

Федеральное агентство научных организаций РФ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123

№ госрегистрации 01201050398

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
директор ИЯИ РАН
член-корр. РАН д.т.н.



Л.В.Кравчук

24 января 2017 года

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА, НЕЙТРИННАЯ, ГАММА И
ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВАЯ АСТРОНОМИЯ, ФИЗИКА
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ФИЗИКА И ТЕХНИКА НЕЙТРИННЫХ
ТЕЛЕСКОПОВ В НИЗКОФОНОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ
ЛАБОРАТОРИЯХ
(промежуточный за 2016 год)
0031-2014-0066

Научный руководитель
заместитель директора по научной работе
д.ф.-м.н.

Г.И.Рубцов
19 января 2017 года

Москва 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н.



Г.И.Рубцов (введение, заключение)
19.01.2017

Исполнители темы:



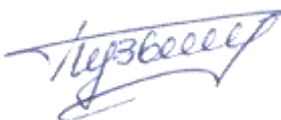
д.ф.-м.н. Домогацкий Г.В. (раздел 1)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Куденко Ю.Г. (раздел 2)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Ряжская О.Г. (раздел 3)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Кузьминов В.В. (раздел 4)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Ткачёв И.И. (раздел 5)
19.01.2017



к.ф.-м.н. Железных И.М. (раздел 6)
19.01.2017

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 163 с., 43 рис., 6 табл.

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 отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2016 год.

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

поиск и исследование редких процессов с участием элементарных частиц на протонных и вторичных (пионных, каонных, мюонных) пучках высокой интенсивности в целях открытия новых явлений, происходящих на сверхмалых расстояниях;

создание новых и развитие существующих методов регистрации частиц и излучений для будущих экспериментов в области физики элементарных частиц;

экспериментальный поиск гравитационного излучения космического происхождения, создание прототипов детекторов гравитационных волн;

в области физики нейтрино и астрофизики:

поиск частиц темной материи в неускорительных и коллайдерных экспериментах;

разработка методов регистрации тёмной материи;

исследование осцилляционных переходов нейтрино в экспериментах с использованием пучков дальних нейтрино от ускорителей (эксперименты T2K, OPERA, NOvA) и реакторов (эксперимент Daya Bay);

прецизионное измерение параметров нейтринных осцилляций, поиск в них эффектов CP-нарушения;

измерение космических потоков нейтрино высоких энергий, обнаружение их источников, сооружение с этой целью глубоководного Байкальского нейтринного телескопа с рабочим объемом до 2 км³;

исследование потоков нейтрино, образованных в распадах тяжёлых ядер и ядерных реакциях, происходящих в недрах Земли, создание с этой целью детектора геонейтрино;

развитие методов нейтринной спектроскопии Солнца, мониторинг потока солнечных нейтрино различных энергий;

исследование формирования нейтринного излучения нейтронных звёзд;

развитие радиоастрономического метода детектирования нейтрино предельно высоких энергий по наблюдениям всплесков когерентного черенковского радиоизлучения;

в области физики космических лучей:

измерение состава и энергетического спектра всех компонентов космического излучения (ядер, электронов, позитронов, фотонов) во всем диапазоне измеряемых энергий;

выяснение природы космических лучей сверхвысоких энергий, обнаружение их источников, исследование механизмов их генерации;

исследования физических процессов ускорения, распространения и излучения заряженных частиц в космической плазме;

поиск и исследование антиматерии в составе космического излучения;

исследование астрофизических источников гамма-квантов высоких энергий, обнаружение новых типов таких источников, исследование механизмов генерации гамма-квантов;

мониторинг галактических и солнечных космических лучей, их состава, временных вариаций;

исследование влияния космических лучей на атмосферные процессы в натурных и лабораторных экспериментах;

геофизические эффекты космических лучей и их влияние на климат.

Из полученных результатов можно выделить:

В апреле 2016 г. на оз. Байкал введён в эксплуатацию в режиме длительного набора данных первый кластер Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD в его проектной конфигурации, содержащий восемь гирлянд оптических модулей общим числом 288 (по 36 оптических модуля в каждой). Кластер Baikal-GVD является нейтринным телескопом мультимегатонного масштаба, который способен вести исследование потока астрофизических нейтрино на уровне чувствительности ~ 0.4 события в год. В ходе эксплуатации установки в течение 2016 г. выполнена калибровка измерительных систем телескопа, осуществляется непрерывный мониторинг фоновых условий среды, непрерывное измерение координат оптических детекторов. По мере накопления и первичного анализа данных формируется банк экспериментальных событий для последующего физического анализа, и в частности, в задаче выделения мюонных

событий от нейтрино астрофизической природы. В течение 2015-2016 г.г. разработаны критерии подавления фона от свечения водной среды, методы восстановления мюонных траекторий и критерии выделения событий от мюонов из-под горизонта. Разработаны программы численного моделирования событий от нейтрино астрофизической природы и событий от фоновых потоков атмосферных мюонов и нейтрино. Все программы адаптированы для использования в единой среде обработки и моделирования BARS.

В работах 2016 года по исследованию физики первичных чёрных дыр было показано, что существуют двухполевые модели инфляции, в которых возможно формирование спектра первичных флуктуаций плотности, приводящего к переизбытку рождения первичных чёрных дыр в радиационную эпоху ранней Вселенной; проведен расчёт ограничений на параметры двухполевых моделей с ловушками, на основе наблюдательных данных по первичным чёрным дырам. В исследовании ядерных эффектов в фотоядерном взаимодействии мюонов сверхвысокой энергии был произведён расчёт ядерного затенения для ряда лёгких ядер.

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов проводился анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску редкого распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu$, т.е. распада положительно каона на мюон и три нейтрино, запрещенного в первом порядке в Стандартной Модели и возможного только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при поиске тяжёлых нейтрино на основе данных E949.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, были проведены новые сеансы по набору статистики и начат анализ данных по поиску тяжёлых нейтрино в распадах каонов на лету.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведён анализ данных, накопленных в 2014-2016 гг. в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования CP-нарушения в лептонном секторе. Кроме того, важным результатом анализа является измерение сечений взаимодействия нейтрино (мюонных и электронных) с различными ядрами, а также поиск стерильных нейтрино.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой в рамках нейтринной платформы ЦЕРН проведена разработка магнитного

нейтринного детектора Baby-MIND, который будет состоять из 33 слоёв (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами. Детектор Baby-MIND будет одним из основных элементов эксперимента WAGASCI для измерения нейтринных сечений в области энергий 1 ГэВ на ядрах мишеней из воды и пластика (углерод и кислород), что, в свою очередь, позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC).

Разработан программный пакет FANSY 2.0 для моделирования взаимодействий адронов в широком интервале энергий ($10^{11} - 10^{20}$ эВ, воспроизводящий данные LHC, основные характеристики взаимодействий протон-протон в широком интервале энергий ($10^{11} - 10^{20}$ эВ) и генерацию основных типов вторичных частиц, оказывающих влияние на развитие ШАЛ, содержащих u,d,s,c кварки (заряженные и нейтральные пионы, каоны, нуклоны и барионы, чармированные частицы, мезонные и барионные резонансы)

Результаты сравнения данных LHC и моделирования компланарности ЭВЧ противоречат первоначальной, предложенной около 15 лет назад, концепции объяснения компланарности большими поперечными импульсами (в плоскости компланарности) ЭВЧ и требуют новой концепции объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности.

Предложена концепция эксперимента на LHC для проверки явления компланарности энергетически выделенных вторичных частиц при сверхвысоких энергиях.

Показано, что измерение диффузионного гамма-излучения при $E \sim 1$ ТэВ является очень мощным методом ограничения доли протонов в спектре космических лучей сверхвысоких энергий. Используя имеющуюся в настоящее время статистику и плохое знание галактического диффузного фона, невозможно исключить чисто протонный или почти чисто протонный состав при $(1 - 40)$ ЕэВ.

В международном эксперименте NOvA с участием сотрудников ИЯИ впервые были получены результаты, которые с достоверность 2.5σ указывают на то, что примеси мюонных и тау нейтрино в третьем массовом состоянии нейтрино не одинаковы. Это означает, что угол смешивания θ_{23} не равен 45 градусам, т. е. смешивание нейтрино не является максимальным.

Анализ результатов по регистрации на дальнем детекторе электронных нейтрино в пучках мюонных нейтрино позволил исключить обратную иерархию масс нейтрино

($m_1 > m_2 > m_3$), угол смешивания $\theta_{23} < 45^\circ$ и значение фазы нарушения СР-инвариантности $\delta = 90^\circ$, на уровне 3σ .

Разработан мультикатодный счётчик, который является эффективным детектором одиночных электронов, эмитируемых из поверхности катода. Результаты проведённых измерений позволили получить предел на константу кинетического смешивания для скрытых фотонов с массой от 5 эВ до 10 кэВ. Измерение температурной зависимости темнового тока позволит прояснить вопрос о наличии криогенной составляющей темновой скорости счёта, которая, как следует из экспериментов, растёт по мере охлаждения детектора от 270-250 К до температуры жидкого гелия. В случае подтверждения, это может стать одним из интересных физических результатов.

Проведены работы по поддержанию установок LVD и АСД в работоспособном состоянии для обеспечения научных программ экспериментов; обработка информации по поиску всех типов нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд на детекторах АСД и LVD; установлен верхний предел на частоту коллапсов в Галактике. Изучен фон, создаваемый мюонами космических лучей и естественной радиоактивностью; изучена генерация нейтронов мюонами к.л. в различных веществах, входящих в состав детекторов и защиты; изучены сезонных вариации мюонов и нейтронов.

На основании изучения экспериментальных данных по вариациям интенсивности частиц, зондирующих грозовую атмосферу, получена количественная оценка разности потенциалов в стратосфере над локально распределённой активной грозовой областью.

Впервые зарегистрированы события непрерывного свечения атмосферы над грозовыми облаками, коррелирующие с аномальными возмущениями вторичных частиц космических лучей, отвечающими условиям электрического пробоя стратосферы в припороговом режиме лавинного размножения убегающих электронов.

Зарегистрировано возмущение геомагнитного поля дрейфовым током электронов, инжектированных в магнитосферу из атмосферы посредством «медленного пробоя стратосферы на убегающих электронах» в припороговом режиме, в процессе грозовой активности и измерены параметры процесса: период обращения электронов вокруг Земли 12 мин, их средняя энергия в магнитосфере 3.6 МэВ.

Зафиксирован факт взаимодействия грозового фронта с высыпанием протонов в атмосферу из радиационного пояса Земли, вследствие сейсмической активности.

С помощью нашей глобальной сети из эн-детекторов в 2016 г. были получены следующие новые данные по изучению вариаций нейтронных фоновых потоков в различных геофизических условиях:

На основе обнаруженного с помощью нашей глобальной сети из эн-детекторов в предыдущем году нового явления - спорадического существенного возрастания нейтронного потока в подземном помещении, связанного с продолжительным падением атмосферного давления, была подготовлена к печати журнальная статья. По данным установки ARGO-YBJ в Тибете обнаружен долговременный тренд роста природного нейтронного фона на уровне около 4% в год за последние 3 года, который связан, по-видимому, с очередным циклом солнечной активности.

По программе изучения Широких атмосферных ливней (ШАЛ): совместно с ЗАО «Люминофор» разработан новый светосостав ЛРБ-2 (сцинтиллятор) на основе натурального бора для регистрации тепловых нейтронов. Полученный светосостав по свойствам не уступает применявшемуся ранее литиевому светосоставу с обогащением по литию-6 до 90%, а по цене в 5 раз ниже. Изготовлена пробная партия этого светосостава и на его основе изготовлены 2 эн-детектора, площадью по 0.36 кв.м. Китайской стороной принято решение о финансировании создания полноценного прототипа из 3-х кластеров по 16 эн-детекторов будущей установки PRISMA-LHAASO в Тибете на высоте 4400 м над уровнем моря. В октябре 2016 г. первый кластер был собран и включен в режим тестового набора данных в Хэбейском нормальном университете. На установках PRISMA-YBJ и PRISMA-32 проводился непрерывный набор и анализ данных, как по изучению ШАЛ, так и вариаций фоновых потоков тепловых нейтронов на двух существенно различных уровнях наблюдения: 4300 м и уровень Москвы. Расчёты показали, что спектр ШАЛ по числу нейтронов в ПэВной области первичных энергий имеет чисто степенной вид с интегральным показателем спектра близким к -1.95 .

Проведена модернизация установки и всего химико-технологического комплекса ГГНТ и выполнены тестовые извлечения. В целях подготовки условий для выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино в 2016 году часть измерений скорости захвата солнечных нейтрино была выполнена на модернизированной установке с двухзонной галлиевой мишенью. Получены предварительные результаты скорости захвата для каждой зоны, которые согласуются в пределах статистических ошибок с измерениями на ГГНТ.

В рамках выполнения НИР по теме «Эксперимент с искусственным источником нейтрино на основе радионуклида ^{51}Cr активностью 3 МКи» с целью повышения чистоты хромовой мишени в 2016 году была проведена экспериментальная проверка основных этапов процесса, включающие получение и механическое измельчение электролитического хрома и последующее компактирование порошка методом ГИП. Полученные результаты показали, что данные методики в основном обеспечивают

необходимые физические и химические характеристики получаемого материала и минимизацию его потерь, однако требуются дополнительные разработки по повышению чистоты хромовых мишеней.

В части работ по разработке методик и изготовлению систем высокоточного измерения активности источника нейтрино выполнена метрологическая поверка средств измерений, входящих в состав калориметрической системы для измерения активности искусственного источника нейтрино. Показано, что в режиме постоянного тепловыделения при мощностях более 100 Вт тепловыделение может быть измерено с точностью лучше 0,2 %, которая относится к числу лучших в мире достигнутых в калориметрических измерениях активностей высокоактивных источников ионизирующего излучения.

В низкофоновой установке в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории проводится поиск аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в M1-переходе ядер ^{83}Kr на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения. По предварительным результатам обработки данных за 2016г. получено ограничение сверху на массу аксиона на уровне 75 эВ (95 %у.д.).

В эксперименте по поиску 2К-захвата ^{124}Xe с использованием большого медного пропорционального счётчика, заполненного ксеноном, содержащим изотоп ^{124}Xe , набрана статистика за ~5500 часов. Искомое эффекта не обнаружено, что даёт предел на период полураспада на уровне $\sim T_{1/2} \geq 7 \cdot 10^{21}$ лет.

В Южной Корее основна коллаборация AMORE, которая проводит эксперимент по поиску безнейтринного двойного бета распада ^{100}Mo . В задачи сотрудников ИЯИ РАН в этой коллаборации входит измерение содержания радиоактивных примесей в сырье для производства кристаллов и готовых образцах, а также в различных конструкционных материалах.

Для исследования вариаций потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900 собрана установка, состоящая из четырёх детекторов тепловых нейтронов. Набрана статистика за ~4.2 года измерений. Сезонная вариация потока тепловых нейтронов составляет не менее 5% от среднегодового значения.

Одним из основных источников фонового излучения во всех низкофоновых экспериментах является изотоп ^{222}Rn , присутствующий в воздухе лабораторных помещений, и его дочерние продукты распада. Для прямого метода контроля содержания радона в воздухе была создана цилиндрическая воздушная импульсная ионная ионизационная камера (ЦВИК) с рабочим объёмом ~3 л, обеспечивающая при давлении

620 мм рт. ст. энергетическое разрешение 1.7 % при регистрации α -частиц с энергией 5.49 МэВ от распада ^{222}Rn . Изготовлены 3 камеры. Разработана схема и конструкция мобильного Rn-монитора с ЦВИК. Завершены комплектация и изготовление трёх приборов. Проводятся испытания и выпускная наладка первого экземпляра.

В исследовании вариации периода полураспада ядра ^{214}Po обнаружены годовая вариация с амплитудой $A=(9.8\pm0.6)\cdot10^{-4}$ и суточные вариации в солнечном, лунном и звёздном времени с амплитудами солнечно-суточная вариация с амплитудой $A_{\text{с}}=(5.3\pm0.3)\cdot10^{-4}$, лунно-суточная вариация с амплитудой $A_{\text{л}}=(6.9\pm2.0)\cdot10^{-4}$ и звёздно-суточная вариация с амплитудой $A_{\text{з}}=(7.2\pm1.2)\cdot10^{-4}$. Показано, что вариации микроклиматических параметров не могут быть причиной вариаций периода полураспада.

В течение 2016 г полностью введена в строй вторая фаза эксперимента Герда. В результате использования анализа формы сигнала детекторов и антисовпадений с сцинтилляционным сигналом от окружающего жидкого аргона индекс фона понижен в 10 раз по сравнению с фазой 1 и достигнут величины 10^{-3} /кэВ.кг.год, что является уникальным достижением. К настоящему моменту на основе экспозиции 10,8 кг.год для периода двойного безнейтринного бета распада изотопа Ge-76 получен верхний предел $T_{1/2}>4\cdot10^{25}$ лет, что является наилучшим мировым достижением.

Создана установка по измерению содержания радиоуглерода ^{14}C в образцах жидкого сцинтиллятора. Проведены первые измерения со сцинтиллятором на основе отечественного ЛАБа. Значение фона в диапазоне 200-300 кэВ составляет 1.5–2 события в час, значение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = (3.3 \pm 1.1)\times10^{-17}$.

Разработан метод измерения собственной радиоактивности сцинтиллятора по коррелированным распадам ^{212}Bi - ^{212}Po от цепочки тория с характерным временем между событиями до 1000 нс и ^{214}Bi - ^{214}Po от цепочки урана во временном окне до 15 мкс. Полученная методика комплексного исследования образцов сцинтиллятора позволяет выбрать растворитель для полномасштабного детектора объёмом 10^4 м³ с пониженным содержанием ^{14}C .

Завершён монтаж гравитационного детектора ОГРАН на пикете ПК-14 - месте постоянной подземной дислокации данной установки. Главным достижением отчётного периода явился монтаж зеркал высокой технологии с рекордной отражательной способностью (резкость 30 тыс.) и малыми потерями. Измерена спектральная плотность шума детектора и проведён тест силовой калибровки, с использованием модельного сигнала, имитирующего гравитационное волновое воздействие. Данные демонстрируют достижение чувствительности близкой к проектной. Введение активной

термостабилизации детектора на уровне сотых долей градуса позволит перейти в режим долговременного мониторинга гравитационного фона.

Совместно с ПРАО ФИАН и ЛАЯ ИЯИ составлен проект использования высокочувствительного радиотелескопа БСА ФИАН в качестве пилотной установки для разработки метода детектирования импульсов радиоизлучения метровых длин волн от каскадов, возникающих при взаимодействии космических лучей (протонов, нейтрино) предельно высоких энергий с веществом лунного реголита. Для выполнения подобной работы будет также использована антенная система широкоугольного радиотелескопа метровых волн, создаваемого в ПРАО ФИАН.

Проведена реконструкция и тестирование электронного блока аналогового тракта для 4-х канальной гидроакустической антенны глубоководного автономного измерительного модуля для измерения коэффициента Грюнайзена.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных исследованиях природных явлений.

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	3
Введение	12
Основные результаты	14
1 Лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий.	14
2 Отдел физики высоких энергий	26
3 Отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики.	36
4 Баксанская нейтринная обсерватория	100
5 Отдел экспериментальной физики	128
6 Лаборатория новых методов детектирования нейтрино	141
Заключение	156

ВВЕДЕНИЕ

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

поиск и исследование редких процессов с участием элементарных частиц на протонных и вторичных (пионных, каонных, мюонных) пучках высокой интенсивности в целях открытия новых явлений, происходящих на сверхмалых расстояниях;

создание новых и развитие существующих методов регистрации частиц и излучений для будущих экспериментов в области физики элементарных частиц;

экспериментальный поиск гравитационного излучения космического происхождения, создание прототипов детекторов гравитационных волн;

в области физики нейтрино и астрофизики:

поиск частиц темной материи в неускорительных и коллайдерных экспериментах;

разработка методов регистрации темной материи;

исследование осцилляционных переходов нейтрино в экспериментах с использованием пучков дальних нейтрино от ускорителей (эксперименты T2K, OPERA, MINOS, NOvA) и реакторов (эксперимент Daya Bay);

прецизионное измерение параметров нейтринных осцилляций, поиск в них эффектов CP-нарушения;

измерение космических потоков нейтрино высоких энергий, обнаружение их источников, сооружение с этой целью глубоководного Байкальского нейтринного телескопа с рабочим объемом до 2 км³;

исследование потоков нейтрино, образованных в распадах тяжёлых ядер и ядерных реакциях, происходящих в недрах Земли, создание с этой целью детектора геонейтрино;

развитие методов нейтринной спектроскопии Солнца, мониторинг потока солнечных нейтрино различных энергий;

исследование формирования нейтринного излучения нейтронных звёзд;

развитие радиоастрономического метода детектирования нейтрино предельно высоких энергий по наблюдениям всплесков когерентного черенковского радиоизлучения;

в области физики космических лучей:

измерение состава и энергетического спектра всех компонентов космического излучения (ядер, электронов, позитронов, фотонов) во всем диапазоне измеряемых энергий;

выяснение природы космических лучей сверхвысоких энергий, обнаружение их источников, исследование механизмов их генерации;

исследования физических процессов ускорения, распространения и излучения заряженных частиц в космической плазме;

поиск и исследование антиматерии в составе космического излучения;

исследование астрофизических источников гамма-квантов высоких энергий, обнаружение новых типов таких источников, исследование механизмов генерации гамма-квантов;

мониторинг галактических и солнечных космических лучей, их состава, временных вариаций;

исследование влияния космических лучей на атмосферные процессы в натурных и лабораторных экспериментах;

геофизические эффекты космических лучей и их влияние на климат.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1 Лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий

Заведующий ЛНАВЭ чл.-корр. РАН Г.В.Домогацкий

Учёный секретарь ЛНАВЭ канд.физ.-мат.наук О.В.Суворова

1.1 Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз.Байкал

1.1 РЕФЕРАТ

В 2016 году основная задача работ по теме состояла в развертывании на оз. Байкал и запуске в режимах тестирования и набора данных полномасштабного варианта кластера гирлянд глубоководных регистрирующих модулей – базового структурного элемента создаваемого нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба NT1000 (Baikal-GVD), проведение на комплексе установок Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (БГНТ) экспериментальных исследований по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких ($E > 10$ ТэВ) энергий, по поиску проявлений массивных частиц - кандидатов на роль холодной тёмной материи.

