decay of 76Ge with the GERDA experiment” J. Phys. G: Nucl. Part. . 40 (2013) 035110 ,

30 GERDA collaboration “Pulse shape discrimination for GERDA Phase I data” Eur. Phys. J. C (2013), 74, 2583 ,

31 GERDA Collaboration, The background in the neutrinoless double beta decay experiment GERDA, Eur. Phys. J. C (to be published)

32 GERDA Collaboration. NATURE Neutrino physics: Vol 487 Issue 7406 “Limit on neutrinoless double beta decay of $^{76}$Ge by the GERDA experiment” TAUP 2013, 9-13 September 2013

33 GERDA Collaboration “Ge detectors for GERDA Phase I and Phase II and The first GERDA results” The International Workshop on Non-Accelerator New Physics (NANPino-2013), June 24-29, 2013.

34 GERDA Collaboration “Status of the GERDA experiment” XVth Neutrino Telescopes Workshop ,Venice, Italy, March 12-15, 2013

35 GERDA Collaboration “GERDA: Recent Results and Future Plans” International Conference on Astro-Particle Physics, Roma, Italy, 22-24 May 2013

36 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев. «Измерение температуры термоядерной плазмы газовым пропорциональным детектором с использованием эффекта Брегга» Препринт ИЯИ РАН, 1368/2013, 2013.

37 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский «Геохронология и мониторинг космических лучей по накоплению космогенных изотопов 53Mn, и 10Be в земных породах» Препринт ИЯИ РАН, 1376/2013, 2013.

38 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский, «Измерение методом нейтронного активационного анализа накопления космогенного изотопа $^{53}$Mn в образцах земного грунта с целью реконструкции ретроспективной динамики космических лучей, а также периодов

оледенений, водных погружений, вулканических извержений и изменений климата», предложение в программу перспективных исследований на ММФ» статья в сборнике «Программа перспективных исследований на ММФ» ИЯИ РАН, 2013.

39 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, «Разработка радиохимических методов контроля интенсивных нейтронных потоков, пространственного распределения нейтронных полей и термометрии термоядерной плазмы», статья в сборнике «Программа перспективных исследований на ММФ» ИЯИ РАН, 2013.

40 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский, «Реконструкция ретроспективной динамики криосферы и изменений климата с помощью анализа накопления космогенных изотопов», предложение по формированию тематики исследований и разработок по областям государственной программы "Развитие науки и технологий" на 2013 – 2020 годы Минобрнауки, 2013. https://reestr.extech.ru/experty/tematika/tematika_list.php

41 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, «Разработка радиохимического газового монитора нейтронного потока и детектора пространственного распределения плотности потока быстрых нейтронов в ядерном реакторе», предложение по формированию тематики исследований и разработок по областям государственной программы "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы Минобрнауки, 2013. https://reestr.extech.ru/experty/tematika/tematika_list.php

42 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, «Разработка метода термометрии термоядерной плазмы пропорциональным детектором с использованием эффекта Брега», предложение по формированию тематики исследований и разработок по областям государственной программы "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы Минобрнауки, 2013. https://reestr.extech.ru/experty/tematika/ tematika_list.php

## 6.2 Публикации к разделу 2.2

1 N. S. Khaerdinov and A. S. Lidvansky, Variations of cosmic ray muon flux during thunderstorms, *J. Phys.: Conf. Ser*, 2013, vol. 409, 012230 doi: 10.1088/1742-6596/409/1/012230

2 A. S. Lidvansky, On the burst activity of the Crab Nebula and pulsar at high and ultra-high energies, Journal of Physics: Conference Series 409 (2013) 012114 doi:10.1088/1742-6596/409/1/012114

3 N S Khaerdinov and A S Lidvansky, Heights of generation of runaway electrons in bright cosmic ray events observed on the ground during thunderstorms, Journal of Physics: Conference Series, vol. 409 (2013) no. 012225. doi:10.1088/1742-6596/409/1/012225

4 Ya. S. Elensky, A. V. Lapa and A. S. Lidvansky, Simulation of Positron Flux in Cascades of Runaway Electrons Generated by Cosmic Rays in Thunderstorm Atmosphere, 2013, J. Phys.: Conf. Ser., vol. 409, no. 012227. doi:10.1088/1742-6596/409/1/012227.

5 А. С. Лидванский, Н. С. Хаердинов, Коррелированные изменения разных компонент космических лучей во время гроз и сопутствующие эффекты, Известия РАН, сер. физ., 2013, т. 77, № 5, стр. 649-651.