В период зимней экспедиции 2016 года на оз.Байкал завершён монтаж и запуск в режимах тестирования и набора данных кластера из восьми гирлянд оптических модулей (по 36 ОМ на каждой), представляющего собой базовый структурный элемент создаваемого глубоководного нейтринного телескопа NT1000 (Baikal-GVD) масштаба куб.км. При работе в автономном режиме кластер представляет собой один из трёх крупнейших в мире действующих нейтринных телескопов с чувствительностью, позволяющей вести поиск событий от потока внеатмосферных нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, зарегистрированного впервые в эксперименте на детекторе IceCube. К настоящему времени “живое время” работы установки составило около 200-т суток. В целом, результаты работы кластера в течение 2016 года можно считать вполне удовлетворительными, что позволяет планировать создание и развертывание в 2017 году второго кластера Baikal-GVD из восьми полномасштабных гирлянд. В настоящее время подготовка аппаратуры этого кластера близка к завершению и проводятся её лабораторные испытания.

В 2016 году выполнен завершающий анализ экспериментальных данных нейтринного телескопа NT200 в анализе чувствительности глубоководного телескопа в озере Байкал к нейтринному сигналу от аннигиляции темного вещества в потенциальных источниках Южной полусферы: в галактике Большое Магелланово Облако (LMC) и в темных карликовых галактиках. Полученные ограничения на сечения процессов аннигиляции относятся к частицам тёмного вещества с массой до 10 ТэВ с рождением

пары частица-античастица, включая нейтрино-антинейтрино в прямом канале, за пять лет наблюдений.

Работу по теме вела группа российских институтов - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (головная организация), НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, НИИ ядерной физики Московского государственного университета, Нижегородский государственный политехнический университет, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, международный центр ОИЯИ (г.Дубна), с участием специалистов DESY (Германия), Института исследований окружающей среды (Швейцария) и EvoLogics (Германия).

1.1 ВВЕДЕНИЕ

Если говорить о состоянии работ по созданию крупномасштабных нейтринных телескопов кубокилометрового масштаба в естественных средах (в воде или во льду), то в настоящее время в мире существуют два, кроме Байкальского, финансируемых проекта - IceCube на Южном полюсе и KM3Net в Средиземном море. Из детекторов первого поколения (Байкал HT-200, AMANDA, ANTARES) в строю ещё находится лишь ANTARES, но и он планируется к разборке в 2017 году.

Проект KM3NeT является общеевропейским проектом создания нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в Средиземном море. Первоначально условием финансовой поддержки проекта из общего бюджета стран ЕС являлось объединение усилий всех трёх средиземноморских коллабораций (ANTARES, NEMO и NESTOR) для его разработки и реализации. В ходе работы над проектом в период с 2006 года и вплоть до настоящего времени была выработана общая концепция и разработаны основные элементы и системы будущего детектора. Детектор будет состоять из шести независимых блоков, которые планируется развернуть в трех географических районах у берегов Франции, Италии и Греции (по два блока в каждом). Каждый блок представляет собой автономный глубоководный черенковский детектор с эффективным объёмом порядка 0.5 км^3 , содержащий примерно 2000 фотодетекторов размещенных на 115 гиляндах. В настоящее время во Франции и в Италии ведутся натурные испытания прототипов оптических модулей и стринга будущего телескопа. Объявленной целью проекта является развертывание к 2020 году двух блоков с общим эффективным объемом порядка одного кубического километра, а к 2025 году - шести блоков с общим объемом порядка 3 км^3 .

Наиболее интенсивно развивался проект AMANDA (США, Швеция, Германия), а ныне IceCube, который предусматривал создание черенковского детектора на Южном

полюсе путем вмораживания регистрирующих модулей в ледовый массив Антарктиды. Успешное развитие проекта AMANDA позволило убедить правительство и конгресс США в необходимости выделения значительных средств (около 300 млн. долларов США) на создание на Южном полюсе детектора с эффективным объёмом порядка кубокилометра. Первый из 86-ти стрингов был вморожен в антарктический лед зимой 2005 года. В последующие годы темпы монтажа установки последовательно нарастали: в 2009 году было развернуто 19 стрингов, а их общее количество достигло 59-ти. Завершение работ по созданию на Южном полюсе телескопа IceCube и официальная инаугурация проекта произошли 27 апреля 2011 года. В преддверие этого 11 мая 2009 года был выведен из эксплуатации детектор AMANDA, проработавший в общей сложности 9 лет в своей проектной конфигурации.

В настоящее время на телескопе IceCube ведутся исследования широкого спектра проблем астрофизики, космологии и физики элементарных частиц в диапазоне энергий от сотен ГэВ и вплоть до ультравысоких энергий на уровне чувствительности, более чем на порядок превышающем уровень, достигнутый на нейтринных телескопах первого поколения.

Анализ экспериментальных данных накопленных как по мере развертывания телескопа IceCube, так и после ввода его в эксплуатацию в предусмотренном проекте конфигурации привел к серьезному продвижению в задачах поиска нейтрино от астрофизических объектов, регистрации нейтринного потока сопровождающего гамма-всплески, поиска проявлений темной материи, исследования диффузного потока нейтрино и в ряде других задач. Наиболее ярким и значимым для дальнейшей судьбы развития нейтринной астрофизики представляются сегодня результаты анализа набора данных, накопленных в течение трех лет (за период с мая 2010 г. по май 2013 г.), при котором было выделено 37 событий в диапазоне энергий от 30 ТэВ до 2.0 ПэВ, чьи вершины были расположены в выделенном внутреннем объёме телескопа размером 0.4 км³. Энергетическое и угловое распределение этих событий, а также относительная доля событий с мюонным треком в полном числе событий хорошо согласуются с ожидаемым эффектом от изотропного потока нейтрино астрофизической природы с энергетическим спектром близким к $\sim E^{-2}$ и содержащего в равной доле нейтрино всех трёх типов - электронного, мюонного и таонного. Этот результат, стал важнейшей вехой в развитии исследований природных потоков нейтрино высоких энергий, так как он отвечает на вопрос о величине потока нейтрино астрофизической природы и определяет необходимый уровень чувствительности экспериментов при решении задач нейтринной астрофизики высоких энергий.

Завершим введение следующим образом. К 2011 году уровень знаний о диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий ($10^{13} - 10^{18}$) эВ, о локальных источниках нейтрино с энергией выше 10 ГэВ, о природном потоке быстрых магнитных монополей и о проявлениях массивных частиц темной материи был сформирован, главным образом, результатами экспериментальных исследований на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе NT200, на детекторе AMANDA на Южном полюсе и (в последние годы, начиная с 2009-го) на детекторе ANTARES в Средиземном море. Ввод в строй в 2011 году детектора IceCube на Южном полюсе позволил, в ряде задач, поднять чувствительность экспериментальных исследований еще на один-два порядка величины. На повестке дня стоит задача создания в Северном полушарии детектора(ов) способного(ых) вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube. Дальше всех в решении этой задачи продвинулась сейчас Байкальская коллаборация, где создан первый автономный кластер глубоководных гирлянд регистрирующих модулей - базового элемента детектора кубокилометрового масштаба NT1000 (BAIKAL-GVD). Дальнейшее сохранение полноправных позиций Байкальского детектора в компании мировых лидеров будет уже зависеть от темпов реализации этого проекта.

1.1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В 2016 году в период зимней экспедиции на оз. Байкал выполнены работы по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной аппаратуры и подводных линий кабельной связи демонстрационного кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD содержавшего 192 оптических модуля (ОМ) с фотодетекторами и успешно функционировавшего в течение 2015 года на оз. Байкал. В результате работ, выполненных в зимнюю экспедицию 2016 г. развернут и введен в эксплуатацию в режиме долговременного набора данных первый полномасштабный кластер нейтринного телескопа Baikal-GVD превышающий в полтора раза по своему объему установку 2015 года. Установка 2016 года содержит 288 оптических модулей, размещенных на 8 вертикальных гирляндах в интервале глубин от 750 до 1250 метров. Полномасштабный кластер Baikal-GVD, создание которого осуществлялось в течение 2013–2016 г.г., является глубоководным детектором с эффективным объемом порядка 50 Мегатонн для регистрации нейтрино по каскадной моде, способным вести исследование потока нейтрино астрофизической природы, обнаруженного в экспериментах на нейтринном телескопе IceCube. Оптические модули установки включают в себя фотоэлектронные умножители Hamamatsu R7081-100 с повышенной квантовой чувствительностью и сопутствующую электронику, а также по два калибровочных

светодиода. Каждая из гирлянд содержит 36 ОМ расположенных на расстоянии 15 м друг от друга и формирующих три секции по 12 ОМ в каждой. Системы сбора, обработки и передачи данных измерительных каналов расположены в электронных блоках каждой секции и позволяют регистрировать временную форму сигнала. Кластер связан с береговым центром управления и сбора данных гибридным глубоководным кабелем длиной около 6 км, включающим в себя оптоволоконные линии передачи данных и медные жилы для электропитания установки. Временная синхронизация измерительных каналов установки осуществляется засветкой оптических модулей световыми вспышками трех калибровочных светодиодных источников излучения, расположенных на центральной и одной из периферийных гирлянд кластера, а также с использованием световых импульсов калибровочных светодиодов размещенных в каждом оптическом модуле. Пространственное положение фотодетекторов установки контролируется с помощью акустической системы позиционирования разработанной фирмой EvoLogics (Германия). Оборудование, предназначенное для долговременного мониторинга гидрофизических параметров глубинных вод оз. Байкал размещено на отдельной инструментальной гирлянде. В период зимней экспедиции 2016 г. выполнена прокладка нового электрооптического кабеля с целью обеспечения связи с береговым центром управления и сбора данных второго кластера Baikal-GVD, развертывание которого планируется выполнить в 2017 г.

В течение 2016 года осуществлялась эксплуатация первого полномасштабного кластера телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и ведется формирование банка качественных событий для последующего физического анализа. Осуществлен непрерывный мониторинг уровня собственного свечения водной среды и временного поведения параметров оптических модулей и других функциональных систем установки в течение 2016 года. Проведены долговременные измерения (с периодом в 40 секунд) относительного смещения фотодетекторов установки с помощью акустической системы позиционирования.

Кластер Baikal-GVD является мультимегатонным глубоководным детектором нейтрино способным вести исследование потока нейтрино астрофизической природы обнаруженного в экспериментах на нейтринном телескопе IceCube. Кластер содержит 192 фотодетектора размещенных на 8 вертикальных гирляндах и включает в себя образцы всех элементов и функциональных систем телескопа NT1000. В качестве фотодетекторов в установке используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) Hamamatsu R7081-100 с

полусферическим фотокатодом диаметром 25 см и квантовой эффективностью ~35%. ФЭУ с управляющей электроникой, размещенные в глубоководных стеклянных корпусах, образуют оптические модули установки (ОМ). Электроника ОМ включает в свой состав блоки управления электропитанием ФЭУ, модули калибровки на основе синих светодиодов и узел передачи данных по шине RS-485. Каждая из гирлянд содержит 24 ОМ расположенных на расстоянии 15 м друг от друга и формирующих две секции по 12 ОМ в каждой. Системы сбора, обработки и передачи данных измерительных каналов расположены в электронных блоках каждой секции и позволяют регистрировать временную форму сигнала. Кластер связан с береговым центром управления и сбора данных гибридным глубоководным кабелем длиной около 6 км включающим в себя оптоволоконные линии передачи данных и медные жилы для электропитания установки.

Кластер Baikal-GVD создавался на протяжении 4-х лет.

В 2012 году была установлена первая полномасштабная гирлянда оптических модулей, в 2013 и 2014 годах по 2 гирлянды, в 2015 году - 3 гирлянды оптических модулей. Помимо оптической системы регистрации на основе фотодетекторов, кластер снабжен системами калибровки и позиционирования гирлянд. Временная синхронизация измерительных каналов установки осуществляется при помощи засветки оптических модулей световой вспышкой от калибровочных светодиодных источников излучения, расположенных на гирляндах, а также с использованием световых импульсов калибровочных светодиодов размещенных в каждом оптическом модуле. Пространственное положение фотодетекторов на гирляндах установки измеряется с помощью акустической системы позиционирования разработанной фирмой EvoLogics (Германия). В период зимней экспедиции 2015 года три новые гирлянды были оснащены системой позиционирования: установлено и введено в эксплуатацию 12 дополнительных акустических модемов (по 4 модема на гирлянду).

Одной из приоритетных задач, решённых за отчётный период, являлась оценка точности временной калибровки каналов установки. Оценка точности была получена на основании сравнения калибровочных коэффициентов, полученных двумя независимыми методами. Первый метод основан на прямом измерении задержек ФЭУ. Для этого контроллер ОМ формирует специальный тестовый импульс, синхронизированный с запуском светодиода. Этот импульс подается на выход усилителя сигналов ФЭУ. Разница времен между сигналом с ФЭУ, генерированным светодиодом, и тестовым импульсом дает задержку фотозлектронного умножителя. Задержка сигнала в ФЭУ и кабельных коммуникациях ОМ (задержки кабелей измеряются в лабораторных условиях до установки ОМ на гирлянды) определяет величину временного смещения канала. Для

второго метода временной калибровки используются вспышки светодиодов ОМ, регистрируемые двумя ФЭУ соседних каналов секции. Калибровочный коэффициент определяется исходя из вычислений разности времен распространения света до ФЭУ (положение ОМ на гирлянде известно с точностью не хуже 0.1 м). Анализ проводился для оптических модулей, установленных на двух гирляндах кластера Baikal-GVD в 2015 году (48 каналов). Было получено, что распределение каналов по разности между калибровочными коэффициентами, полученными двумя способами, имеет среднеквадратичное отклонение менее 2 нс.

В течение 2016 года были продолжены работы по разработке и усовершенствованию программного обеспечения моделирования отклика и анализа данных первого кластера и нейтринного телескопа Baikal-GVD. В рамках работ по развитию комплекса вычислительных и служебных программ BARS разработана и реализована автоматизированная процедура калибровки временных измерительных каналов установки. В течение 2016 г. велся анализ экспериментальных данных демонстрационного кластера 2015 года. В задаче поиска нейтрино астрофизической природы с использованием каскадной моды детектирования, был использован набор экспериментальных данных содержащий 450 млн. событий. В результате применения критериев отбора и процедуры восстановления параметров ливней выделено 539 событий с восстановленной энергией ливней выше 100 ТэВ и удовлетворяющих всем критериям отбора. Все выделенные события, кроме одного, имеют множественность сработавших оптических модулей меньше 10 и их число соответствует ожидаемому числу фоновых событий от атмосферных мюонов. Одно событие имеет множественность сработавших ОМ равное 17. Вероятность регистрации подобного события от нейтрино астрофизической природы сопоставимо с вероятностью регистрации фонового события от атмосферных мюонов.

В течение 2016 года проводились работы по комплектации, сборке и испытаниям в лабораторных условиях регистрирующей аппаратуры для второго кластера из 8 полномасштабных гирлянд НТ1000 (24 секции оптических модулей). В состав аппаратуры для 24 секций ОМ входят 288 оптических модулей, 24 глубоководных модуля системы сбора и обработки данных и комплект глубоководных кабельных коммуникаций. В настоящее время оптические модули полностью укомплектованы фотоэлектронными умножителями, блоками управления и модулями калибровки на основе светодиодов. Для модулей системы сбора данных изготовлены и протестированы 12канальные платы АЦП (200 МГц, 12 бит) и блоки управления ОМ. В платы АЦП были добавлены дополнительные функции управления аппаратурой, позволяющие подключать модемы

акустической системы позиционирования ГАСИК и калибровочные светодиодные источники непосредственно к модулям секций, что упрощает глубоководные кабельные коммуникации. Для массового тестирования ОМ в лабораторных условиях создана технологическая линия, включающая в свой состав стенд для температурных испытаний блоков электроники оптических модулей. Второй кластер будет развернут на оз. Байкал в 2017 г., что позволит в 2 раза увеличить детектирующий объем установки.

Проведен полный расчёт и получены ограничения на сечения процессов аннигиляции частиц темного вещества с массой до 10 ТэВ по данным телескопа NT200 за пять лет наблюдений в направлении на галактику Большое Магелланово Облако (LMC), являющейся ближайшим и самым большим спутником нашей Галактики, и в направлениях четырнадцати классических и восьми сверхслабых темных сфероидальных галактик Южной небесной полусферы. Получены ограничения на 90% д.у. на сечения аннигиляции частиц темной материи частиц с массой в диапазоне 30 ГэВ - 10 ТэВ и с распределением плотности по модели Navarro-Frenk-White, соответствующей стандартной космологической модели. Наиболее строгие ограничения получены в прямом нейтринном канале аннигиляции из шести рассмотренных лептонных и адронных каналов, на уровне 10^{-22} см³ сек⁻¹ для больших масс. Все результаты получены с учетом статистических и систематических погрешностей, а также с оценкой астрофизических неопределенностей.

Распространение нейтрино высоких энергий (выше 10 ГэВ) от астрофизических источников до уровня детектора рассчитано с учетом осцилляций нейтрино на длинной базе при их распространении в Земле. Все результаты получены с учетом статистических и систематических погрешностей, а также с оценкой астрофизических неопределенностей. Для оценки чувствительности телескопа NT200 использовался численный подход с псевдо-экспериментами и максимизация отношения правдоподобия для нулевой гипотезы («только фон») и альтернативной. Вывод верхних пределов на 90% д.у. по данным NT200 за пять лет наблюдений был сделан в приближении хи-квадрат в численном решении уравнения для отношения правдоподобия. Полученные результаты по нейтринным событиям от LMC подтверждают потенциал этого источника аннигиляций сравнимым с тем, что оценивается от центра Галактики. Показано, что ожидаемые предельные значения сечений для масс частиц темной материи выше 1 ТэВ для телескопа гигатонного объема GVD сильнее на два порядка, чем у предыдущего телескопа NT200 и сравнимы с результатами действующих больших телескопов на Южном полюсе и в Средиземном море. Нами был сделан комбинированный анализ максимальной вероятности сигнала по пяти из двадцати двух темных галактик, выбранных по наибольшему значению

астрофизического фактора. Получено, что данные соответствуют нулевой гипотезе «только фон» и, что новые верхние пределы на сечения аннигиляции в объединенном анализе более строгие в сравнении с индивидуальными галактиками.

1.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи работ по теме, предусматривавшиеся планом НИР на 2016год, с чистой совестью можно считать выполненными полностью.

В апреле 2016 г. на оз. Байкал введен в эксплуатацию в режиме долговременного набора данных первый кластер Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD в его проектной конфигурации, содержащий восемь гирлянд оптических модулей общим числом 288 (по 36 оптических модуля в каждой). Кластер Baikal-GVD является нейтринным телескопом мультимегатонного масштаба, который способен вести исследование потока астрофизических нейтрино на уровне чувствительности ~ 0.4 события в год. В ходе эксплуатации установки в течение 2016 г. выполнена калибровка измерительных систем телескопа, осуществляется непрерывный мониторинг фоновых условий среды, непрерывное измерение координат оптических детекторов. По мере накопления и первичного анализа данных формируется банк экспериментальных событий для последующего физического анализа, и в частности, в задаче выделения мюонных событий от нейтрино астрофизической природы. В течение 2015-2016 г.г. разработаны критерии подавления фона от свечения водной среды, методы восстановления мюонных траекторий и критерии выделения событий от мюонов из-под горизонта. Разработаны программы численного моделирования событий от нейтрино астрофизической природы и событий от фоновых потоков атмосферных мюонов и нейтрино. Все программы адаптированы для использования в единой среде обработки и моделирования BARS.

1.1 ПУБЛИКАЦИИ

Статьи:

1. A.D. Avrorin et al., “The optical module of Baikal-GVD”, Phys.Part.Nucl.Lett. 13 (2016) no.6, 737-746, DOI: 10.1134/S1547477116060029;
2. O.V. Suvorova, “Status of indirect dark matter search with neutrino telescopes”, Phys.Part.Nucl. 47 (2016) no.6, 938-946, DOI: 10.1134/S1063779616060241;
3. A.D. Avrorin et al., “Neutrino signal at Baikal from dark matter in the Galactic Center”, Phys.Part.Nucl. 47 (2016) no.6, 926-932, DOI: 10.1134/S1063779616060046;
4. A.D. Avrorin et al., “Data acquisition system for the Baikal-GVD neutrino telescope”, Phys.Part.Nucl. 47 (2016) no.6, 933-937, DOI: 10.1134/S1063779616060058;
5. A.D. Avrorin et al., “Neutrino signal at Baikal from dark matter in the Galactic Center”, Phys.Part.Nucl. 47 (2016) no.6, 926-932, DOI: 10.1134/S1063779616060046;

6. A.D. Avrorin et al, "The optical detection unit for Baikal-GVD neutrino telescope", EPJ Web Conf. 121 (2016) 05008, DOI: 10.1051/epjconf/201612105008;
7. A.D. Avrorin et al, "Status and perspectives of the BAIKAL-GVD projec", EPJ Web Conf. 121 (2016) 05003, DOI: 10.1051/epjconf/201612105003;
8. A.D. Avrorin et al, "Status of the early construction phase of Baikal-GVD", Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 314-320, DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.044;
9. A.D. Avrorin et al, "Baikal-GVD: Results, status and plans", Published in EPJ Web Conf. 116 (2016) 11005, DOI: 10.1051/epjconf/201611611005;
10. A.D. Avrorin et al, "LED based calibration systems of the Baikal-GVD neutrino telescope", EPJ Web Conf. 116 (2016) 06005, DOI: 10.1051/epjconf/201611606005;
11. A.D. Avrorin et al, "The data acquisition system for Baikal-GVD", EPJ Web Conf. 116 (2016) 05004, DOI: 10.1051/epjconf/201611605004;
12. A.D. Avrorin et al, "The optical module of Baikal-GVD", EPJ Web Conf. 116 (2016) 01003, DOI: 10.1051/epjconf/201611601003;
13. A.D. Avrorin et al, "Dark matter constraints from an observation of dSphs and the LMC with the Baikal NT200", arXiv: 1612.03836;

Доклады:

1. В. М. Айнутдинов, "Status/schedule GVD construction, results from 2015/16 cluster", MANTS meeting (ANTARES, Baikal, KM3NeT, IceCube), Manz, Germany, 1 – 2 октября 2016, MANTS-2016:
<https://events.icecube.wisc.edu/sessionDisplay.py?sessionId=1&confId=80#20161001>
2. Ж.-А. М. Джилкибаев, "Cascades in GVD", MANTS meeting (ANTARES, Baikal, KM3NeT, IceCube), Manz, Germany, 1 – 2 октября 2016, MANTS-2016:
<https://events.icecube.wisc.edu/contributionDisplay.py?sessionId=10&contribId=23&confId=80>
3. Ж.-А. М. Джилкибаев, "Current status of the Baikal-GVD", APPEC (Astroparticle Physics European Consortium), The Three Messenger Conference, Listvyanka at Lake Baikal, Листвянка, Россия, 29 августа – 3 сентября 2016,
<https://indico.desy.de/conferenceDisplay.py?confId=14253>
4. О. В. Суворова, "Baikal-GVD and it's extension ", 1st Neutrino Oscillation Tomography Workshop, 7-8 January 2016, Tokyo, Japan, <https://indico.cern.ch/event/442108/>
5. О. В. Суворова, "Baikal-GVD", RICAP-2016 - 6th Roma International Conference on Astroparticle Physics, 21-24 June 2016, Villa Tuscolana, Italy,
<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=10450>

6. Б. А. Шойбонов (ОИЯИ), “The status of the Baikal neutrino experiment”, Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», 12 – 15 апреля 2016, Дубна, Россия, <http://icssnp.jinr.ru/>

7. М.Д. Шелепов, “Исследование надежности аппаратуры Baikal-GVD”, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Федеральное государственное бюджетное учреждение Государственный научный центр Российской Федерации - Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, 29 ноября - 01 декабря 2016 г, <http://www.itep.ru/activity/youth/ysconf/>

1.2 Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной и космологические следствия их рождения. Фотоядерные взаимодействия лептонов при сверхвысоких энергиях.

Руководитель работ: ведущий научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук Э.В.Бугаев.

1.2 РЕФЕРАТ

Научно-исследовательская работа в 2016 году велась, в соответствии с планом НИР, по теме «Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной и космологические следствия их рождения», содержит краткое описание содержания научных работ, опубликованных в 2016 году.

1.2 ВВЕДЕНИЕ

Научно-исследовательская работа в 2016 году велась, в соответствии с планом НИР - по процессам рождения чёрных дыр в инфляционных моделях ранней Вселенной и по фотоядерным взаимодействиям лептонов

1.2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В работах 2016 года:

- 1) было показано, что существуют двухполевые модели инфляции, в которых возможно формирование спектра первичных флуктуаций плотности, приводящего к переизбытку рождения первичных чёрных дыр в радиационную эпоху ранней Вселенной;
- 2) было произведено исследование ядерных эффектов в фотоядерном взаимодействии мюонов сверхвысокой энергии.

1.2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работах 2016 года был проведен расчёт ограничений на параметры двухполевых моделей с ловушками, на основе наблюдательных данных по первичным чёрным дырам. По второй подтеме был произведён конкретный расчёт ядерного затенения для ряда лёгких ядер.

1.2 СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1 Bugaev, P. Klimai - "Trapping effects in inflation: blue spectrum at small scales", Phys. Rev. D 94 (2016) no.2, 023517.

2. П.А. Климай, Э.В. Бугаев. "Поиск испаряющихся первичных черных дыр на установках ИЯИ РАН", Труды 59-й научной конференции МФТИ. Проблемы современной физики / под общей ред. А.Г. Леонова; сост. Е.Ю. Чиркина. – М.: МФТИ, 2016. – 171 с. ISBN 978-5-7417-0613-8. стр. 129-130.

1.2 ДОКЛАДЫ

П.А. Климай, Э.В. Бугаев - "Поиск испаряющихся первичных черных дыр на установках ИЯИ РАН", доклад на 59й Научной конференции МФТИ, 21-26 ноября 2016 года, <http://conf59.mipt.ru/ru/info/main/>

2 Отдел физики высоких энергий

Научный руководитель –Куденко Ю.Г., профессор, заведующий отделом ИЯИ РАН

Исполнители:

Ершов Николай Викторович, старший научный сотрудник ИЯИ РАН

Измайлов Александр Олегович, научный сотрудник ИЯИ РАН

Минеев Олег Викторович, старший научный сотрудник ИЯИ РАН

Хабибуллин Марат Марсович, старший научный сотрудник ИЯИ РАН

Хотянцев Алексей Николаевич, научный сотрудник ИЯИ РАН

Шайхиев Артур Тагирович, младший научный сотрудник ИЯИ РАН

Мефодьев Александр Владимирович, аспирант МФТИ

Овсянникова Татьяна Алексеевна, аспирантка МИФИ

Антонова Мария Максимовна, студентка МИФИ

Клейменова Алина Александровна, студентка МИФИ/аспирантка ИЯИ РАН

Медведева Мария Валентиновна, студентка МФТИ

Суворов Сергей Борисович, студент МФТИ

Федотов Сергей Андреевич, студент МИФИ/аспирант ИЯИ РАН

Курочка (Лихачева) Виктория Леонидовна, студентка МИФИ/аспирантка ИЯИ РАН

Костин Андрей Сергеевич, студент МФТИ

Зыкова Анастасия Евгеньевна, студентка МФТИ

Дуганова Лилия Игоревна, студентка МИФИ

Дук Вячеслав Анатольевич, мнс ИЯИ РАН

2 РЕФЕРАТ

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов проводился анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску редкого распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu \nu$, т.е. распада положительно заряженного каона на мюон и три нейтрино, запрещенного в первом порядке в Стандартной Модели и возможного только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при поиске тяжелых нейтрино на основе данных E949.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, были проведены новые сеансы по набору статистики и начат анализ данных по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведена дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2014-2016 гг. в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования CP-нарушения в лептонном секторе. Кроме того, важным результатом анализа является измерение сечений взаимодействия нейтрино (мюонных и электронных) с различными ядрами, а также поиск стерильных нейтрино.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой в рамках нейтринной платформы ЦЕРН проведена разработка магнитного нейтринного детектора Baby-MIND, который будет состоять из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами. Детектор Baby-MIND будет одним из основных элементов эксперимента WAGASCI для измерения нейтринных сечений в области энергий 1 ГэВ на ядрах мишеней из воды и пластика (углерод и кислород), что, в свою очередь, позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC).

2 ВВЕДЕНИЕ

Исследование редких распадов элементарных частиц является важной задачей как для расширения наших знаний о природе и свойствах элементарных частиц и их взаимодействий, так и для поиска новых физических явлений.

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов проводился анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску редкого распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu \nu$, т.е. распада положительно каона на мюон и три нейтрино, запрещенного в первом порядке в Стандартной Модели и возможного только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при поиске тяжелых нейтрино на основе данных E949.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, были проведены новые сеансы по набору статистики и начат анализ данных по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведена дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2014-2016 гг. в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования CP-нарушения в лептонном секторе. Кроме того, важным результатом анализа является измерение сечений взаимодействия нейтрино (мюонных и электронных) с различными ядрами, а также поиск стерильных нейтрино.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой в рамках нейтринной платформы ЦЕРН проведена разработка магнитного нейтринного детектора Baby-MIND, который будет состоять из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами. Детектор Baby-MIND будет одним из основных элементов эксперимента WAGASCI для измерения нейтринных сечений в области энергий 1 ГэВ на ядрах мишеней из воды и пластика (углерод и кислород), что, в свою очередь, позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC).

2 Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов

2.1 Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов

Разработанные при поиске тяжелых нейтрино методы анализа данных и статистического анализа были в дальнейшем использованы для поиска редкого распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu \nu$, т.е. распада положительно заряженного каона на мюон и три нейтрино в эксперименте E949. Этот распад каона на четыре фермиона в первом порядке запрещен в Стандартной модели и возможен только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В недавней работе (D.Gorbunov, A.Mitrofanov, arXiv:1605.08077) была получена оценка вероятности этого распада в рамках Стандартной Модели на уровне $\sim 10^{-19}$. Таким образом при исследовании этого распада может быть получена важная информация о нейтрино-нейтринных взаимодействиях и шести-фермионных взаимодействиях. В 2016 году был завершен анализ с целью поиска событий из этого распада на основе всех данных E949 (1.7×10^{12} остановленных в мишени каонов). Подход к анализу был аналогичным к поиску тяжелых нейтрино в распадах остановленных каонов. Основными фоновыми событиями, как и в случае поиска тяжёлых нейтрино, были распады $K^+ \rightarrow \mu \nu \gamma$, когда фотон не регистрировался фотонными вето детекторами.

В результате было получено ограничение на вероятность распада $\text{Br}(K^+ \rightarrow \mu^+ + X) < 5.7 \times 10^{-7}$ в интервале импульсов мюонов 130-175 МэВ/с, из которого затем получено ограничение на вероятность распада $K^+ \rightarrow \mu \nu \nu \nu$ (A.Artamonov et al. Phys.Rev. D94 (2016) 032012). Получены следующие ограничения (90% CL) на $\text{Br}(K^+ \rightarrow \mu \nu \nu \nu)$:

$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \mu \nu \nu \nu) < 2.4 \times 10^{-7} \quad (\text{Стандартная Модель})$$

$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \mu \nu \nu \nu) < 2.4 \times 10^{-7} \quad (\nu \nu\text{-взаимодействие})$$

$$\text{Br}(K^+ \rightarrow \mu \nu \nu \nu) < 2.7 \times 10^{-7} \quad (6\text{-ти фермионное взаимодействие}).$$

Полученный результат позволяет установить ограничение на расширение Стандартной Модели с новым массивным калибровочным бозоном Z' (M.Ibe et al. ArXiv:1611.08460). Измерение распада $K^+ \rightarrow \mu \nu \nu \nu$ является чувствительным тестом для Z' в диапазоне масс $M_{Z'} < 2m_\mu$ через модуль $K^+ \rightarrow \mu^+ + Z'$ ($Z' \rightarrow \nu \nu$).

Эксперимент NA62 (ЦЕРН) нацелен на поиск редкого распада положительно заряженного каона ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$), чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели. В рамках этого эксперимента в 2016 г. была проведена разработка программ анализа по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету, используя методы, алгоритмы и опыт, полученные участниками проекта из группы ИЯИ в

эксперименте E949. Исследовались основные фоновые процессы и критерии отбора возможных распадов тяжелых нейтрино и подавления фона. Найдено, что наиболее существенным фактором, определяющим чувствительность эксперимента является наличие гало пучка, состоящего из заряженных частиц. Предложен метод снижения вклада гало пучка, связанный с модернизацией начальной части детектора NA62. Статистика, накопленная NA62 в сеансах на каонном пучке в 2015-2016 гг, позволяет достичь чувствительности элемента смешивания активных и стерильных нейтрино $\sim 10^{-8}$ для диапазона масс тяжёлых нейтрино 300 – 380 МэВ для распадной моды $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ и в интервала масс 300-500 МэВ для распадной моды $K^+ \rightarrow e^+ \nu_H$.

2.2 Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях KEK и J-PARC

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведен анализ данных, набранных в режиме *антинейтрино* в 2014 – 2016 гг. Основываясь на одновременном анализе данных по осцилляциям мюонных нейтрино в электронные нейтрино и мюонных антинейтрино в электронные антинейтрино, эксперимент T2K впервые получил указание на максимальное нарушение CP симметрии в нейтринных осцилляциях. Для обеих возможных иерархий масс нейтрино наиболее вероятным является значение CP нечетной фазы $\delta_{CP} = -\pi/2$, соответствующее максимальному CP нарушению. Значения фазы $\delta_{CP} = 0$ и $\delta_{CP} = \pi$, если CP симметрия сохраняется, исключены с доверительной вероятностью более 90%.

В эксперименте T2K были измерены осцилляционные параметры в при измерении «дефицита» мюонных нейтрино в дальнем детекторе СуперКамиоканде. Полученные данные указывают на максимальное смешивание между вторым и третьим массовыми состояниями и величина угла $\theta_{23} \approx 45$ градусов.

В эксперименте T2K впервые измерено когерентное рассеяние мюонных нейтрино с рождением одного пиона на легких ядрах (вода). Для энергии нейтрино около 0.7 ГэВ величина сечения составила $\sigma = (4.25 \pm 0.48 \text{ (stat)} \pm 1.56 \text{ (syst)}) \times 10^{-40} \text{ cm}^2/\text{nucleon}$, что находится в согласии с предсказанием нейтринного генератора NEUT и существенно расходится с предсказанием другого нейтринного генератора GENIE.

2.3 Разработка новых сцинтилляционных детекторов для экспериментов с ускорительными нейтрино

В рамках проекта Laguna-LBNO закончено создание полностью активного сегментированного детектора нейтрино (TASD), состоящего из 9000 сцинтилляционных стрипов со спектросмещающими волокнами, которые формируют 50 X-Y плоскостей. Все

счетчики переправлены в ЦЕРН. Объем детектора $1 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$. Проводится тестирование электроники и ведется подготовка к сборке всего детектора для проведения тестов на пучке в ЦЕРНе.

Проводилась разработка сегментированного водного детектора нейтрино (WAGASCI), который будет расположен на пучке нейтрино в J-PARC вблизи мишени (эксперимента T2K) под углом около 2.5 градусов по отношению к направлению пучка протонов. Были разработаны и изготовлены 230 экструдированных сцинтилляционных пластин размером 7 мм x 21 см x 200 см для детектора пробега мюонов (MRD). Закончена стадия исследования прототипов таких детекторов с использованием S-образных спектросмещающих волокон и микропиксельных лавинных фотодиодов. Выбрана оптимальная геометрия детекторов, аналогичная SMRD детекторам, созданным в ИЯИ РАН для ближнего нейтринного детектора ND280. Первый модуль детектора планируется установить на on-axis нейтринном пучке и использовать в измерения совместно с детектором INGRID.

В рамках нейтринной платформы ЦЕРН проведена разработка магнитного нейтринного детектора Baby-MIND. После тестирования на пучке в ЦЕРНе этот детектор будет перевезен в J-PARC (Япония) и установлен на нейтринном канале осцилляционного эксперимента с длинной базой T2K в качестве одного из основных элементов эксперимента WAGASCI для измерения нейтринных сечений в области энергий 1 ГэВ. Задача российской группы из ИЯИ РАН в 2016 состояла в разработке, тестировании в ИЯИ РАН и на пучке в ЦЕРН опытных образцов сцинтилляционных детекторов и полном изготовлении всех детекторов для Baby-MIND. В результате работы в течение 2016 года эта работа была полностью выполнена: было изготовлено и измерено более 3000 детекторов, параметры которых полностью удовлетворяли требованиям эксперимента.

2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов проводился анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску редкого распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu \nu$, т.е. распада положительно каона на мюон и три нейтрино, запрещенного в первом порядке в Стандартной Модели и возможного только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при поиске тяжелых нейтрино на основе данных E949.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, были проведены новые сеансы по набору статистики и начат анализ данных по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведена дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2014-2016 гг. в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования CP-нарушения в лептонном секторе. Кроме того, важным результатом анализа является измерение сечений взаимодействия нейтрино (мюонных и электронных) с различными ядрами, а также поиск стерильных нейтрино.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой в рамках нейтринной платформы ЦЕРН проведена разработка магнитного нейтринного детектора Baby-MIND, который будет состоять из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами. Детектор Baby-MIND будет одним из основных элементов эксперимента WAGASCI для измерения нейтринных сечений в области энергий 1 ГэВ на ядрах мишеней из воды и пластика (углерод и кислород), что, в свою очередь, позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC).

2 ПУБЛИКАЦИИ

- 1) K. Abe,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., V. Matveev,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,..., Y. Shustrov,..., N. Yershov, et al. (T2K Collaboration) / Upper bound on neutrino mass based on T2K neutrino timing measurements // Phys.Rev. D93 (2016) 012006, WOS:000369325800001;
- 2) K. Abe,..., M. Antonova,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., V. Matveev,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,..., S. Suvorov,..., N. Yershov, et al. (T2K Collaboration) / Measurement of the muon neutrino inclusive charged-current cross section in the energy range of 1-3 GeV with the T2K INGRID detector // Phys.Rev. D93 (2016) 072002, WOS:000373577700001;
- 3) K. Abe,..., M. Antonova,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., V. Matveev,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,..., S. Suvorov,..., N. Yershov, et al. (T2K Collaboration) / Measurement of Muon Antineutrino Oscillations with an Accelerator-Produced Off-Axis Beam // Phys.Rev.Lett. 116 (2016) 181801, WOS:000375669300003;
- 4) V. Duk, ..., S. Fedotov, E. Gushchin, A. Khudyakov, A. Kleymenova, Y. Kudenko et al. / Performance studies of the hodoscope prototype for the NA62 experiment // JINST 11 (2016) P06001, WOS:000379239700013;
- 5) K. Abe,..., M. Antonova,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., V. Matveev,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,..., S. Suvorov,..., N. Yershov et al. (T2K Collaboration) / Measurement of double-differential muon neutrino charged-current interactions on C8H8 without pions in the final state using the T2K off-axis beam // Phys.Rev. D93 (2016) 112012, WOS:000378204300001;
- 6) A.V. Artamonov,..., A.O. Izmaylov,..., M.M. Khabibullin, A.N. Khotjantsev,..., Yu.G. Kudenko,..., O.V. Mineev,..., A.T. Shaikhiev,..., N.V. Yershov, et al. (E949 Collaboration) / Phys.Rev. D94 (2016) 032012, WOS:000383046500002;
- 7) K. Abe,..., M. Antonova,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,..., S. Suvorov,..., N. Yershov, et al. (T2K Collaboration) / Measurement of Coherent $\pi(+)$ Production in Low Energy Neutrino-Carbon Scattering // Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 192501, WOS:000386903400010;
- 8) T. Ovsyannikova / The status of neutrino experiment WAGASCI // Стендовый доклад на Международной школе ЦЕРН-ОИЯИ, “The 2016 European School of High-Energy Physic”, 2016, Норвегия;

- 9) М. Медведева, А. Шайхиев / Вычисление времени жизни K^+ в эксперименте NA62 CERN // Доклад на 59-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 21-26 ноября 2016 г., Долгопрудный; <http://conf59.mipt.ru/static/prog.pdf> ;
- 10) A. Shaikhiev / Search for heavy neutrinos and other exotic processes in the E949 experiment // Доклад на конференции Каон 2016, 14-17 September 2016, University of Birmingham, UK; <https://indico.cern.ch/event/440244/contributions/2275265/> ;
- 11) A. Shaikhiev / Search for exotic processes in kaon decays in the E949 experiment // Доклад на конференции ICPPA-2016, МИФИ, 10-14 Октября 2016; <http://indico.cfr.mephi.ru/event/4/session/4/contribution/204/material/slides/0.pdf> ;
- 12) М. Khabibullin / Latest results from T2K neutrino experiment // Доклад на секции «Физика нейтрино» Международной Сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН, 12-15 апреля 2016 г., ОИЯИ, Дубна, Россия, <http://icssnp.jinr.ru/> ;
- 13) С. Суворов / Поиск тяжелых нейтрино в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K // Доклад на секции «Физика нейтрино» Международной Сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН, 12-15 апреля 2016 г., ОИЯИ, Дубна, Россия, <http://icssnp.jinr.ru/> ;
- 14) Т. Овсянникова, А. Измайлов, Ю. Куденко / The status of neutrino experiment WAGASCI // Доклад на секции «Физика нейтрино» Международной Сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН, 12-15 апреля 2016 г., ОИЯИ, Дубна, Россия, <http://icssnp.jinr.ru/> ;
- 15) А. Мефодьев / Нейтринный детектор Baby-MIND // Доклад на секции «Физика нейтрино» Международной Сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН, 12-15 апреля 2016 г., ОИЯИ, Дубна, Россия, <http://icssnp.jinr.ru/> ;
- 16) О. Минеев, В. Лихачева / Beam test of prototype muon counters for SHiP experiment in CERN // Доклад на секции «Детекторы, методика эксперимента и ядерно-физические методы» Международной Сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН, 12-15 апреля 2016 г., ОИЯИ, Дубна, Россия, <http://icssnp.jinr.ru/> ;
- 17) С. Федотов / Детектор NewCHOD для эксперимента NA62 (CERN) // Доклад на секции «Детекторы, методика эксперимента и ядерно-физические методы» Международной Сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН, 12-15 апреля 2016 г., ОИЯИ, Дубна, Россия, <http://icssnp.jinr.ru/> ;
- 18) С.А. Федотов, А.А. Клейменова / Статус детектора New CHOD эксперимента NA62 (CERN) // Доклад на 59-й научной конференции МФТИ, 21-26 ноября 2016 г., Долгопрудный, <http://conf59.mipt.ru/ru/info/program/> ;