6 К.Х. Канониди, А.С. Лидванский, М.Н. Хаердинов, Н.С. Хаердинов, Корреляции вторичных частиц космических лучей с вариациями геомагнитного поля во время гроз, Материалы Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», Борок, 28 октября-1 ноября 2013 г, стр. 64-65.

7 А.С. Лидванский, М.Н. Хаердинов, Н.С. Хаердинов, Комплексное исследования медленно текущего пробоя стратосферы в Баксанской нейтринной обсерватории, Материалы Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», Борок, 28 октября-1 ноября 2013 г, стр. 66-67.

8 А.С. Лидванский, М.Н. Хаердинов, Н.С. Хаердинов, Средние характеристики приземного электрического поля во время гроз по исследованию вариаций вторичных частиц космических лучей, Материалы Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», Борок, 28 октября-1 ноября 2013 г, стр. 68-69.

9 А.С. Лидванский, О вспышечной активности Крабовидной туманности зарегистрированной установками для изучения ШАЛ, Известия РАН, сер. физ., 2013, т. 77, № 11, стр. 1617-1619.

10 Ю.В. Стенькин. КАК РЕШИТЬ ПРОБЛЕМУ ИЗЛОМА В СПЕКТРЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ? Известия РАН. Серия физическая, (2013), том 77, № 5, с. 701–703.

11 Д.М. Громушкин, В. В. Алексеенко, А.А. Петрухин, О.Б. Щеголев, Ю.В. Стенькин, В.И. Степанов, В.И. Волченко, И.И. Яшин. УСТАНОВКА НОВОГО ТИПА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ШАЛ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. Известия РАН, сер. Физическая. Т. 77, No. 5, (2013), pp. 704–706.

12 Yu.V. Stenkin, V.V. Alekseenko, D.M. Gromushkin, Y. Liu, X.H. Ma, J. Zhao. Thermal neutron flux produced by EAS at various altitudes. Chinese Physics C, v. 37, No 1, (2013), p. 015001.

13 V Alekseenko, D Dzhappuev, A Kudzhaev, O Michailova, Y Stenkin, V Stepanov, A Tsyabuk and V Volchenko. Sidereal anisotropy of cosmic rays at 10-100TeV energy range. Journal of Physics: Conference Series 409 (2013) 012051

14 Д.Д. Джаппуев, А.У. Куджаев, А.С. Лидванский, В.Б. Петков, Ю.В. Стенькин. Изучение адронной компоненты ШАЛ на установке Ковер-2, ЖЭТФ, т. 97, (2013), с. 651-653.

15 D.M. Gromushkin, V.V. Alekseenko, A.A. Petrukhin, O.B. Shchegolev, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, V.I. Volchenko and I.I. Yashin. The ProtoPRISMA array for EAS study: first results. Journal of Physics: Conference Series 409 (2013) 012044.

16 D.D. Dzhappuev, V.I. Volchenko, A.U. Kudzhaev, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, Yu.V. Stenkin and A.L. Tsyabuk. Measurements of the thermal neutrons flux near the EAS core. Journal of Physics: Conference Series 409 (2013) 012034.

17 V. Alekseenko, .F Arneodo, G. Bruno, W. Fulgione, D. Gromushkin, O. Shchegolev, Yu. Stenkin, V. Stepanov , V. Sulakov. Registration of Forbush decrease 2012/03/08 with a global net of the thermal neutron scintillation en-detectors. Journal of Physics:Conference Series 409 (2013) 012190.

18 Yu V Stenkin. How to solve the cosmic ray knee problem? Journal of Physics: Conference Series 409 (2013) 012080.

19 Yu.V. Stenkin, D.M. Gromushkin, A.A. Petrukhin, O.B. Shchegolev, V.I. Stepanov, V.I. Volchenko, I.I. Yashin and E.A. Zadeba. EAS thermal neutron lateral and temporal distributions. 33 ICRC, Rio de Janeiro 2013, ID 482.

20 XXinhua Ma and Yuri Stenkin, for the ARGO-YBJ collaboration and the PRISMA collaboration. Coincident air shower events between ARGO-YBJ and PRISMA-YBJ. 33 ICRC,Rio de Janeiro 2013, ID 606.