- 19) A. Izmaylov / Search for heavy neutral leptons with the near detector complex ND280 of the T2K neutrino experiment at J-PARC // Доклад на конференции 11th International Conference, IDM2016, Identification of Dark Matter, 2016, 18-22 July 2016, Sheffield, United Kingdom; <https://idm2016.shef.ac.uk/indico/event/0/session/3/contribution/143>
- 20) S. Suvorov, A. Izmaylov / Search for heavy neutral leptons in near detector ND280 of the T2K experiment // Доклад на конференции Young science conference on HEP, QFT, math physics and cosmology 18-19 April 2016, Dolgoprudny;
- 21) М.М. Антонова, А.О. Измайлов / Исследование временной стабильности сцинтилляционных счетчиков ближнего детекторного комплекса ND280 нейтринного эксперимента T2K // Стендовый доклад на V Международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологии», 18-23 апреля 2016 г., МИФИ, Москва; http://magistr.mephi.ru/school/files/Стенды_19_04_Яд_физ.pdf ;
- 22) М. Antonova, A. Izmaylov, Yu. Kudenko / Study of the aging of plastic scintillator detectors of the near detector complex ND280 of the accelerator long-baseline neutrino experiment T2K // Стендовый доклад на конференции The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, ICPPA-2016, 10-14 October 2016, МИФИ, Москва; <http://indico.cfr.mephi.ru/event/4/session/41/contribution/337> ;
- 23) С.Б. Суворов, А.О. Измайлов / Поиск тяжелых нейтрино в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K // Доклад на Молодёжной конференции по физике высоких энергий, квантовой теории поля, математической физике и космологии, 18-19 апреля 2016 г., МФТИ, Москва; http://belle.lebedev.ru/conf_mipt_2016/?page_id=257 ;
- 24) А.А. Клейменова, А.Т. Шайхиев / Поиск тяжелых нейтрино в распадах каонов в эксперименте NA62 (CERN) // Доклад на Молодёжной конференции по физике высоких энергий, квантовой теории поля, математической физике и космологии, 18-19 апреля 2016 г., МФТИ, Москва; http://belle.lebedev.ru/conf_mipt_2016/?page_id=257 ;
- 25) V. Likhacheva, W. Baldini, A. Khotjantsev, Yu. Kudenko, G. Lanfranchi, A. Mefodiev, O. Mineev, A. Montanari, N. Tosi / Beam test of prototype muon counters for SHiP experiment in CERN // Доклад на Молодёжной конференции по физике высоких энергий, квантовой теории поля, математической физике и космологии, 18-19 апреля 2016 г., МФТИ, Москва; http://belle.lebedev.ru/conf_mipt_2016/?page_id=257 ;
- 26) М.М. Антонова, А.О. Измайлов / Исследование временной стабильности сцинтилляционных счетчиков ближнего детекторного комплекса ND280 нейтринного эксперимента T2K // Доклад на 59-й научной конференции МФТИ, 21-26 ноября 2016 г., г. Долгопрудный; <http://conf59.mipt.ru/static/prog.pdf> ;
- 27) V. Duk / Cosmology tests in rare kaon decays // Доклад на конференции QUARKS-2016, 29 May – 4 June 2016, Pushkin, Russia; <http://quarks.inr.ac.ru>

3 Отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики

3.1 Лаборатория нейтринной астрофизики

3.1.1 Высокоэнергетические исследования астро- и ядернофизического аспектов ШАЛ и взаимодействий адронов при энергиях $10^{15} - 10^{18}$ эВ

Научный руководитель: зав. лаб., д.ф.-м.н. Р.А.Мухамедшин

Ответственный исполнитель: с.н.с., к.ф.-м.н. С. И. Григорьева

3.1.1 РЕФЕРАТ

Отчет на 4-х страницах включает два рисунка.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АДРОНОВ, МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО, КОМПЛАНАРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТИЦ, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, СПЕКТР И СОСТАВ КЛСВЭ, КОСМОГЕННЫЕ НЕЙТРИНО, ИЗОТРОПНЫЙ ГАММА-ФОН

Проведена разработка новой модели протон-протонных взаимодействий в широком диапазоне энергий – от низких до сверхвысоких энергий ($10^{11} - 10^{20}$ эВ). Экспериментальные данные высокоэнергетических исследований фрагментационной области взаимодействия адронов космических лучей требуют предположения о появлении компланарной генерации энергетически выделенных вторичных частиц (ЭВЧ) во взаимодействиях частиц первичного космического излучения с энергиями $E_0 > 10^{16}$ эВ с ядрами атомов воздуха. Сравнение данных LHC и результатов моделирования противоречат первоначальной концепции объяснения компланарности ЭВЧ большими поперечными импульсами (в плоскости компланарности) ЭВЧ и согласуются с новой концепцией объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности. Предложен проект эксперимента на детекторе CASTOR LHC для проверки явления компланарности энергетически выделенных вторичных частиц при сверхвысоких энергиях.

Проведено теоретическое исследование проблемы происхождения и распространения космических лучей сверхвысоких энергий $E > 10^{18}$ эВ (КЛСВЭ). Выполнен анализ современных экспериментальных данных. Особенное внимание уделено данным, полученным на самых больших экспериментальных установках - Telescope Array (TA) и Pierre Auger Observatory (PAO). Получены ограничения на параметры теоретических моделей космических лучей сверхвысоких энергий.

3.1.1 ВВЕДЕНИЕ

До сих пор не существует общепризнанных моделей адрон-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях, используемых для моделирования развития широких атмосферных ливней в атмосфере (ШАЛ) для наземных астрофизических исследований при высоких и сверхвысоких энергиях, начиная с энергий Большого адронного коллайдера (ЛHC). Это связано с тем, что эксперименты на ЛHC дают информацию, в основном, о характеристиках центральной кинематической области взаимодействий нуклонов, которые играют второстепенную роль в развитии ШАЛ. Информация о более важной фрагментационной области во взаимодействиях нуклонов с ядрами вообще имеется только при энергиях ниже 1 ТэВ в лабораторной системе. Ситуация с взаимодействиями мезонов, которые играют важную роль в развитии ШАЛ, ещё более удручающая.

Высокогорные и стратосферные эксперименты с рентгеноэмульсионными камерами (РЭК) показали заметные отклонения предсказаний традиционных моделей от данных РЭК по генерации чармированных частиц и компланарной генерации энергетически выделенных вторичных частиц (ЭВЧ) во взаимодействиях при сверхвысоких энергиях. До сих пор для объяснения эффекта компланарности на качественном уровне было предложено несколько идей (от полужесткой неупругой двойной дифракции до концепции «кристаллического мира»), ни одна из которых не доведена до количественного уровня.

Таким образом, по-прежнему требуется как разработка новых, более адекватных моделей взаимодействия адронов с ядрами при сверхвысоких энергиях, так и экспериментальные исследования фрагментационной области во взаимодействиях нуклонов и мезонов с ядрами при энергиях выше 1 ТэВ.

Проблема происхождения и распространения космических лучей сверхвысоких энергий с энергией $E > 10^{18}$ эВ (КЛСВЭ) исследуется в течение многих десятилетий. В настоящее время основные экспериментальные данные получены на гигантских установках в эксперименте Telescope Array (TA) и в Pierre Auger observatory (Auger). В обоих экспериментах зарегистрировано беспрецедентное количество КЛСВЭ. В данной работе проведён анализ современных экспериментальных данных по КЛСВЭ, на основании которого исследуются существующие теоретические модели

3.1.1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработана новая модель FANSY 2.0, воспроизводящей различные характеристики взаимодействий протон-протон в широком интервале энергий ($10^{11} - 10^{20}$ эВ). Модель описывает генерацию основных вторичных частиц различных типов, оказывающих влияние на развитие ШАЛ, содержащих u,d,s,c кварки (заряженные и нейтральные пионы, каоны, нуклоны и барионы, чармированные частицы, мезонные и барионные резонансы).

В рамках модели FANSY 2.0 разработана версия, воспроизводящая компланарную генерацию энергетически выделенных вторичных частиц (ЭВЧ) во взаимодействиях частиц первичного космического излучения с энергиями $E_0 > 10^{16}$ эВ с ядрами атомов воздуха, обнаруженную в высокогорных и стратосферных экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами.

Показано, что согласование данных LHC и компланарности ЭВЧ в рамках первоначальной, предложенной около 15 лет назад, концепции объяснения компланарности большими поперечными импульсами (в плоскости компланарности) ЭВЧ очень маловероятно. Предложена новая концепция объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности. В этом случае данные LHC и предсказания модель FANSY 2.0 согласуются хорошо.

На рис. 3.1.1.1 показаны треки частиц в произвольном масштабе на мишенной диаграмме в трех версиях одного и того же взаимодействия, полученные в рамках традиционных моделей, а также первичной и новой концепций компланарности. Треки ЭВЧ показаны большими черными кружками.

Предложена концепция проведения эксперимента на LHC с использованием детектора CASTOR для проверки новой концепций компланарности. На рис. 3.1.1.2 показаны возможные экспериментальные результаты в случае регистрации компланарного взаимодействия.

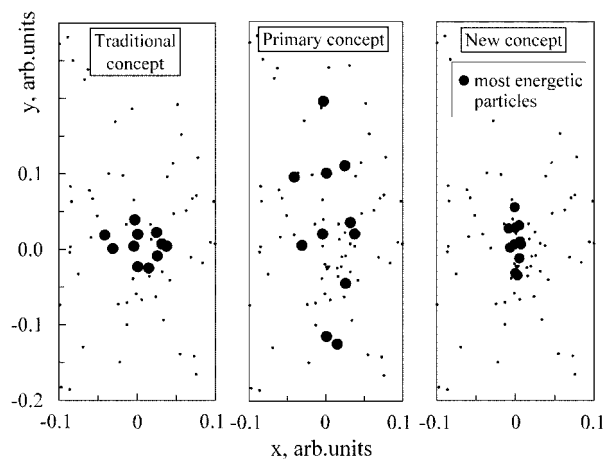


Рисунок 3.1.1.1

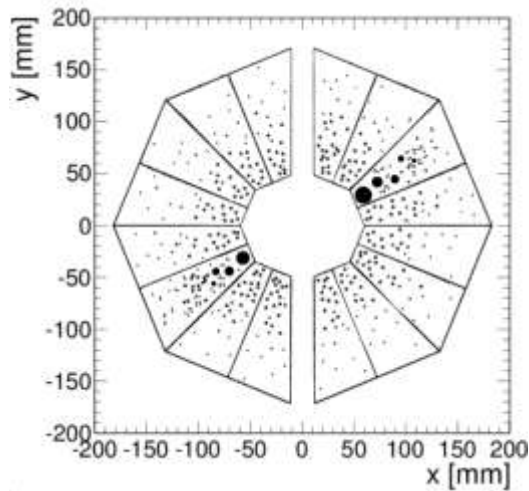


Рисунок 3.1.1.2

Энергетический спектр ТА измерен в широком интервале энергий $> 10^{15.5}$ эВ. Результаты этих измерений представлены на рисунке 1. Используются данные первых 7 лет работы флуоресцентных детекторов. Полученный спектр имеет ломанную степенную структуру, отчётливо видны спектральные особенности. ГЗК – обрезание наблюдается при $E = 10^{19.78 \pm 0.06}$ эВ, спектральный индекс равен -2.7 ± 0.03 до и -4.5 ± 0.6 после обрыва. «Лодыжка» (ankle) наблюдается при энергии $E_{\text{ankle}} = 10^{18.7 \pm 0.03}$ эВ.

ТА/TALE - данные дают ещё две дополнительные особенности спектра при более низких энергиях: второе колено и низкоэнергетическую лодыжку. Второе колено наблюдается при $10^{17.30 \pm 0.05}$ эВ (спектральный индекс равен -2.94 ± 0.02 слева от него), а низкоэнергетическая «лодыжка» видна при $10^{16.34 \pm 0.04}$ эВ.

Эти новые результаты являются предварительными, и систематические погрешности в настоящее время оцениваются.

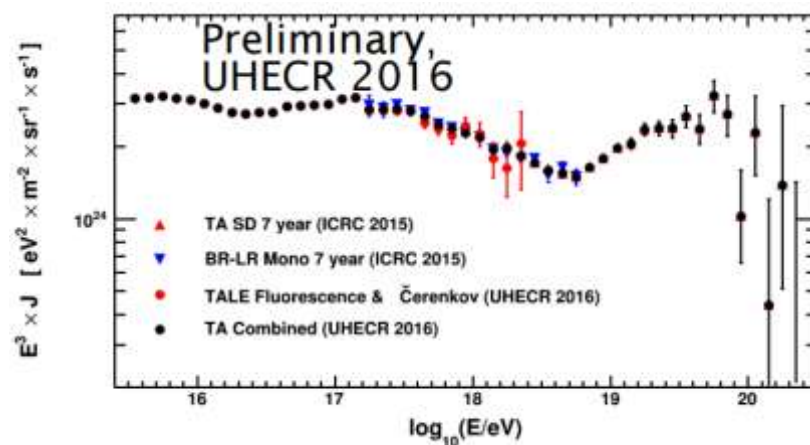


Рисунок 3.1.1.3 Энергетический спектр ТА

Данные измерения химического состава в эксперименте ТА свидетельствуют о неизменном лёгком составе КЛСВЭ (протоны или смесь протонов с ядрами гелия).

Энергетический спектр эксперимента РАО, полученный после 10 лет наблюдений, основан на анализе примерно 200000 событий и соответствует полной экспозиции, которая превосходит $50000 \text{ km}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{yr}$. Результирующий спектр (рис.4) подтверждает существование двух особенностей: «лодыжка» (ankle) при $E_{\text{ankle}} = (4.8 \pm 0.1 \pm 0.8) \times 10^{18} \text{ эВ}$ и подавление спектра при $E_s = (42.1 \pm 1.7 \pm 7.6) \times 10^{18} \text{ эВ}$. Спектр может быть описан степенным законом $J(E) = J_0(E/E_{\text{ankle}})^{-\gamma}$ с $\gamma = (-3.29 \pm 0.02 \pm 0.05)$ при $E < E_{\text{ankle}}$ и $\gamma = (-2.60 \pm 0.02 \pm 0.10)$ для больших энергий, включая гладкое подавление спектра при ещё более высоких энергиях. Выше E_s спектр значительно укрупняется, подтверждая обрыв в спектре при самых высоких энергиях. Здесь E_s соответствует энергии, при которой дифференциальный поток уменьшается наполовину относительно степенной экстраполяции в область энергий выше E_{ankle} .

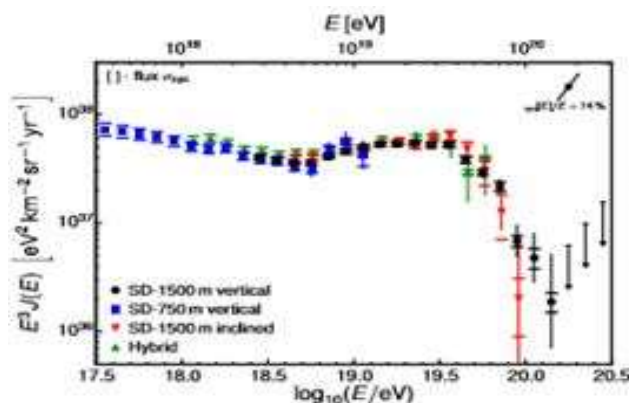


Рисунок 3.1.1.4 Энергетический спектр РАО, полученный из SD и гибридных данных

Данные по составу космических лучей, полученные в эксперименте Auger, свидетельствуют о переходе от лёгкого состава в области энергий $10^{18} - 10^{18.5} \text{ эВ}$ к более тяжёлому с увеличением энергии. Вероятно, что это ядра группы CNO.

В связи с большими противоречиями в экспериментальных данных ТА и РАО для значительного увеличения статистики в будущем планируется большое увеличение занимаемой площади и оснащение новым оборудованием обе установки. В случае эксперимента ТА площадь увеличится в 4 раза, это сильно повысит статистику космических лучей самых высоких энергий.

Как становится ясно из всего изложенного выше, несмотря на огромный технический прогресс современные экспериментальные данные очень противоречивы. Фактически энергетический спектр сильно конфликтует с массовым составом. В такой ситуации непрямые методы регистрации массового состава становятся очень важными.

Предложенная нами теоретическая модель происхождения КЛСВЭ (в литературе известная как dip-model) хорошо описывает особенности спектров, которые наблюдались во многих экспериментах. К таким особенностям относятся: 1) резкий обрыв в спектре при самых высоких энергиях, называемый ГЗК – обрезание (GZK-cutoff) и 2) неглубокое углубление (dip), расположенное при более низких энергиях (1 – 40) EeV. Существование этих особенностей в измеренных спектрах является доказательством протонного состава КЛСВЭ. «Дип» является модельно-зависимой особенностью. Его вид зависит от многих явлений и параметров (способ распространения, индекс спектра генерации, параметр космологической эволюции и особенно массовый состав).

Однако область параметров возможных для чисто протонных моделей может быть ограничена при учёте образования вторичных гамма-лучей и нейтрино в течение распространения КЛСВЭ от источника к Земле.

Такой анализ показывает, что протонные модели сильно ограничены наблюдениями Fermi LAT изотропного гамма-фона (IGRB), но всё же многие модели имеют место для существования. Например, для описания ТА - спектров (без сдвига по энергии) выживают модели с $\gamma_g \geq 2.5$ и относительно слабой эволюции $m \leq 2$. Класс разрешенных моделей становится более широким при 20% сдвиге энергии в область более низких энергий (это разрешается в пределах систематических ошибок), требования ослабевают к $\gamma_g \geq 2.2$ и $m \leq 5$ при предположении $z_{\max}=1$ или $\gamma_g \geq 2.4$, $m \leq 3$, предполагая $z_{\max}=5$. Ограничение значения максимального красного смещения $z_{\max} \leq 0.7$ позволяет включить модели с $m \leq 6$ и $\gamma_g \geq 2.4$.

Модели с сильной эволюцией, которые требуют жестких спектров генерации и достаточно больших $z_{\max}$, также ограничиваются нейтринным потоком, измеренным IceCube детектором. Однако в большинстве случаев современные ограничения на вторичный диффузный поток гамма-лучей являются более сильными, чем IceCube ограничения.

3.1.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан программный пакет FANSY 2.0 для моделирования взаимодействий адронов в широком интервале энергий ($10^{11} - 10^{20}$ эВ, воспроизводящий данные LHC, основные характеристики взаимодействий протон-протон в широком интервале энергий ($10^{11} - 10^{20}$ эВ) и генерацию основных типов вторичных частиц, оказывающих влияние на развитие ШАЛ, содержащих u,d,s,c кварки (заряженные и нейтральные пионы, каоны, нуклоны и барионы, чармированные частицы, мезонные и барионные резонансы)

Результаты сравнения данных LHC и моделирования компланарности ЭВЧ противоречат первоначальной, предложенной около 15 лет назад, концепции объяснения компланарности большими поперечными импульсами (в плоскости компланарности) ЭВЧ и требуют новой концепции объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности.

Предложена концепция эксперимента на LHC для проверки явления компланарности энергетически выделенных вторичных частиц при сверхвысоких энергиях.

Исследована проблема происхождения и распространения космических лучей сверхвысоких энергий. Показано, что измерение диффузионного гамма-излучения при $E \sim 1$ ТэВ является очень мощным методом ограничения доли протонов в спектре КЛСВЭ. Используя имеющуюся в настоящее время статистику и плохое знание галактического диффузного фона, невозможно исключить чисто протонный или почти чисто протонный состав при $(1 - 40)$ ЕэВ. Решение этой задачи – дело будущих измерений и теоретических исследований.

3.1.1 СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ

1. A.S. Borisov, A.P. Chubenko, V.G. Denisova, V.I. Galkin, Z.M. Guseva, E.A. Kanevskaya, M.G. Kogan, V.N. Kulikov, A.E. Morozov, R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.I. Nazarov, S.E. Pyatovsky, G.P. Shoziyoev, M.D. Smirnova, A.V. Vargasov. Study of charm production in the forward cone at energy $E_{Lab} \sim 75$ TeV with a two-storey X-ray emulsion chamber exposed at mountain altitudes. EPJ Web Conf. 99 (2015) 10004. DOI:10.1051/epjconf/20159910004
2. A.S.Borisov, V.G.Denisova, Z.M.Guseva, E.A.Kanevskaya, M.G.Kogan, A.E.Morozov, V.S.Puchkov, S.E.Pyatovsky, G.P.Shoziyoev, M.D.Smirnova, A.V.Vargasov, V.I.Galkin, S.I.Nazarov, R.A.Mukhamedshin. Estimation of charm production cross section in the forward kinematic cone at energies $E_{Lab} \sim 75$ TeV according to the high mountain experiment with two-storey XREC. Proc. 34th ICRC (Hague), 30 July- 6 August, 2015
3. A.P.Chubenko, A.L.Shepetov, V.P.Antonova, R.U.Beisembayev, A.S.Borisov, O.D. Dalkarov, O.N.Kryakunova, K.M.Mukashev, R.A.Mukhamedshin, R.A.Nam, N.F.Nikolaevsky, V.P.Pavlyuchenko, V.V.Piscal, V.S.Puchkov, V.A.Ryabov, T.Kh.Sadykov, N.M.Salikhov, S.B.Shaulov, A.V.Stepanov, N.G. Vildanov, M.I.Vildanova, N.N.Zastrozhnova, V.V.Zhukov. New complex EAS installation of the Tien Shan mountain cosmic ray station. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 832 (2016) 158
4. A.S., Borisov, A.P., Chubenko, V.G., Denisova, V. I. Galkin, Z. M. Guseva, E. A. Kanevskaya, M. G. Kogan, V. N. Koulikov, A. E. Morozov, R. A. Mukhamedshin, S. N. Nazarov, V. S. Puchkov, S. E. Pyatovsky, G. P. Shoziyoev, M.D., Smirnova, A.V. Vargasov. Studying the nature of the long-flying component of cosmic rays using X-ray emulsion chambers exposed in the Pamirs and Tien Shan. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. (2016) 80: 551. doi:10.3103/S1062873816050038.
5. R.A. Mukhamedshin. LHC data and cosmic ray coplanarity at superhigh energies (to be published in EPJ Web Conf., 2017)

Результаты также представлены на 34-й Всероссийской конференции по космическим лучам (Дубна), 15–19.08.2016 г.:

1. Р.А.Мухамедшин. «FANSY 2.0: моделирование взаимодействий адронов для “forward-physics”экспериментов. Компланарность в космических лучах и данные LHC»
2. С.И. Григорьева. «Космические лучи сверхвысоких энергий»

Число публикаций, индексируемых в бд Web of Sciences: 1

3.1.2 Нейтринные эксперименты ИЯИ РАН во ФНАЛ

Руководитель проекта: А.В. Буткевич д.ф.-м.н., внс

Состав участников Проекта ИЯИ РАН:

Матвеев В.А. академик

Лучук С.В. аспирант МФТИ, стажер-исследователь

3.1.2 РЕФЕРАТ

НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ, СЕЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРИНО

В международном эксперименте NOvA впервые были получены результаты, которые с достоверностью 2.5σ указывают на то, что примеси мюонных и тау нейтрино в третьем массовом состоянии нейтрино m_3 не одинаковы. Это означает, что угол смешивания θ_{23} не равен 45° градусам, т.е. смешивание нейтрино не является максимальным. На рисунке показана область допустимых значений разностей квадратов масс Δm^2_{23} и $\sin^2(\theta_{23})$ на 90% доверительном уровне при нормальной иерархии масс нейтрино ($m_3 > m_2 > m_1$). Для сравнения приведены, также, результаты коллабораций MINOS и T2K. Эксперимент ещё не набрал достаточно данных (на дальнем детекторе зарегистрировано 78 событий), чтобы утверждать об открытии не максимального смешивания. Пока набрана только шестая часть запланированной статистики, т.е. $6 \cdot 10^{20}$ протонов на мишень.

Анализ результатов по регистрации на дальнем детекторе электронных нейтрино в пучках мюонных нейтрино позволил исключить обратную иерархию масс нейтрино ($m_1 > m_2 > m_3$), угол смешивания $\theta_{23} < 45^\circ$ и значение фазы нарушения CP-инвариантности $\delta = 90^\circ$, на уровне 3σ .

3.1.2 ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах с атмосферными, солнечными, ускорительными и реакторными нейтрино наблюдается эффект осцилляций нейтрино. Это указывает на то, что наблюдаемые нейтринные состояния с определёнными ароматами являются суперпозицией собственных состояний нейтрино с определёнными массами. Наличие у нейтрино массы — единственное экспериментальное доказательство необходимости выхода за рамки Стандартной Модели. Вероятность осцилляций зависит от разностей квадратов масс нейтрино, углов смешивания и фазы нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе. В настоящее время измерены значения разностей квадратов масс и углов смешивания и ещё необходимо определить иерархию масс нейтрино и значение фазы нарушения CP-инвариантности.

3.1.2 РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью эксперимента NOvA (NuMI Off-axis ν_e Appearance) является изучение $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций нейтрино и определение фазы нарушения CP-инвариантности, иерархии

масс нейтрино, а также, уточнение уже измеренных параметров осцилляций нейтрино. В этом эксперименте используется самый мощный нейтринный пучок off axis NuMI (Neutrino Main Injector) мощностью 700 кВт и энергией нейтрино 1-3 ГэВ и два подобных детектора - ближний и дальний, оптимизированные для регистрации взаимодействий электронных нейтрино. Дальний детектор расположен на расстоянии 810 км и на глубине 4 м под землей в районе Аш-Ривер (ш. Миннессота).

В 2016 г. работа группы ИЯИ в эксперименте включала: а) определение эффективности и чистоты регистрации событий, обусловленных взаимодействием электронных и мюонных нейтрино в детекторах НОВА, и ожидаемого числа сигнальных и фоновых событий на дальнем детекторе, б) анализ данных для измерения сечений квази-упругого взаимодействия нейтрино с ядрами и сечения взаимодействия нейтрино без рождения пионов в конечном состоянии.

В международном эксперименте NOvA впервые были получены результаты, которые с достоверностью 2.5σ указывают на то, что примеси мюонных и тау нейтрино в третьем массовом состоянии нейтрино m_3 не одинаковы. Это означает, что угол смешивания θ_{23} не равен 45 градусам, т.е. смешивание нейтрино не является максимальным. На рисунке показана область допустимых значений разностей квадратов масс Δm^2_{23} и $\sin^2(\theta_{23})$ на 90% доверительном уровне при нормальной иерархии масс нейтрино ($m_3 > m_2 > m_1$). Для сравнения приведены, также, результаты коллабораций MINOS и T2K. Эксперимент ещё не набрал достаточно данных (на дальнем детекторе зарегистрировано 78 событий), чтобы утверждать об открытии не максимального смешивания. Пока набрана только шестая часть запланированной статистики, т.е. $6 \cdot 10^{20}$ протонов на мишень.

Анализ результатов по регистрации на дальнем детекторе электронных нейтрино в пучках мюонных нейтрино позволил исключить обратную иерархию масс нейтрино ($m_1 > m_2 > m_3$), угол смешивания $\theta_{23} < 45^\circ$ и значение фазы нарушения СР-инвариантности $\delta = 90^\circ$, на уровне 3σ .

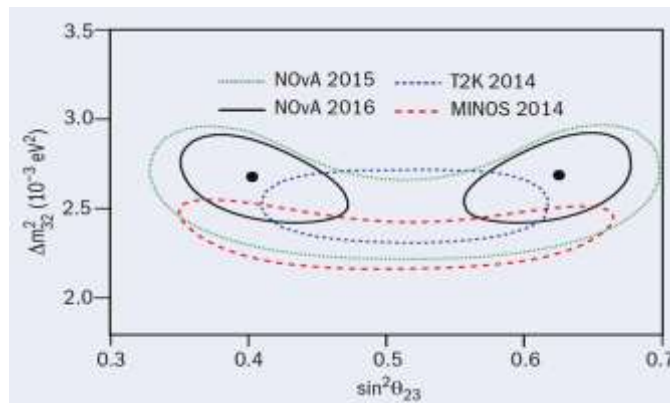


Рисунок 3.1.2.1

3.1.2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие в Фермилабе двух стабильно работающих детекторов и самого интенсивного в мире пучка нейтрино, предоставляет эксперименту NOvA неоспоримые конкурентные преимущества в исследованиях новых свойств нейтрино.

3.1.2 ПУБЛИКАЦИИ

[1] J. Wolcott et al. (NOvA Collaboration) “Recent cross section work from NOvA”. [arXiv:1611.02600]

[2] M.J. Frank et al.(NOvA Collaboration) “First neutrino oscillation results from NOvA”. [FERMILAB-CONF-16-127-ND]

[3] P.Adamson et al. “First measurement of muon-neutrino disappearance in NOvA”. Phys.Rev. D93 (2016) 051104

[4] P.Adamson et al. “First measurement of electron-neutrino appearance in NOvA”. Phys.Rev.Lett. 116 (2016) 151806

3.1.3 Регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах

Научный руководитель н.с Анатолий Васильевич Копылов

Список исполнителей:

н.с. Игорь Вадимович Орехов

н.с. Валерий Вячеславович Петухов

м.н.с. Алексей Евгеньевич Соломатин

вед.инженер Евгений Павлович Петров

3.1.3 РЕФЕРАТ

Отчет 4 с, 3 рис.

КОГЕРЕНТНОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРИНО, СКРЫТЫЙ ФОТОН КАК КАНДИДАТ НА ХОЛОДНУЮ ТЁМНУЮ МАТЕРИЮ, МУЛЬТИКАТОДНЫЙ СЧЁТЧИК

Отчёт содержит описание работ, выполненных в 2016 году на мультикатодном счётчике.

Задача исследования заключается в разработке метода регистрации одиночных электронов, который может быть использован для регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах и для поиска скрытых фотонов в качестве кандидатов на холодную тёмную материю. Получены первые экспериментальные результаты и поставлен предел на параметр смешивания для скрытых фотонов с массой от 5 эВ до 10 кэВ.

3.1.3 ВВЕДЕНИЕ.

При когерентном рассеянии реакторных антинейтрино на ядрах мишени энергия отдачи ядра настолько мала, что для регистрации этого процесса необходимо регистрировать с достаточно высокой эффективностью одиночные электроны. Это предъявляет очень жёсткие требования к детектору. В качестве детекторов одиночных электронов в настоящее время предлагаются полупроводниковые, газовые одно- и двухфазные счётчики и другие детекторы. Нами был разработан и изготовлен мультикатодный счётчик, позволяющий регистрировать с высокой эффективностью одиночные электроны, эмитируемые из стенки счётчика. Этот детектор может быть также использован для поиска скрытых фотонов в качестве кандидатов на холодную тёмную материю. Была изготовлена опытная конструкция детекторы и проведены измерения. По результатам измерений был поставлен предел на параметр смешивания для масс скрытых фотонов от 5 эВ до 10 кэВ. Результаты проведенных исследований были представлены в препринтах и опубликованы в реферируемых журналах.

3.1.3 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.

Конструкция разработанного счетчика представлена на рис. 3.1.3.1. Наличие нескольких катодов позволяет осуществлять счёт одиночных электронов в двух конфигурациях, так что разность скоростей счётов, измеренных в этих конфигурациях, определяет интенсивность эмиссии одиночных электронов из внешнего катода счётчика.

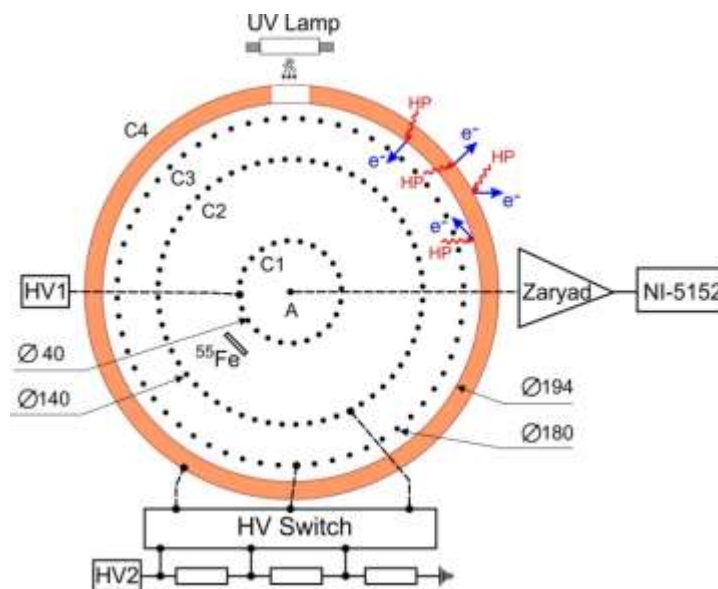


Рис. 3.1.3.1 - Принципиальная схема мультикатодного счётчика.

В результате прямых измерений на лабораторной установке в диапазоне масс скрытых фотонов от 5 эВ до 10 кэВ получен предел на константу кинетического смешивания χ .

В дальнейшей работе мы планируем провести измерения при температурах от 220 до 300 град. Кельвина и выделить составляющую, не связанную с термоэмиссией, которую можно отнести на счёт эффекта от скрытых фотонов. Это позволит прояснить вопрос о наличии криогенной составляющей темновой скорости счёта, которая, как следует из экспериментов, растёт по мере охлаждения детектора от 270-250 К до температуры жидкого гелия.

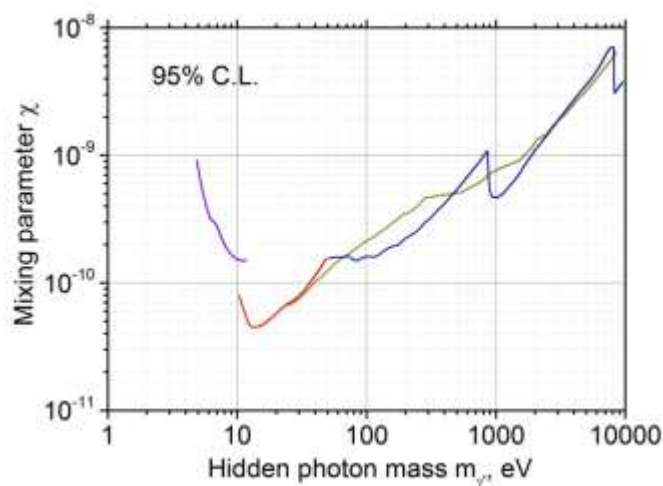


Рис. 3.1.3.2 - Предел на константу кинетического смешивания.

В нашем случае, при использовании медного катода с относительно высокой (по сравнению с двухщелочным катодом ФЭУ) работой выхода, а, следовательно, существенно более низкой скорости счёта электронов от термоэмиссии, согласно расчётам, рост должен наблюдаться, начиная с более высокой температуры, а, следовательно, станет доступным для измерений с помощью разработанного нами метода. Это является дополнительным мотивом необходимости измерения температурной зависимости темновой скорости счёта одиночных электронов.

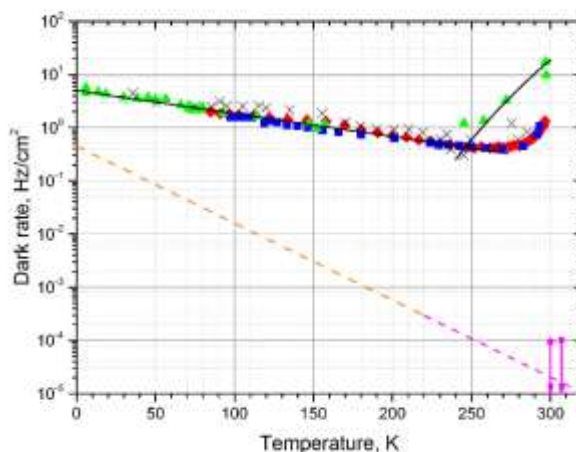


Рис. 3.1.3.3 - Изменение интенсивности эмиссии одиночных электронов в зависимости от температуры.

3.1.3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный нами мультикатодный счётчик является эффективным детектором одиночных электронов, эмитируемых из поверхности катода. Результаты проведённых измерений позволили получить предел на константу кинетического смешивания для скрытых фотонов с массой от 5 эВ до 10 кэВ. Дальнейшее совершенствование методики позволит уменьшить темновую скорость счёта и значительно улучшить предел. Измерение температурной зависимости темнового тока позволит прояснить вопрос о наличии криогенной составляющей темновой скорости счёта, которая, как следует из экспериментов, растёт по мере охлаждения детектора от 270-250 К до температуры жидкого гелия. В случае подтверждения этой гипотезы - это может стать одним из самых интересных физических результатов.

3.1.3 СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. / "On a Search for Hidden Photon CDM by a Multicathode Counter" // *Advances In High Energy Physics*, Volume 2016 (2016), Article ID 2058372 <http://dx.doi.org/10.1155/2016/2058372>
2. А.В. Копылов, И.В. Орехов, В.В. Петухов / «Метод регистрации скрытых фотонов с помощью мультикатодного счетчика » // *Письма в Журнал Технической Физики*, 2016, т.42, вып.16, с.102 <http://journals.ioffe.ru/articles/43589>
3. A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov / "Using a Multi-Cathode Counter (MCC) in the Search for Hidden Photon CDM" // arXiv: 1509.03033 [physics.ins-det]
4. A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov / "Experience of Using a Multi-Cathode Counter (MCC) in a Search for Hidden Photon CDM " // arXiv: 1512.04675 [physics.ins-det]
5. A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov / "A Search for Hidden Photon CDM in a Multi-Cathode Counter (MCC) data" // arXiv: 1601.02199 [physics.ins-det]
6. A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov / "On a Search for Hidden Photon CDM by a Multi-Cathode Counter" // arXiv: 1603.08657 [physics.ins-det]
7. A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov / "The Study of a Temperature Dependence of the Dark Rate of Single Electrons Emitted from a Cathode of a Multi-Cathode Counter as a Method to Search for Hidden Photons of CDM" // arXiv: 1608.06073 [physics.ins-det].

3.2 Лаборатория Электронных Методов Детектирования Нейтрино
Нейтринная астрофизика. Поиски нейтринного излучения от коллапсов звёзд в Галактике
на детекторе КОЛЛАПС АНС и на детекторе LVD.
Изучение свойств нейтрино на установках LVD и OPERA в подземном комплексе Гран-
Сассо

3.2 СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, д. ф.-м. н., член-корр.РАН Ряжская О.Г.

Исполнители темы:

снс к.ф.-м.н.	Агафонова Н.Ю.
мнс	Ашихмин В.В.
снс к. ф.-м. н.	Дадыкин В.Л. (ЛНА)
мнс	Добрынина Е.А.
нс	Еникеев Р.И.
снс к. ф.-м. н.	Мальгин А.С.
мнс	Мануковский К.В.
инженер	Очкас О.В.
снс к. ф.-м. н.	Рясный В.Г.
мнс	Шакирьянова И.Р.
нс	Юдин А.В.
нс	Якушев В.Ф.

3.2 РЕФЕРАТ

Отчет 34 с., 11 рис., 4 табл.

НЕЙТРИНО, АНТИНЕЙТРИНО, МЮОНЫ, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, НЕЙТРОНЫ,
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

На подземных сцинтилляционных детекторах ИЯИ РАН: АСД (Артемовск, Украина), LVD и OPERA (Гран Сассо, Италия) ведутся исследования в области нейтринной физики, физики космических лучей и астрофизики.

Основной целью экспериментов АСД и LVD является поиск нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд в Галактике и Магеллановых облаках. Регистрация всех типов нейтрино является уникальной особенностью этих установок.

По данным работы нейтринных телескопов ИЯИ РАН: АСД (Артемовской Научной станции) и российско-итальянской установки LVD (Гран Сассо, Италия) в течение 39 лет (1977 - 2016) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.94 года на 90% уровне достоверности.

Проведён их совместный анализ данных экспериментов LVD и БПСТ за 2011-2014 годы включительно с целью поиска нейтринных вспышек от коллапсирующих звёзд. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что найденные кластеры состоят из фоновых событий, и нейтринных вспышек обнаружено не было.

Установлено наличие сезонных вариаций нейтронов, генерированных мюонами. Измеренные характеристики вариаций нейтронов указывают на сезонные вариации средней энергии мюонов на глубине установки LVD с амплитудой 10%. На установке LVD исследован фон от радона, связанный с подвижкой грунта, вызываемой микросейсмическими толчками. Обнаружены «предвестники» крупных землетрясений, произошедших в Италии в 2016 году.

В 2016 году был полностью разобран детектор OPERA и продолжен анализ данных нейтринного эксперимента по поиску осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

Сотрудники подразделения принимали участие в работах по выполнению Государственного задания на 2016 год, по выполнению проекта по международному соглашению о научно-исследовательской работе российских научных групп в Национальной лаборатории Гран Сассо (Италия). Направление - «Физика космических лучей и редких распадов».

В 2016 году опубликовано 17 статей в иностранных и Российских журналах, сделано 8 докладов на международных, Российских конференциях и семинарах.

3.2 ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты, осуществляемые в подземных лабораториях, органично дополняют фундаментальные исследования элементарных частиц и их взаимодействий, проводимые на ускорителях. Поиск редких явлений в природе является единственным способом достичь, пусть даже косвенным образом, энергий, где начинают проявляться теория объединения сил и квантовые аспекты гравитации. Такие энергии нельзя получить на ускорителях. Подземные лаборатории обеспечивают очень низкий радиоактивный фон, необходимый для поиска этих редких ядерных и субъядерных явлений.

Космические лучи – галактические и внегалактические частицы – постоянно проникают в атмосферу Земли. Взаимодействие этих частиц с атмосферой приводит к возникновению ливней вторичных частиц, что является значительной помехой для экспериментальных установок, предназначенных для изучения чрезвычайно редких явлений и труднодоступных наблюдению частиц, таких как нейтрино или частиц тёмной материи.

Роль нейтрино в астрофизических исследованиях является весьма важной. Рождаясь в ядерных реакциях в глубине звезд, эти частицы легко выходят на поверхность, давая ценную информацию о процессах, скрытых от наблюдателя огромными толщами звёздного вещества. Получение этой информации и ее правильная интерпретация – задача экспериментаторов, занимающихся нейтринной астрофизикой.

3.2.1 Поиск нейтринного излучения от коллапсов звёзд в Галактике на детекторах АСД и LVD

Теория предсказывает, что эволюция массивных звёзд главной последовательности может завершиться гравитационным коллапсом и мощным коротким импульсом нейтринного излучения. В модели стандартного коллапса (сферически-симметричная, невращающаяся, немагнитная звезда, МСК) излучаются все типы нейтрино в равных долях. Наиболее естественно попытаться зарегистрировать поток электронных антинейтрино. Для этого требуется хорошо защищенный от фона космических лучей подземный детектор, состоящий из сотни, а лучше бы даже, 1000 тонн водородосодержащего вещества в качестве мишени для реакции $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$. Эффект от коллапса идентифицируется по появлению в пределах 20 секунд статистически редкого сгущения импульсов, регистрируемых детектором. Важным является совпадение эффекта с оптическим наблюдением вспышки сверхновой. Сильно улучшить достоверность результатов позволяет параллельная работа нескольких детекторов, расположенных в разных местах земного шара.