21 Xinhua Ma and Yuri Stenkin, for the ARGO-YBJ collaboration and the PRISMA collaboration. Coincident air shower events between ARGO-YBJ and PRISMA-YBJ. 33 ICRC, Rio de Janeiro 2013, ID 606.

22 V. Alekseenko, F. Arneodo, G. Bruno, W. Fulgione, D. Gromushkin, O. Shchegolev, Yu. Stenkin, V. Stepanov, V. Sulakov, V. Volchenko and I. Yashin. Sporadic variations of thermal neutron background measured by a global net of the en-detectors. 33 ICRC, Rio de Janeiro 2013, ID 568.

## 6.3 Публикации к разделу 2.3

1 Д.Д. Джаппуев, А.У. Куджаев, А.С. Лидванский, В.Б. Петков, Ю.В. Стенькин, "Изучение адронной компоненты ШАЛ на установке Ковёр-2", Письма в ЖЭТФ, т. 97, вып. 10, с. 651 – 653, 2013.

2 М.Г. Костюк, В.Б. Петков, Р.В. Новосельцева, М.М. Болиев, М.Д. Беркова, Ю.Ф. Новосельцев, Л.В. Волкова, В.Г. Янке, "Температурные эффекты в потоках мюонов высокой энергии и проблема восстановления температурного профиля атмосферы", Известия РАН, серия физическая, т. 77, № 5, с. 636–638, 2013.

3 D.D. Dzhappuev, V.I. Volchenko, A.U. Kudzhaev, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, Yu.V. Stenkin and A.L. Tsyabuk. "Measurements of the thermal neutrons flux near the EAS core", Journal of Physics: Conference Series, 409, 012034, 2013.

4 M.G. Kostyuk, V.B. Petkov, R.V. Novoseltseva, M.M. Boliev, M.D. Berkova, Yu.F. Novoseltsev, L.V. Volkova, V.G. Yanke. "Variations of the high energy muon flux and space-time structure of the temperature profile in the atmosphere", Journal of Physics: Conference Series, 409, 012231, 2013.

5 P. Kuusiniemi, L. Bezrukov, T. Enqvist, H. Fynbo, L. Inzhechik, J. Joutsenvaara, T. Kalliokoski, K. Loo, B. Lubsandorzhiev, T. Monto, V. Petkov, T. Raiha, J. Sarkamo, M. Slupecki, W.H. Trzaska and A. Virkajarvi. "Underground cosmic-ray experiment EMMA", Journal of Physics: Conference Series, 409, 012067, 2013.

6 J. Sarkamo, L. Bezrukov, T. Enqvist, H. Fynbo, L. Inzhechik, J. Joutsenvaara, T. Kalliokoski, P. Kuusiniemi, K. Loo, B. Lubsandorzhiev, T. Monto, V. Petkov, T. Raiha, M. Slupecki, W.H. Trzaska, A. Virkajarvi. "EAS selection in the EMMA underground array", Journal of Physics: Conference Series, 409, 012086, 2013.

7 I. Alikhanov, “Do leptoquarks manifest themselves in ultra-high energy neutrino interactions?”, Journal of High Energy Physics, 07, 093, 2013.

8 I. Alikhanov, Neutrino photoproduction on pseudo Nambu–Goldstone bosons, Phys. Lett. B 726, 670, 2013.

9 А.Н. Гапоненко, В.Б. Петков, В.Ю. Гришкан, И.М. Дзапарова, В.И. Волченко, А.Ф. Янин, А.Н. Куреня, Е.А. Горбачева, "Поиск ультракоротких всплесков интенсивности космических лучей на ливневой установке «Андырчи»", Известия РАН, серия физическая, т. 77, № 11, с. 1597-1599, 2013.

10 V.B. Petkov, J.Szabelski, A.N. Gaponenko, and I. Alikhanov. "Multiplicity spectrum of muon bundles and primary CR composition in the range 1 - 10000 TeV", EPJ Web of Conferences, 52, 09009 (2013).

11 M.M. Boliev, S.V. Demidov, S.P. Mikheyev and O.V. Suvorova, “Search for muon signal from dark matter annihilations in the Sun with the Baksan Underground Scintillator Telescope for 24.12 years”, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 09, 019, 2013.

12 О. В. Суворова, М. М. Болиев, С. В. Демидов, С. П. Михеев, “Ограничения на сечения упругого рассеяния нейтралино на нуклоне в нейтринном эксперименте на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе”, Ядерная физика, т. 76, № 11, с. 1433-1442.