Исследование нейтринного излучения от коллапса звёзд позволит нам получить информацию о поведении и свойствах вещества в экстремальных условиях ядерной плотности, сверхвысоких температур и давлений, мощных гравитационных полей, образования нейтронных звезд и черных дыр – самых фундаментальных процессов во Вселенной.

Начиная с конца 70-х гг., в ИЯИ нами были построены несколько больших подземных сцинтилляционных детекторов, способных измерить нейтринное излучение от коллапса. Это - АСД (1977 г.), БПСТ (1978 г.), LSD (1984 г.), LVD (1992 г.).

23 февраля 1987 г., когда в галактике Большое Магелланово Облако вспыхнула Сверхновая SN1987A, детекторы КИ и IMB зарегистрировали нейтринный сигнал в 7:35 UT, а детектор LSD - в 2:52 UT. Этот сигнал оказался совершенно необъяснимым в рамках стандартной модели. Он получил интерпретацию в модели, учитывающей вращение ядра звезды. Эта модель была сконструирована В.С. Имшенником, чтобы получить механизм сброса оболочки на заключительном этапе эволюции массивных звёзд главной последовательности и названа автором моделью вращающегося коллапсара (МВК). Эта модель предсказывает возможность двустадийного коллапса. На первой стадии излучаются в основном электронные нейтрино со средними энергиями 30-40 МэВ, во второй – все типы нейтрино, как в МСК, со средними энергиями 10-15 МэВ.

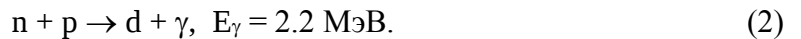
Для регистрации гравитационного коллапса необходима длительная непрерывная работа специализированных экспериментальных установок. Основная задача состоит в

том, чтобы зарегистрировать кратковременную нейтринную вспышку и определить типы измеренных нейтрино. Это очень важно для понимания, что происходит со звездой на последней стадии эволюции. Установками, способными идентифицировать все типы нейтрино, являются: детектор LVD, в состав которого входит примерно 1 кт железа и 1 кт жидкого сцинтиллятора, и установка «Артемковский Сцинтилляционный Детектор» АСД Артемовской Научной Станции ИЯИ РАН.

В случае осуществления модели стандартного коллапса (МСК) полная энергия, идущая в нейтринное излучение, составляет примерно 10% от массы сколлапсировавшей звезды и делится между шестью типами нейтрино приблизительно поровну. Наиболее подходящей реакцией для поисковых экспериментов с использованием жидкостных сцинтилляционных счетчиков является реакция взаимодействия электронного антинейтрино с водородом:



Эта реакция сопровождается захватом нейтрона водородом с излучением γ -кванта 2.2 МэВ:

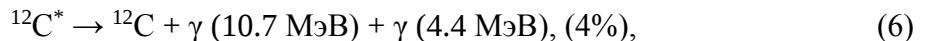
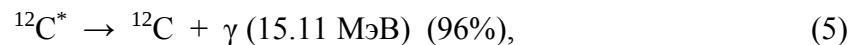


В детекторе АСД нейтроны, рожденные вблизи стенок, захватываются также ядрами Cl, входящими в состав окружающей установку соли

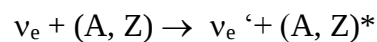
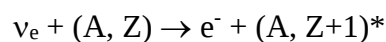
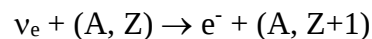


Время захвата нейтронов в АСД равно $\tau = 170$ мксек. Вероятность захвата 85%. Таким образом, АСД с высокой степенью надежности может идентифицировать $\bar{\nu}_e$.

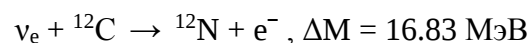
Все типы нейтрино (ν_i) взаимодействуют также с углеродом. В случае МСК основной реакцией является реакция возбуждения ядерного уровня углерода 1^+ (15.11 МэВ) за счет нейтрального тока:



В случае Модели Вращающегося Коллапсара (МВК) регистрация электронных нейтрино может осуществляться благодаря реакциям:



Для углерода это реакции:



$$^{12}\text{N} \rightarrow ^{12}\text{C} + e^+ + \nu_e, \tau = 15.9 \text{ мс}, E_{\text{max}} \approx 16.4 \text{ МэВ}$$

$$\nu_e + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{B} + e^+, \Delta M = 13.88 \text{ МэВ}$$

$$^{12}\text{B} \rightarrow ^{12}\text{C} + e^- + \nu_e, \tau = 29.3 \text{ мс}$$

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

Важным является совпадение сигнала с оптическим наблюдением вспышки сверхновой. Сильно улучшить достоверность результатов позволяет параллельная работа нескольких детекторов.

Другие детекторы, помимо LVD, которые участвуют в современной службе поиска нейтрино от звездных коллапсов, также чувствительны к нейтрино других типов и прежде всего к электронным нейтрино: детекторы АНС, БПСТ, KamLAND, Borexino. Сравнение расчетных сигналов от регистрации нейтрино представлено в табл. 3.2.1.

Таблица 3.2.1 Сравнение расчётных сигналов от регистрации нейтрино

Эксперимент	Страна	Мишень	Число электронных антинейтрино в МСК	Число электронных нейтрино В МВК
АСД	Россия	0,1кт ЖС, 1 кт NaCl	57	44
БПСТ	Россия	0,2кт ЖС, 0,16кт Fe	67	8
KamLAND	Япония, США	1 кт ЖС	500	180
Borexino	Италия	0,3 кт ЖС	120	60
LVD	Россия, Италия	1кт ЖС, 1кт Fe	500	410
SuperK	Япония, США	22,5 кт H ₂ O	9400	650

3.2.1.1 АСД - стотонный сцинтилляционный детектор Артёмовской Научной станции.

Детектор АСД (Рисунок 3.2.1.1) расположен в соляной шахте на глубине 570 м.в.э. (г. Артемовск, Донбасс), где фон естественной радиоактивности примерно в 300 раз меньше чем в обычном грунте. Детектор имеет цилиндрическую форму, диаметр (556±3) см, высота 547 см; содержит 105 тонн жидкого сцинтиллятора на основе уайт-спирита. Высота столба сцинтиллятора 540 см, плотность – 0.78 г/см³. 144 фотоумножителя расположены на боковой поверхности детектора.

Масса мишени для поиска нейтринного излучения от коллапсов звезд равна 105 тоннам сцинтиллятора и 1000 тоннам соли (NaCl). Число ожидаемых событий при вспышке сверхновой, типа SN1987A, в центре Галактики равно $57 \bar{\nu}_e$ в модели МСК и $44 \nu_e$ в первой фазе MBK.

Методом поиска нейтрино в детекторе является регистрация всех событий, имеющих энергосодержание $E > 5$ МэВ, этот триггер открывает временные ворота $\Delta t = 1$ мсек с энергетическим порогом 0.7 МэВ для детектирования нейтронов в реакции (1, 2)

За период наблюдения за Галактикой по данным установки с 1977г. по 2015г. кандидатов на вспышки Сверхновых обнаружено не было. За 38 лет работы получено ограничение на частоту гравитационных коллапсов менее, чем одно событие за 16.5 года на 90% доверительном уровне ($f_{col} < 0.061$ года⁻¹).



Рисунок 3.2.1.1 - Установка АСД АНС

3.2.1.2 Детектор Большого Объема LVD

Основная цель LVD – поиск нейтринного излучения от коллапсов звезд. По этой программе LVD работает с 1992 года. Детектор LVD (Large Volume Detector), расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине $\langle H \rangle = 3650$ м.в.э., состоит из 840 сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой контейнеры из нержавеющей стали размерами $100 \times 100 \times 150$ см³, заполненные жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Они размещены по 8 штук в стальных несущих модулях (портатанко), которые сгруппированы в 7 горизонтальных слоёв и образуют вертикальные колонны.

LVD состоит из 3-х башен. Первая башня LVD начала работать в 1992 году, 3 башни – в 2002 года. На рисунке 3.2.1.3 приведено значение активной массы установки с

1992 по 2014 год. Полная масса жидкого сцинтиллятора равна 970 тонн. Масса железа, образующего несущую структуру установки, – около 1000 тонн.



Рисунок 3.2.1.2 - Установка LVD

Полная мишень LVD состоит из 8.313×10^{31} свободных протонов, 4.267×10^{31} ядер углерода, 9.7×10^{30} ядер железа и 3.393×10^{32} электронов.

Каналы взаимодействия нейтрино в детекторе LVD (МСК):

$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	(1.8 МэВ)	(88%)
$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$	(17.3 МэВ)	(1.5%)
$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$	(14.4 МэВ)	(1.0%)
$\nu_i + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_i + {}^{12}\text{C}^* + \gamma$	(15.1 МэВ)	(2.0%)
$\nu_i + e^- \rightarrow \nu_i + e^-$	(-)	(3.0%)
$\nu_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}\text{Co}^* + e^-$	(10. МэВ)	(3.0%)
$\bar{\nu}_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}\text{Mn} + e^+$	(12.5 МэВ)	(0.5%)
$\nu_i + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow \nu_i + {}^{56}\text{Fe}^* + \gamma$	(15. МэВ)	(2.0%)

В модели стандартного коллапса (сферически-симметричная, невращающаяся, немагнитная звезда, МСК) излучаются все типы нейтрино в равных долях.

В случае осуществления модели стандартного коллапса (МСК) полная энергия, идущая в нейтринное излучение, составляет примерно 10% от массы сколлапсировавшей звезды и делится между шестью типами нейтрино приблизительно поровну. На установке LVD основной реакцией (для МСК) является реакция взаимодействия электронного

антинейтрино с водородом: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e + n$, $E_{e^+} = E_{\bar{\nu}_e} - 1.3$ МэВ. Она сопровождается захватом нейтрона водородом с излучением γ -кванта 2.2 МэВ: $n + p \rightarrow d + \gamma$, $E_\gamma = 2.2$ МэВ.

В случае Модели Вращающегося Коллапсара (МВК) регистрация электронных нейтрино может осуществляться благодаря реакциям:

$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z+1)$$

$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z+1)^*$$

$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow \nu_e + (A, Z)^*$$

Благодаря наличию в составе детектора LVD ядер углерода и железа, он чувствителен также ко всем типам нейтрино, которые могут взаимодействовать по следующим реакциям:

$$\nu_e + Fe \rightarrow e^- + Co^*,$$

$$\nu + {}^{12}C \rightarrow \nu + {}^{12}C^*,$$

причем возбуждение ядра кобальта, получающегося в реакции с железом, снимается путем испускания гамма-квантов с энергией от 1.7 до 10.7 МэВ (наиболее вероятная энергия составляет ~ 7 МэВ). В реакции с углеродом могут участвовать все типы нейтрино и антинейтрино, а переход ядра углерода в основное состояние сопровождается испусканием гамма-кванта с энергией 15.1 МэВ.

В первой стадии коллапса в модели МВК ($E_\nu = 20 \div 40$ МэВ) основной реакцией является реакция взаимодействие нейтрино с железом (80% событий обязаны ей). Число ожидаемых событий при вспышке сверхновой, типа SN1987A, в центре Галактики равно $500 \bar{\nu}_e$ в модели МСК и $410 \nu_e$ в первой фазе МВК.

В течение 23 лет наблюдений гравитационных коллапсов в Галактике и Магеллановых облаках, в том числе скрытых (без сброса оболочки), не обнаружено.

LVD измеряет данные в течение 99% времени. По данным работы установки LVD с 1992 года по 2016 (24 года) предел на частоту вспышек сверхновых составляет $1/10.4$ года⁻¹.

3.2.1.3 Поиск нейтринных всплесков от коллапсирующих звезд по экспериментальным данным установок LVD и БПСТ.

На основе экспериментальных данных, полученных установками LVD и БПСТ, проводился поиск временных совпадений кластеров событий за четырёхлетний период (с 2011 по 2014 год включительно). Данная работа была выполнена для отработки методики поиска нейтринных вспышек по данным с двух экспериментальных установок одновременно.

Для поиска предполагаемых нейтринных вспышек от коллапсирующих звёзд были отобраны события, которые могли являться откликами на взаимодействие нейтрино с веществом экспериментальных установок («нейтринные» события). Процедура отбора событий из общего массива экспериментальных данных является схожей для обоих детекторов, что объясняется их модульной структурой. Событие является «нейтринным», если оно произошло во внутреннем счётчике установки (в этом случае внешние счётчики играют роль активной защиты) и включало в себя отклик только одного счётчика.

После предварительного отбора «нейтринных» событий проводился поиск групп событий (кластеров), зарегистрированных в экспериментах. Использовались две методики поиска совпадений кластеров: 1) поиск кластеров в LVD, совпадающими с кластерами в БПСТ; 2) «обратная задача», т.е. поиск кластеров в БПСТ, совпадающих по времени с кластерами в LVD. При использовании первой методики учитывалось, что в случае реальной нейтринной вспышки за счёт более высокой активной массы детектора LVD, множественность кластера в LVD должна быть примерно в 5 раз больше, чем в БПСТ, а также первое событие кластера в LVD должно быть раньше первого события соответствующего кластера в БПСТ. Исходя из этого, был определён алгоритм поиска совпадений кластеров: для кластеров БПСТ фиксированной множественности ищутся кластеры в LVD максимальной множественности, начало которых не более, чем на 10 с раньше. В результате были получены распределения по множественности кластеров в LVD при фиксированной множественности в БПСТ. Распределения для кластеров множественности 3, 4, 5 представлены на рис.3.2.1.3., на рис. 3.2.1.4 представлено распределение для кластеров множественности 6. В табл. 3.2.2 представлены параметры распределений.

Таблица 3.2.2 Параметры распределений кластеров по множественности

k_{BUST}	N_{BUST}	$\langle k_{LVD} \rangle$	k_{peak}
3	83909	9.71	10
4	12126	9.70	10
5	1273	9.63	10
6	90	9.08	
7	8	8.63	

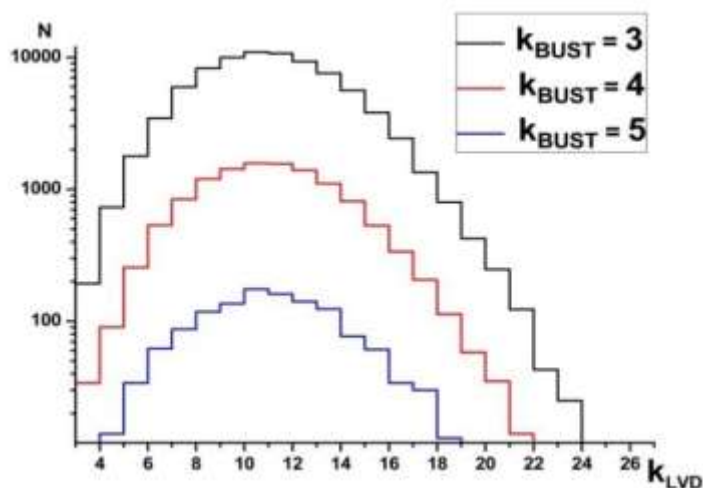


Рис. 3.2.1.3 Распределения множественности кластеров LVD при фиксированной множественности (3, 4, 5) кластеров БПСТ.

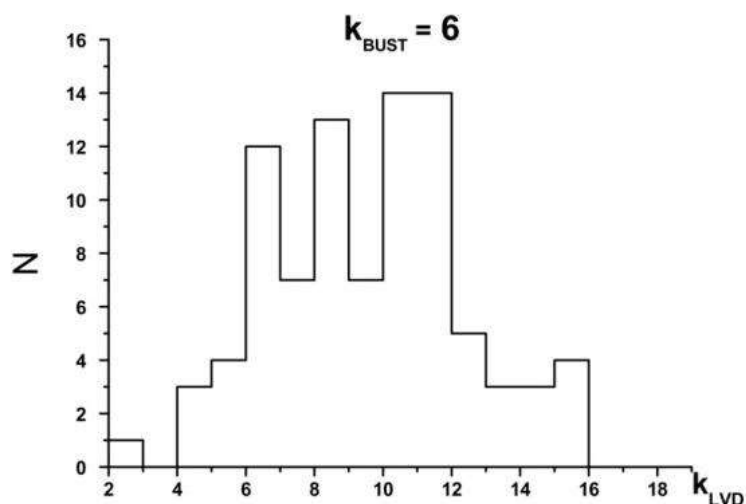


Рис.3.2.1.4 Распределение множественности кластеров LVD при фиксированной множественности (равной 6) кластеров БПСТ.

Как видно из представленных результатов, средние значения множественности кластеров LVD практически не изменяется в зависимости от множественности кластеров БПСТ. Более того, из распределения на рис. 3.2.1.3. легко видеть, что наибольшая множественность кластера LVD, отвечающая множественности 6 кластера БПСТ равна 15. Однако в случае реальной нейтринной вспышки множественность кластера LVD должна была составлять около 30 событий. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о случайном происхождении кластеров.

При решении «обратной задачи», т.е. поиска кластеров в БПСТ, совпадающих по времени с кластерами в LVD, использовался следующий алгоритм. Искались кластеры БПСТ, запаздывающие относительно кластеров LVD не более чем на 10 секунд. Поиск таких кластеров проводился для трёх диапазонов значений множественности кластеров

LVD: 6-8, 12-14 и 18-20 событий в кластере. Результаты поиска представлены в таблице 3.2.3. Из приведённых данных видно, что среднее значение множественность кластеров БПСТ практически не изменяется, что указывает на фоновую природу событий в кластере

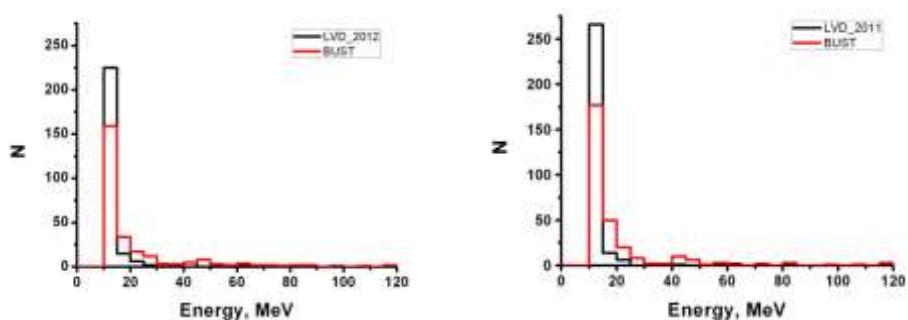
Таблица 3.2.3 Поиска кластеров в БПСТ, совпадающих по времени с кластерами в LVD

k_{LVD}	2	3	4	5	6	$\langle k_{БПСТ} \rangle$
6-8	89912	6440	329	8	0	2.07
12-14	58848	4055	201	8	0	2.07
18-20	2178	168	11	0	0	2.08

3.2.1.4 Поиск совпадений редких событий на установках LVD и БПСТ.

Работа по поиску совпадений редких событий проводилась с целью определения частоты совпадений событий в детекторах, которые могут являться откликами на взаимодействие нейтрино. В предыдущем пункте представлены критерии отбора таких «нейтринных» событий. Методика поиска совпадений заключается в отыскании пары «нейтринных» событий с LVD и БПСТ, время между которыми менее 1 секунды. В ходе выполнения настоящей работы использовались данные с 2011 по 2014 год включительно. По сравнению с работами предыдущего года были усилены ограничения на отбор «нейтринных» событий, связанные с кратковременными неполадками работы отдельных счётчиков, что приводило к заметному «локальному» увеличению темпа счёта «нейтринных» событий. В результате были получены энергетические спектры событий и распределения количества совпадений за сутки для каждого года функционирования экспериментов. Полученные результаты представлены на рис. 3.2.1.5, 3.2.1.6.

Как видно из представленных энергетических распределений, их форма остаётся неизменной на протяжении 4-х лет, что свидетельствует о стабильной работе экспериментов. В свою очередь, различная форма энергетических распределений, полученная в LVD и БПСТ, указывает на различное происхождение фона в детекторах.



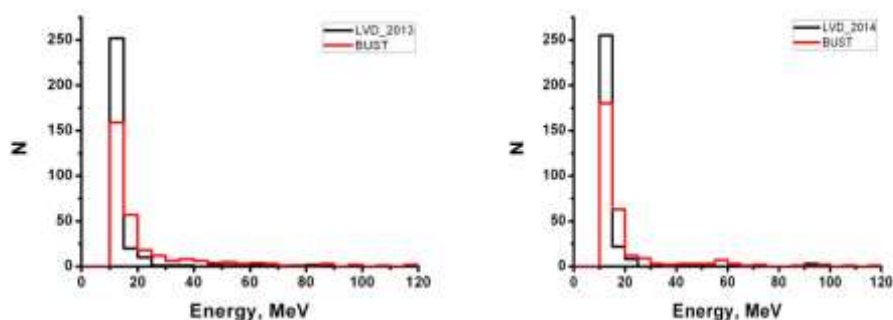


Рисунок 3.2.1.5 Энергетические распределения «нейтринных» событий в детекторах LVD и БПСТ за 2011-2014 годы.

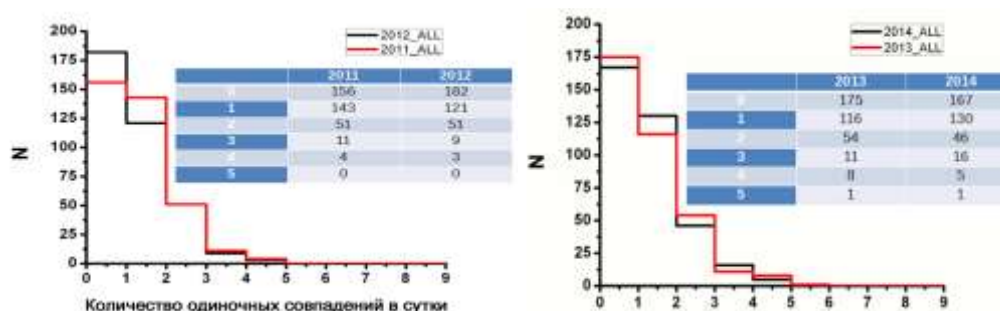


Рисунок 3.2.1.6 Распределение количества одиночных совпадений в сутки за 2011-2014 годы.

Из представленных распределений количества одиночных совпадений в сутки легко видеть, что средний темп счёта совпадений составляет менее одного совпадения в сутки. Из приведённых результатов также видно, что 4 совпадения в сутки было зафиксировано двадцать раз в течение 4-лет, 5 совпадений – только 2 раза. При этом 23 февраля 1987 года в течение 2-х часов было зафиксировано 13 аналогичных совпадений между «нейтринными» событиями детекторов LSD (фактически, LSD – это прототип детектора LVD) и БПСТ. Такое значительное превышение фона может быть расценено, как взаимодействия нейтрино детекторах.

3.2.2 ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ НЕЙТРИНО НА УСТАНОВКАХ LVD И OPERA В ПОДЗЕМНОМ КОМПЛЕКСЕ ГРАН-САССО

3.2.2.1 Измерение сезонных вариаций нейтронов, генерируемых мюонами

Сезонные вариации потока мюонов существуют как на уровне моря, так и под землей. Эти вариации вызываются температурным и барометрическим эффектами, связанными с изменениями высоты и плотности атмосферы летом и зимой. Температурный эффект влияет на генерацию мюонов в верхних слоях атмосферы, барометрический – на выживание мюонов в атмосфере. Для мюонов больших энергий (~ 280 ГэВ), которые мы регистрируем под землёй, наблюдается положительный температурный эффект. Это связано с тем, что больших глубин достигают, главным образом, мюоны от распадов пионов первого поколения генерации, число которых увеличивается при расширении атмосферы и падении её плотности в верхних слоях (на высоте ~ 20 км).

На LVD была получена амплитуда вариаций интенсивности потока мюонов $\delta I_\mu = 1.5\%$ за 8 лет наблюдений (M. Selvi for LVD Coll., Proc. of 31 ICRC, 2009). Мюоны, проходя через детектор LVD генерируют ядерные и электромагнитные ливни, в составе которых рождаются нейтроны за счет процессов πA -взаимодействия (ядерные ливни) и γA -взаимодействия (электромагнитные ливни). Нейтроны замедляются в сцинтилляционных счётчиках и захватываются либо протонами $n + p \rightarrow d + \gamma$ с излучением γ -кванта 2.2 МэВ, либо железом $n + \text{Fe} \rightarrow \text{Fe} + \gamma$ со средней энергией ~ 8 МэВ. Время жизни нейтрона в сцинтилляторе детектора ~ 180 микросекунд. Триггером для регистрации нейтронов является энерговыделение мюона в детекторе более 50 МэВ. Триггер открывает временные ворота длительностью 1 мсек для регистрации γ -квантов с энергией $E_\gamma > 0.5$ МэВ. В эксперименте отбирались мюоны, прошедшие более чем через два внутренних счетчика детектора с энерговыделением $E_{tr} > 50$ МэВ в каждом. Число нейтронов определялось в этих же счётчиках.

При анализе данных по изучению сезонных вариаций нейтронов использовалась величина N_n/N_{tr} (удельное число нейтронов), N_n – количество регистрируемых нейтронов в счетчике, N_{tr} – число триггеров в данном счетчике. Введение такой величины позволяет при определении амплитуды вариаций не учитывать аксептанс установки, эффективность регистрации нейтронов, пробелы в данных при краткосрочных отключениях счетчиков.

Мы использовали два метода определения амплитуды вариации нейтронов: метод наложения эпох и разностный метод.

Были проанализированы мюонные события во внутренних счетчиках трех башен LVD за 15 лет наблюдений с 2001 по 2016 год. Определялось число мюонных триггеров на 1 счетчик в течение месяца ($N_{\mu} = N_{tr}$), а также число нейтроноподобных импульсов (N_{tot}) с энергией 1 – 12 МэВ во временном интервале 50 – 350 мкс после триггера. Фоновыми считались импульсы (N_{bg}) с энергией 1 – 12 МэВ во временном интервале 450 – 750 мкс. Удельное число нейтронов $N_n/N_{tr} = (N_{tot} - N_{bg})/N_{tr}$ было определено для каждого месяца в период с 2001 по 2016 г. Амплитуду модуляции $\delta N_n/N_n$ с достаточной точностью можно установить методом «наложения эпох»: при этом годовичные данные за пятнадцать лет наблюдений накладываются друг на друга (Рис.3.2.2.1). При фитировании данных уравнением $N(t) = 1 + \delta N_n/N_n \times \cos(2\pi(t - \varphi)/T)$ для фиксированного $T = 12$ (месяцев) было получено $\delta N_n/N_n = 0.072 \pm 0.007 \pm 0.014$. Полученная фаза $\varphi = 7 \pm 1$ месяца соответствует максимуму величины N_n/N_{tr} .

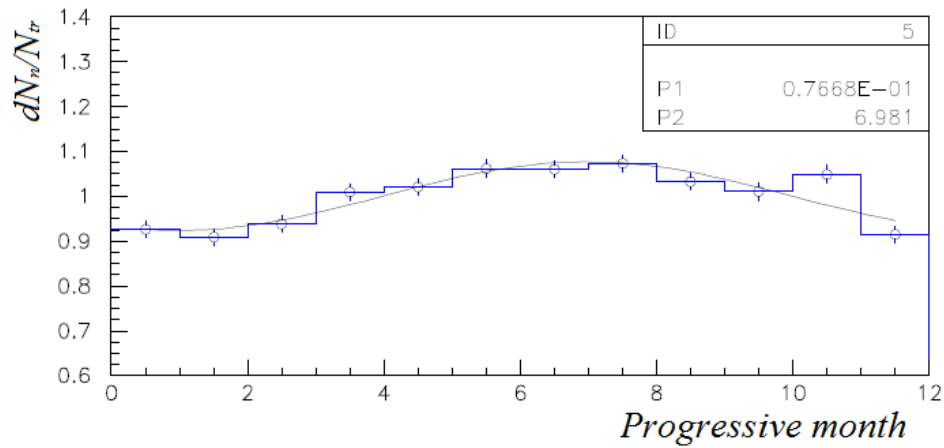


Рисунок 3.2.2.1 Распределение dN_n/N_{tr} в месяц, метод «наложения эпох».

Большая статистика позволила с хорошей точностью определить число нейтронов, рожденных мюонами в летние и зимние месяцы в течении 15 лет. Для этого использовались временные распределения нейтроноподобных импульсов с энергосодержанием от 1 до 12 МэВ во временном интервале 50 – 550 мкс после мюонного триггера за 45 летних (июнь, июль, август) и 45 зимних (декабрь, январь, февраль) месяцев. Временные распределения аппроксимировались законом $N_n(t) = N_0 \cdot \exp(-t/\tau_{ay}) + B$, где $\tau_{ay} = 170$ мкс – экспонента захвата термализованного нейтрона в сцинтилляторе, B – константа, зависящая от фоновых условий счетчика, $N_0 \cdot \tau$ – полное число нейтронов.

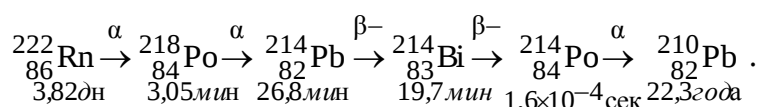
Было получено, что удельное число нейтронов в расчете на счетчик составляет летом – $N_n/N_{tr}^s = 45566/10464715 = 4.35 \times 10^{-3}$, зимой – $N_n/N_{tr}^w = 37703/10006669 = 3.77 \times 10^{-3}$. Амплитуда вариаций ($\delta N_n/N_n$) определялась как разница удельного числа нейтронов летом (s) и зимой (w), деленная на среднее значение: $\delta N_n/N_n = (N_n/N_{tr}^s - N_n/N_{tr}^w)/(N_n/N_{tr}^s + N_n/N_{tr}^w)$. Была получена величина $\delta N_n/N_n = 0.072 \pm 0.002$ (стат) ± 0.016 (сис).

Таким образом, двумя методами установлено наличие сезонных вариаций нейтронов в расчете на мюон.

3.2.2.2 Отклик детектора LVD на разрушительные землетрясения в Италии в 2016 году

Исследования по выявлению связи поведения радоновых полей с сейсмической активностью проводятся во всем мире. В ряде работ были получены указания на связь эманации радона с готовящимися и происходившими сейсмическими событиями. Но низкая статистическая обеспеченность и противоречивость имеющихся на сегодня результатов не позволяет установить закономерности изучаемых явлений и использовать радоновые данные для достоверного прогноза землетрясений. В качестве экспериментальной базы, обычно, используются детекторы небольших размеров, производящие точечные замеры концентрации радона, как правило, по альфа-активности дочерних ядер радона. На показания радометров существенное влияние оказывают вариации концентрации радона, связанные с локальными выбросами радона, колебаниями температуры среды и перемешиванием воздуха.

Мониторинг концентрации радона возможен благодаря регистрации γ -квантов от распадов дочерних ядер радона $^{222}_{86}\text{Rn}$, период полураспада которого 3,8 дня. Наиболее вероятна следующая цепочка радиоактивных распадов:



Гамма-излучение создается, в основном, ядрами $^{214}_{83}\text{Bi}$, за счёт β -распада превращающимися в $^{214}_{84}\text{Po}$ с характерным временем $\tau=19.7$ мин. Энергетический спектр γ -излучения охватывает диапазон от 0.6 до 2.44 МэВ.

Инжекция радона в атмосферу помещения происходит как непосредственно из грунта, так и из воды, которая насыщается радоном на пути через горную породу до подземного зала, где находится установка. Радон накапливается в грунте в результате деления и распадов элементов уран-радиевого ряда и выходит в атмосферу и в водонесущие русла через множественные микротрещины в грунте.

На установке LVD ведется мониторинг концентрации Rn под землей. Изменение концентрации Rn тесно связано с сейсмической активностью. Под сейсмической активностью надо понимать и происходящие землетрясения, и техногенные факторы, проводящие к ускоренному выходу Rn.

Большая регистрирующая поверхность детекторов делает измерения независимыми от локальных вариаций концентрации радона. Постоянство температуры подземных помещений позволяет исключить значительные температурные вариации

концентрации радона. Действие вентиляции в помещениях всякий раз приводит темп счета установок к обычному уровню (в момент выбросов радона темп счета повышается примерно в 1.5 – 2 раза).

В результате анализа данных установки LVD по низкоэнергетическому порогу ($E > 0.5$ МэВ) была установлена зависимость концентрации радона в подземном зале от ежедневной работы специалистов на установках Лаборатории. Изменение концентрации R_n тесно связано с сейсмической активностью и техногенными факторами, проводящими к ускоренному выходу R_n из грунта (особенно в условиях осадочных пород). Также на концентрацию влияет открывание и закрывание дверей в зале. На рисунке 2.2 приведен темп счета низко-энергичных импульсов за 1 неделю полученный методом «наложения эпох» в 2016 году. Увеличение концентрации связано с началом рабочего времени и достигает максимума ($C_{\text{буд}} \approx 43.6$) в обеденное время, когда сотрудники выходят и заходят в зал во время перерыва на обед. Минимум концентрации приходится на ночное время и на выходные дни ($C_{\text{вых}} \approx 42.3$). Минимальной концентрации соответствует постоянное равновесное (между эманацией из горной породы и воды, с одной стороны, и вентиляцией – с другой), значение ≈ 25 Вк/м³.

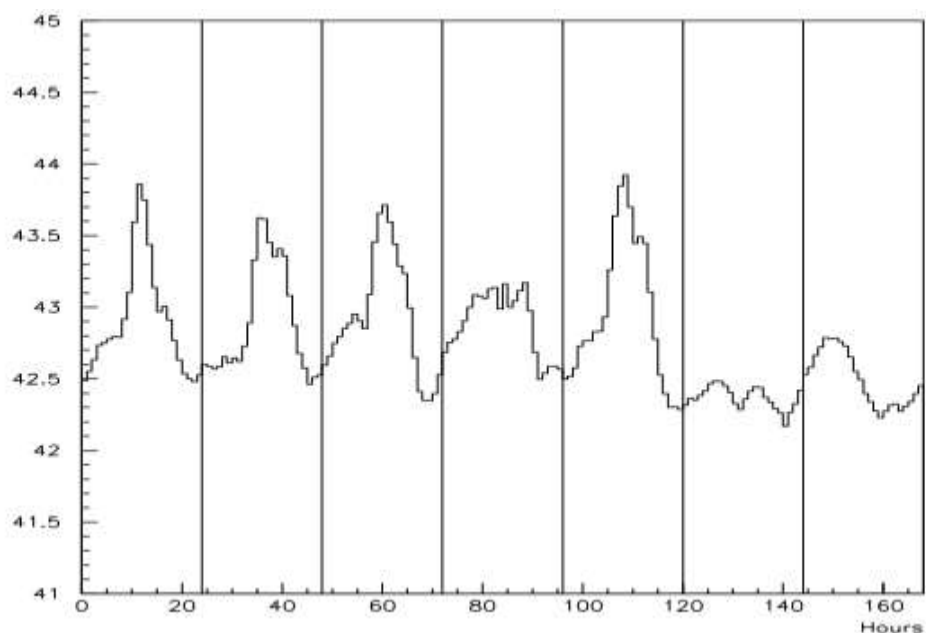


Рисунок 3.2.2.2 Средний темп счёта низкоэнергетических импульсов в час приведённый на 1 счётчик.

Темп счёта по низкоэнергетичному каналу измеряется всеми внутренними счетчиками LVD (80 х 3 башни = 240 счетчиков). Полная эффективная регистрирующая поверхность для каждой башни составляет 120м², которой "просматривается" объём воздуха ~ 60 м³. Фоновый темп счёта счётчиков измеряется автоматически в течение 10 сек. через каждые 10 мин. Количество отсчётов, обусловленных радоном, от 80 счётчиков

составляет 3600 за 10 сек. Это задаёт чувствительность метода 5% на уровне 3σ , т. е. За 10^{ти}-секундный интервал измерений установкой будет замечено 5% отклонение концентрации с достоверностью $\approx 98\%$.

Быстродействие метода (10 сек.) является уникальным, оно даёт возможность с высокой точностью фиксировать все детали временных изменений концентрации Rn .

Существует база данных Итальянского института геофизики и вулканологии с информацией о всех землетрясениях на Аппенинском полуострове (<http://cnt.rm.ingv.it/>). Она содержит время, координаты, магнитуду и глубину землетрясения. Данные землетрясений за 2016 год с магнитудой больше 4.0 баллов на территории Италии представлены в табл. 3.2.2.1.

Таблица 3.2.2.1 Данные землетрясений

Дата, время (UTC)	Магнитуда	Место	Глубина	Широта	Долгота
2016-12-11 12:54:52	4.3	Macerata	8	42.90	13.11
2016-12-09 12:56:59	4.5	Costa Croata meridionale (CROAZIA)	7	43.43	16.33
2016-12-09 07:21:50	4.0	Reggio nell'Emilia	8	44.33	10.50
2016-11-29 16:14:02	4.4	L'Aquila	11	42.53	13.28
2016-11-14 01:33:43	4.0	Macerata	11	42.86	13.16
2016-11-12 14:43:33	4.1	Rieti	10	42.72	13.21
2016-11-03 00:35:01	4.7	Macerata	8	43.03	13.05
2016-11-01 07:56:39	4.8	Macerata	10	43.00	13.16
2016-10-31 07:05:44	4.0	Perugia	10	42.84	13.13
2016-10-31 03:27:40	4.0	Perugia	11	42.77	13.09
2016-10-30 18:21:09	4.0	Perugia	10	42.79	13.15
2016-10-30 13:34:54	4.1	Perugia	9	42.80	13.17
2016-10-30 12:07:00	4.5	Perugia	10	42.84	13.08
2016-10-30 11:58:17	4.0	Perugia	10	42.84	13.06
2016-10-30 11:21:08	4.0	Macerata	8	43.07	13.07
2016-10-30 08:35:58	4.3	Perugia	10	42.83	13.08
2016-10-30 07:34:47	4.0	Macerata	10	42.92	13.13

Дата, время (UTC)	Магнитуда	Место	Глубина	Широта	Долгота
2016-10-30 07:13:05	4.5	Rieti	11	42.69	13.23
2016-10-30 07:08:35	4.3	Rieti	10	42.71	13.14
2016-10-30 07:07:53	4.2	Rieti	10	42.72	13.19
2016-10-30 07:06:45	4.1	Perugia	10	42.87	13.06
2016-10-30 07:05:56	4.1	Perugia	9	42.80	13.16
2016-10-30 07:04:59	4.0	Perugia	10	42.83	13.06
2016-10-30 07:01:32	4.0	Ascoli Piceno	9	42.78	13.22
2016-10-30 07:00:40	4.1	Perugia	10	42.88	13.05
2016-10-30 06:56:05	4.2	Perugia	11	42.80	13.11
2016-10-30 06:55:54	4.1	Ascoli Piceno	11	42.75	13.23
2016-10-30 06:55:41	4.1	Rieti	11	42.71	13.20
2016-10-30 06:44:30	4.6	Perugia	8	42.86	13.09
2016-10-30 06:43:08	4.0	Perugia	10	42.77	13.14
2016-10-30 06:41:17	4.3	Perugia	9	42.77	13.14
2016-10-30 06:40:17	6.5	Perugia	9	42.83	13.11
2016-10-29 16:24:33	4.1	Perugia	11	42.81	13.10
2016-10-29 11:58:04	4.3	Cosenza	276	39.95	15.84
2016-10-28 20:02:43	5.7	Tirreno Meridionale (MARE)	481	39.27	13.55
2016-10-27 17:22:22	4.2	Perugia	9	42.84	13.10
2016-10-27 08:21:45	4.3	Perugia	9	42.87	13.10
2016-10-27 03:50:24	4.1	Macerata	9	42.98	13.12
2016-10-27 03:19:27	4.0	Macerata	9	42.84	13.14
2016-10-26 21:42:01	4.5	Macerata	10	42.86	13.12
2016-10-26 19:18:05	5.9	Macerata	8	42.91	13.13
2016-10-26 17:10:36	5.4	Macerata	9	42.88	13.13
2016-10-16 09:32:35	4.0	Rieti	9	42.75	13.18
2016-09-03 10:18:51	4.3	Macerata	8	42.86	13.22

Дата, время (UTC)	Магнитуда	Место	Глубина	Широта	Долгота
2016-09-03 01:34:12	4.2	Perugia	9	42.77	13.13
2016-08-28 15:55:35	4.2	Ascoli Piceno	9	42.82	13.23
2016-08-27 02:50:59	4.0	Ascoli Piceno	8	42.84	13.24
2016-08-26 04:28:25	4.8	Rieti	9	42.61	13.29
2016-08-25 12:36:05	4.4	Rieti	8	42.60	13.28
2016-08-25 03:17:16	4.3	Rieti	9	42.75	13.19
2016-08-24 23:22:05	4.0	Rieti	12	42.65	13.21
2016-08-24 17:46:09	4.2	Rieti	10	42.66	13.22
2016-08-24 11:50:30	4.5	Perugia	10	42.82	13.16
2016-08-24 04:06:50	4.4	Perugia	6	42.77	13.12
2016-08-24 03:40:10	4.1	Rieti	11	42.61	13.24
2016-08-24 02:33:28	5.4	Perugia	8	42.79	13.15
2016-08-24 01:56:00	4.3	Rieti	8	42.60	13.28
2016-08-24 01:37:26	4.5	Rieti	9	42.71	13.25
2016-08-24 01:36:32	6.0	Rieti	8	42.70	13.23
2016-05-30 20:24:20	4.1	Terni	8	42.70	11.98
2016-04-09 07:23:37	4.3	Mar Ionio Meridionale (MARE)	20	37.74	19.83
2016-03-06 08:12:36	4.0	Mar Ionio Settentrionale (MARE)	39	38.20	16.74
2016-02-14 14:51:31	4.5	Costa Croata meridionale (CROAZIA)	20	43.00	17.45
2016-02-08 15:35:43	4.2	Siracusa	7	36.97	14.87
2016-01-16 18:55:11	4.3	Campobasso	10	41.53	14.60
2016-01-13 17:01:29	4.1	Canale di Sicilia meridionale (MARE)	15	36.07	14.79
2016-01-06 18:44:44	4.1	Golfo di Policastro (Salerno, Potenza)	286	39.84	15.60
2016-01-02 12:36:26	4.2	Canale di Sicilia meridionale (MARE)	29	36.46	11.98

Дата, время (UTC)	Магнитуда	Место	Глубина	Широта	Долгота
2015-12-20 09:46:03	4.2	Costa Siciliana centro settentrionale (Palermo)	23	38.34	13.57

Были проанализированы все данные детектора LVD за 2016 год.

Постоянное слежение за темпом счета (CR) установки показало, что перед крупными землетрясениями в центральной Италии наблюдается увеличение CR примерно за 3 дня. На рисунке 3.2.2.3 приведено распределение темпа счета в период с 17 по 30 августа (с 230 по 244 день от начала года). На рисунке 3.2.2.4 приведено распределение темпа счета в период с 19 октября по 2 ноября (с 293 по 307 день от начала года). Черточками указано время землетрясений, произошедших в 60 километрах от установки 24 августа 2016 и 26 и 30 октября 2016.