13 M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, A. N. Gaponenko, M.M. Kochkarov, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, A.F. Yanin, “A Search for Neutrino Bursts at the Baksan Underground Scintillation Telescope”, Proc. 33rd International Cosmic Ray Conference (Rio de Janeiro, July 2-9, 2013), 0621, 2013.

14 A.N. Gaponenko, V.B. Petkov, V.Yu. Grishkan, I.M. Dzaparova, A.F. Yanin, A.N. Kurenya, E.A. Gorbacheva, “Search for very short gamma-ray bursts at the Andyrchy EAS array on millisecond timescale”, Proc. 33rd International Cosmic Ray Conference (Rio de Janeiro, July 2-9, 2013), 0743, 2013.

15 M.M. Boliev, S.V. Demidov, S.P. Mikheyev, O.V. Suvorova, “Search for muon signal from dark matter annihilations in the Sun with the Baksan Underground Scintillator Telescope for 24.12 years”, arXiv:1301.1138v1 [astro-ph.HE], 2013.

16 I. Alikhanov, Do leptoquarks manifest themselves in ultra-high energy neutrino interactions?, arXiv:1305.2905.

17 I. Alikhanov, “CP violation in neutrino-photon scattering”, arXiv: 1303.0779.

18 В.Б. Петков, М.М. Болиев, А.В. Буткевич. Поиск нейтрино от гамма-всплесков на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе. Всероссийская конф. "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра", Москва, ИКИ РАН, 23-26 декабря 2013 г.

## 6.4 Публикации к разделу 2.4

1 M. Agostini, M. Allardt, E. Andreotti et al., “Pulse shape discrimination for GERDA phase I data”, Eur. Phys. J. C (2013) **73**: 2583.

2 M. Agostini, M. Allardt, E. Andreotti et al., “Results on Neutrinoless Double-β Decay of Ge-76 from Phase I of the GERDA Experiment”, Phys. Rev. Lett. 111, 122503 (2013).

3 Ju.M. Gavriljuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, A.A. Smolnikov, S.P. Yakimenko, “Working characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900)”, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A (2013) 729:576.

4 E.N. Alexeyev, V.V. Alexeenko, Ju.M. Gavriljuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, S.P. Yakimenko, " Experimental test of the time stability of the half-life of alpha-decay $^{214}$Po nuclei", Astropart. Phys. (2013) 46:23.

5 Yu. M. Gavrilyuk, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenko, S. S. Ratkevich, "Indications of 2ν2K capture in 78 Kr", Physical Review C (2013) 87:035501.

6 K.-H. Ackermann, M. Agostini, M. Allardt et al., "The Gerda experiment for the search of 0νββ decay in $^{76}$Ge", Eur. Phys. J. C (2013) 73: 2330.

7 A. M. Gangapshev, Yu.M. Gavrilyuk, Dj.A. Zhantudueva, V.V. Kazalov, V.V. Kuz'minov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, K.V. Efendiev, S.P. Yakimenko, "Results of Experiments Devoted to Searches for 2K Capture on Kr-78 and for the Double-Beta Decay of Xe-136 with the Aid of Proportional Counters", Physics of Atomic Nuclei (2013), 76(9):1063-1071.

8 O.A. Busanov, R.A. Etezov, Yu.M. Gavriljuk et al., "Background radioactivity of construction materials, raw substance and ready-made CaMoO4 crystals", International workshop on Radiopure scintillators RPSCINT-2013.

9 Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, M.V. Stepaniuk. "RECENT RESULTS OF SEARCH FOR 2K CAPTURE IN Kr-78". Proceedings of International conference NEW TRENDS IN HIGH-ENERGY PHYSICS (experiment, phenomenology, theory) Alushta, Crimea, Ukraine, 23 – 29 September 2013.

10 В.В.Кузьминов. «ВКЛАД БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЯИ РАН В СИСТЕМУ ФИЗИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ ОБ ОКРУЖАЮЩЕМ МИРЕ». Приглашённый (пленарный) доклад на международном симпозиуме «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», посвящённом 20-летию создания КБНЦ РАН. 28 июня-3 июля 2013 г., г. Нальчик, КБР, Россия. Материалы симпозиума «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», 28 июня-3 июля 2013 г., г. Нальчик, КБР, Россия, стр.50-59.

11 M. Agostini, M. Allardt, E. Andreotti , et al., "The background in the neutrinoless double beta decay experiment GERDA", arXiv:1306.5084 [physics.ins-det].