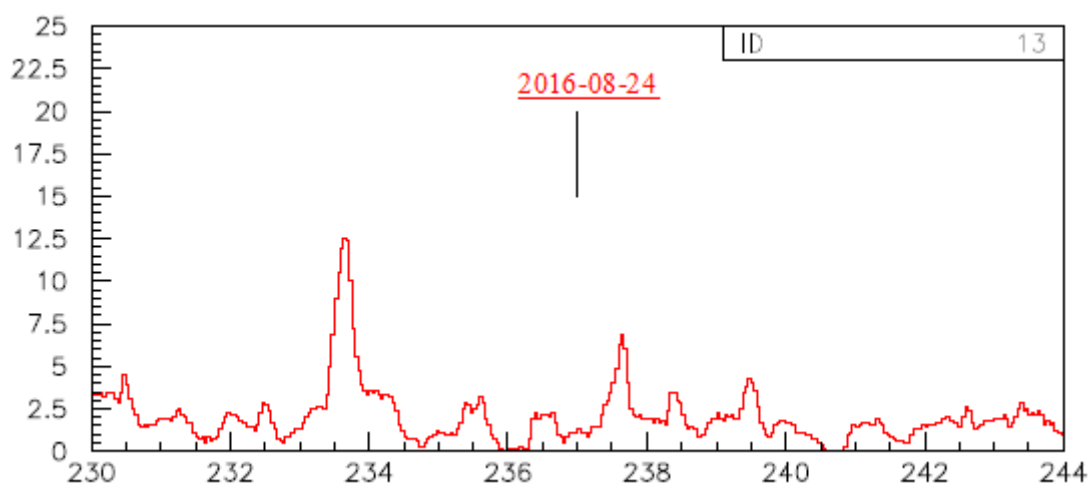


Рисунок 3.2.2.3 Темп счёта установки в час за вычетом фона. По оси ординат – номер дня с начала 2016 года.

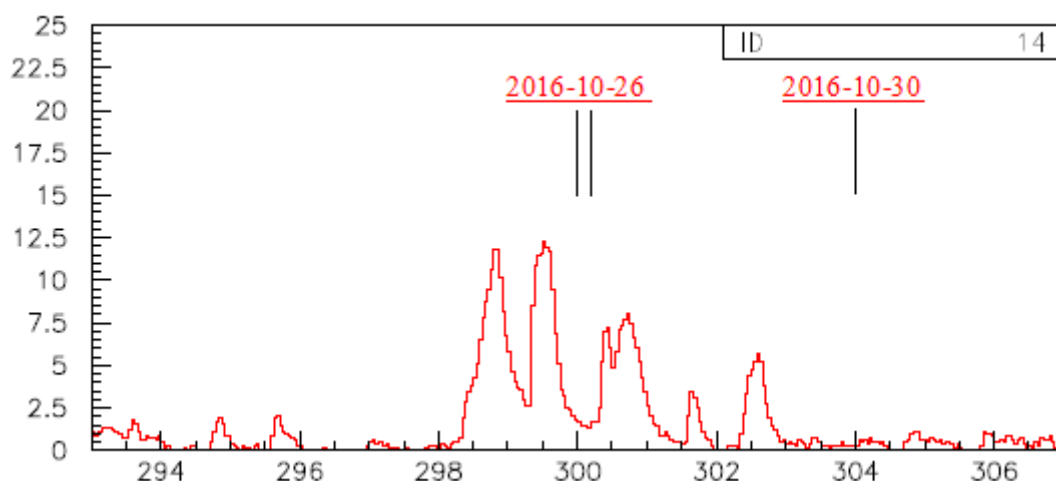


Рисунок 3.2.2.4 Темп счёта установки в час за вычетом фона. По оси ординат – номер дня с начала 2016 года.

Пики, превышающие средний темп счета в примерно 5 раз, наблюдались 19 августа (за 4 дня до землетрясения 24.08), 24 октября (за 1.5 – 2 дня до землетрясения 26.10) и 26 октября (за 4 дня до землетрясения 30.10).

3.2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сотрудники подразделения принимали участие в работах по выполнению Государственного задания на 2015 год, включающего проекты по целевым программам РАН «Фундаментальные свойства материи и астрофизика», по выполнению гранта РФФИ 15-02-01056_a «Поиск нейтринного излучения от коллапсов звезд и изучение космических лучей, продуктов их взаимодействия на подземных детекторах ИЯИ РАН и Лаборатории LNGS» 2012-2014, по выполнению проекта по международному соглашению о Научно-исследовательской работе российских научных групп в Национальной лаборатории Гран Сассо (Италия) направление: «Физика космических лучей и редких распадов».

В рамках Госзадания на 2017 год планируются работы по поддержанию установок LVD и АСД в работоспособном состоянии для обеспечения научных программ экспериментов; обработка информации по поиску всех типов нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд на детекторах АСД и LVD. Изучение потоков всех типов нейтрино при условии вспышки Сверхновой в Галактике, либо установление предела на частоту коллапсов. Совместный анализ данных нейтринных телескопов ИЯИ РАН. Поиск совпадений временных кластеров одиночных событий и поиск случайных совпадений на детекторах LVD, БПСТ, АСД; Поиск редких событий из накопленного материала детекторов LVD и АСД период 2001 – 2017 г.

Работы на эксперименте LVD (дежурства на установке, регламентные работы) и обработка экспериментальных данных; Изучение фона, создаваемого мюонами

космических лучей и естественной радиоактивностью (LVD); Изучение генерации нейтронов мюонами к.л. в различных веществах, входящих в состав детекторов и защиты; Изучение сезонных вариаций мюонов и нейтронов за всю историю работы детектора LVD (1992-2017).

3.2 ПУБЛИКАЦИИ

Оригинальные статьи за 2016

1. К.В. Мануковский, О.Г. Рязская, Н.М. Соболевский, А.В. Юдин, "Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных веществах", ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2016, том 79, №4, с. 417–426; K. V. Manukovsky, O.G.Ryazhskaya, N. M. Sobolevsky and A. V. Yudin, "Neutron Production by Cosmic-Ray Muons in Various Materials", Physics of Atomic Nuclei, 2016, Vol. 79, No. 4, pp. 631–640.
2. А.С. Мальгин, "Выход космогенных нейтронов под землей: измерения и расчеты", Препринт ИЯИ РАН, 1420/2016 стр. 52 (2016)
3. V A Berezin, V.S. Berezinskii, V.N. Gavrin, A.D. Dolgov, G.V. Domogatskii, L.V. Kravchuk, N.V. Krasnikov, V.A. Matveev, V.A. Rubakov, O.G. Ryazhskaya, I.I. Tkachev, M.E. Shaposhnikov "In memory of Vadim Alekseevich Kuzmin", Physics - Uspekhi 59 (4) 421 - 422 (2016)
4. N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration) "Determination of the muon charge sign with the dipolar spectrometers of the OPERA experiment", Journal of Instrumentation, Volume 11, July 2016 (2016_JINST_11_P07022)

Опубликованные Труды конференций

1. A Di Crescenzo on behalf of the OPERA Collaboration, "Search for sterile neutrino mixing in the muon neutrino to tau neutrino appearance channel with the OPERA detector", Journal of Physics: Conference Series 718 (2016) 062016, (4pages)
2. N Di Marco for the OPERA Collaboration, "Results from the OPERA experiment in the CNGS beam", Journal of Physics: Conference Series 718 (2016) 062017, (5 pages)
3. O G Ryazhskaya, "Study of the penetrating component of cosmic rays underground using large scintillation detectors", Journal of Physics: Conference Series 718 (2016) 052036, (5 pages)
4. T. Fukuda on behalf of the OPERA Collaboration, "Discovery of ν_τ Appearance and Recent Results from OPERA", arXiv:1606.04632
5. Donato Di Ferdinando on behalf of OPERA Collaboration "Results from the OPERA experiment", NuPhys2015, arXiv:1608.01595
6. OPERA Collaboration (F. Pupilli (Frascati) for the collaboration) "Recent results of the OPERA experiment" . 2016. 5 pp. Published in AIP Conf. Proc. 1743 (2016) 060004

7. OPERA Collaboration (Masahiro Komatsu (Nagoya U.) for the collaboration), "Latest results on $\nu_m \rightarrow \nu_t$ oscillations from the OPERA experiment" 2016. 5 pp. Published in Nucl. Part. Phys. Proc. 273-275 (2016) 1865-1869
8. OPERA Collaboration (N. Mauri (Bologna U. & INFN, Bologna) for the collaboration), "Measurement of the TeV atmospheric muon charge ratio with the full OPERA data set" 2016. 7 pp. Published in Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 399-405
9. OPERA Collaboration (Pablo del Amo Sanchez (Annecy, LAPP) for the collaboration), "Short-lived particle search procedure in the OPERA experiment. Application to charm decays". 2016. 3 pp. Published in Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 2651 - 2653 DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2015.10.019
10. OPERA Collaboration (M. Tenti (Bologna U. & INFN, Bologna) for the collaboration), "Search for $\nu_m \rightarrow \nu_e$ oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam", 2016. 3 pp. Published in Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 2627-2629
11. N.Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, M.M. Boliev, V.V. Volchenko, V.L. Dadykin, I.M. Dzaparova, E.A. Dobrynina, R.I. Enikeev, M.M. Kochkarov, Yu.F. Novoseltsev, R.V.Novoseltseva, A.S. Malgin, V.B. Petkov, O.G. Ryazhskaya, I.R. Shakiryanova, V.F. Yakushev, A.F. Yanin and the LVD Collaboration "The search for coincidences of rare events using LVD and BUST detectors", in "Proceedings of the International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2015, pp.13-18, Publishing house "Sneg", Pyatigorsk, 2016.
12. Novoseltseva R.V., Boliev M.M., Dzaparova I.M., Kochkarov M.M., Novoseltsev Yu.F., Petkov V.B., Volchenko V.I., Volchenko G.V., Yanin A.F., N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, V. L. Dadykin, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, A. S. Malgin, O. G. Ryazhskaya, I. R. Shakiryanova, V. F. Yakushev, and the LVD Collaboration "Joint analysis of experimental data on the search for neutrino bursts using the BUST and LVD detectors" in "Proceedings of the International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2015, pp.85-90 Publishing house "Sneg", Pyatigorsk, 2016.
13. Zemskova S. and OPERA Collaboration $\nu_m \rightarrow \nu_e$ oscillations search in the OPERA experiment, Phys. Part. Nuclei (2016) 47: 1003, The International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics" February 1–February 8, 2015, Valday, Russia

Выступление на конференциях и семинарах

1. О.Г. Ряжская "Вступительное слово" Зацепинские чтения 2016, 27 мая 2016 г., ФИАН, Москва
2. Н.Ю. Агафонова (LVD Coll.) "Измерение сезонных вариаций удельного числа нейтронов, генерируемых мюонами под землей с помощью детектора LVD", оригинальный доклад, 15 - 19 августа, ВККЛ 2016 Дубна, Россия
3. Е.А. Добрынина (LVD Coll.) "Изучение низко-энергического фона в подземной лаборатории Гран Сассо с помощью детектора LVD", постерный доклад, 15 - 19 августа, ВККЛ 2016 Дубна, Россия
4. Н.Ю. Агафонова, О.Г. Ряжская "Современный статус эксперимента LVD", приглашенный доклад, 15 - 19 августа, ВККЛ 2016, Дубна, Россия
5. I. Shakyrianova (LVD Coll.) "Measurement of the cosmogenic neutron seasonal modulation with LVD", ECRS 2016, Torino, Italy (oral)
6. Н.Ю. Агафонова от имени коллаборации LVD «Сезонные вариации потока нейтронов, генерируемых мюонами, измеренные с помощью детектора LVD» 1131-й семинар "Нейтринная и ядерная астрофизика" им. Г.Т.Зацепина, 18 ноября 2016.
7. А.В. Юдин «Нейтринный сигнал от коллапсирующих сверхновых» 1134-й семинар "Нейтринная и ядерная астрофизика" им. Г.Т.Зацепина 16 декабря 2016
8. N. Agafonova (LVD Coll.) "Measurement of the cosmogenic neutron seasonal modulation with LVD", LVD meeting, Gran Sasso Laboratory, Italy, 15/12/2016

3.3 Лаборатория Лептонов высоких энергий ОЛВЭНА

3.3.1 Исследование анизотропии и вариаций космических лучей $10^{11} - 10^{20}$ эВ

Научный руководитель – А.С. Лидванский

Исполнители:

Н.С. Хаердинов (БНО),

Т.И. Тулупова (ЛЛВЭ),

М.Н. Хаердинов (ЛЛВЭ),

А.Н. Куреня (БНО)

Ю.С. Суровецкий (БНО)

Д.Д. Джаппуев (БНО)

А.У. Куджаев (БНО)

В.И. Волченко (БНО)

3.3.1 РЕФЕРАТ

В 2016 году проводились дальнейшие исследования вариаций космических лучей во время гроз и сопутствующих эффектов, ранее обнаруженных во время этих исследований на Баксанской нейтринной обсерватории, а также в рамках проекта Ковер-3 проводились работы по подготовке экспериментов в области гамма-астрономии.

3.3.1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

а) Гамма-астрономия.

За отчетный период установлены и настроены дополнительные сцинтилляционные детекторы, общая площадь которых в двух подземных туннелях доведена до 410 кв. м. Изготовлены блоки приемных каналов и отладочные устройства. Произведено пробное включение установки в новой конфигурации. Проведены расчеты ожидаемой эффективности регистрации первичных гамма-квантов для разных площадей мюонного детектора. Обработаны данные эксплуатации старой установки Ковер-2 за 9.2 лет чистого времени и получены предварительные верхние пределы на поток диффузных гамма-квантов космического происхождения при пороговой энергии 1.3 ПэВ.

б) Вариации космических лучей во время гроз и сопутствующие эффекты.

Во время грозового сезона 2016 г. проводилась работа по обеспечению регулярного функционирования внешних удалённых наблюдательных пунктов с видеокамерами. Вёлся непрерывный визуальный просмотр видеоматериала в сжатом режиме. Установлены дополнительные видео камеры в удалённых пунктах наблюдения, настроенные на регистрацию в цвете. На установке «Ковёр» организована систематическая регистрация интенсивности мюонов в трёх диапазонах зенитных углов.

Научные результаты:

1. Освоен метод регистрации вариаций интенсивности мюонов «плоской», горизонтальной установкой в зависимости от зенитного угла. Построен метод оценки основных параметров грозового поля по измеренным вариациям интенсивности мюонов под разными зенитными углами. Впервые, на основании изучения экспериментальных данных по вариациям интенсивности частиц, зондирующих грозовую атмосферу, получена количественная оценка разности потенциалов в стратосфере над локально распределённой активной грозовой областью.

2. Впервые зарегистрированы события непрерывного свечения атмосферы над грозовыми облаками, коррелирующие с аномальными возмущениями вторичных частиц космических лучей, отвечающими условиям электрического пробоя стратосферы в припороговом режиме лавинного размножения убегающих электронов. Цветовая гамма свечения – широкополосная. В зрительном восприятии преобладает зелёный цвет. Интенсивность фотонов в оптическом диапазоне максимальна в синем цвете. Инфракрасное свечение не обнаруживается. Характерная яркость свечения $10^{-4} - 10^{-3}$ [кд/м²], интенсивность фотонов $10^3 - 10^4$ [p]. Подтверждён факт плавного ограничения яркости этого свечения электрическими разрядами в атмосфере.

3. Зарегистрировано возмущение геомагнитного поля, произведённое дрейфовым током электронов, инжектированных в магнитосферу из атмосферы посредством «медленного пробоя стратосферы на убегающих электронах» в припороговом режиме, в процессе грозовой активности. До сих пор имелось лишь теоретическое указание на этот эффект и то лишь для импульсных высотных разрядов. Теперь имеется видео материал этого события и измерены параметры процесса: период обращения электронов вокруг Земли 12 мин, их средняя энергия в магнитосфере 3.6 МэВ.

4. Комплексом наземной измерительной аппаратуры 15.09.2013 зафиксирован факт взаимодействия грозового фронта с высыпанием протонов в атмосферу из радиационного пояса Земли, вследствие сейсмической активности. Это стало известно, в результате целенаправленного поиска сейсмического возмущения, объясняющего причины зарегистрированного ночного свечения.

3.3.1 ПУБЛИКАЦИИ

1. A.S. Lidvansky, N.S. Khaerdinov, The Baksan Experiment on Thunderstorm CR Variations: History, Results and Prospects, Proceed. of Intern. Symposium Thunderstorm Elementary Particle Acceleration (TEPA 2015), Nor Amberd, Armenia, October 5-9, 2015, Ed. by A. Chilingarian, Yerevan, 2016, pp. 35-40. ISBN 978-59941-0-712-4. INSPIRE C15-10-02, March 2016.

2. M.N. Khaerdinov, N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky, Angular Dependence of Anomalous Disturbances of Muon Intensity during Thunderstorms, Intern. Symposium Thunderstorm Elementary Particle Acceleration (TEPA 2015), Nor Amberd, Armenia, October 5-9, 2015, Ed. by A. Chilingarian, Yerevan, 2016, pp. 47-50. ISBN 978-59941-0-712-4. INSPIRE C15-10-02, March 2016

3. D.D. Dzhappuev, V.B. Petkov, A.U. Kudzhaev, N.F. Klimenko, A.S. Lidvansky, S.V. Troitsky, Search for Cosmic Gamma Rays with the Carpet-2 EAS Array: Prospects and Preliminary Results, in "Proceedings of the International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2015, pp. 30-36. Publishing house "Sneg", Pyatigorsk, 2016.

4. A.S. Lidvnsky, On Burst Activity of the Crab Nebula and Pulsar at High and Ultra-High Energies, in "Proceedings of the International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2015, pp. 63-68. Publishing house "Sneg", Pyatigorsk, 2016.

Доклады на конференциях:

1. А.С. Лидванский, Вариации космических лучей во время гроз и новые геофизические эффекты, «Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц», 9-е Черенковские чтения, Москва, ФИАН, 19 апреля 2016 г.

2. А.С. Лидванский, Вариации космических лучей во время гроз и новые геофизические эффекты, 7-е Зацепинские чтения, Москва, ФИАН, 27 мая 2016 г.

3. А.С. Лидванский, Космические лучи в грозовой атмосфере: эксперимент, данные, интерпретация, 34 ВККЛ, Дубна, 15-19 августа 2016 г. Приглашенный доклад.

4. Д.Д. Джаппуев, В.Б. Петков, А.С. Лидванский, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, Е.А. Горбачева, И.М. Дзапарова, А.У. Куджаев, Н.Ф. Клименко, А.Н. Куреня, О.И. Михайлова, К.В. Птицына, М.М. Хаджиев, А.Ф. Янин, Эксперимент «Ковер-3» – поиск диффузного гамма-излучения с энергией свыше 100 ТэВ, 34 ВККЛ, Дубна, 15-19 августа 2016 г.

5. К.Х. Канониди, А.Н. Куреня, А.С. Лидванский, М.Н. Хаердинов, Н.С. Хаердинов, Грозовые эффекты по данным комплексного исследования вариаций вторичных частиц космических лучей, 34 ВККЛ, Дубна, 15-19 августа 2016 г.

6. М.Н. Хаердинов, Н.С. Хаердинов, А.С. Лидванский, Метод определения основных параметров грозового поля по вариациям мюонов регистрируемых горизонтальной установкой, 34 ВККЛ, Дубна, 15-19 августа 2016 г.

7. A.S. Lidvansky, Burst Activity of the Crab Nebula and Its Pulsar at High and Ultra-High Energies, 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions 22 - 27 August 2016, Moscow.

8. A.S. Lidvansky for the Carpet-3 collaboration, The Carpet-3 experiment to search for diffuse gamma-ray emission with energy above 100 TeV, The Lake Baikal Three Messenger Conference, August 29- September 3, 2016.

3.3.2 Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO

Научный руководитель темы - Ю.В. Стенькин

Исполнители:

Стенькин Ю.В. (ЛЛВЭ)

Алексеев В.В. (БНО)

Волченко В.И. (БНО)

Джаппуев Д.Д. (БНО)

Куджаев А.У. (БНО)

Михайлова О.И. (БНО)

Рулёв В.В. (ЛЛВЭ)

Степанов В.И. (ЛЛВЭ)

Лаконин А.А. (студент МИФИ)

Багрова А.С. (студентка МИФИ)

Щеголев О.Б. (аспирант ИЯИ, с 01.09.16 мнс ЛЛВЭ)

3.3.2 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования по второй из этих тем включали, с одной стороны, исследования фоновых потоков тепловых нейтронов в разных лабораториях и с другой стороны, работы по созданию и развертыванию установок для изучения широких атмосферных ливней.

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

В 2016 г. проводились организационно-методические работы, а также набор и обработка экспериментальных данных, полученных с помощью разработанных нами нейтронных детекторов (ЭН-детекторов) по теме.

1). С помощью нашей глобальной сети из ЭН-детекторов в 2016 г. были получены следующие новые данные по изучению вариаций нейтронных фоновых потоков в различных геофизических условиях:

- На основе обнаруженного в предыдущем году нового явления: спорадического существенного возрастания нейтронного потока в подземном помещении, связанного с продолжительным падением атмосферного давления, была подготовлена к печати журнальная статья под названием «Подземная физика и эффект влияния барометрического давления на подземный фоновый поток тепловых нейтронов». Статья будет напечатана в ЖЭТФ в №4 за 2017 г.

- По данным установки ARGO-YBJ в Тибете обнаружен долговременный тренд роста природного нейтронного фона на уровне около 4% в год за последние 3 года, который связан, по-видимому, с очередным циклом солнечной активности. Эти результаты были доложены на 34-й Всероссийской конференции по космическим лучам и приняты в печать в Известия РАН, серия физическая, а также на Международном Симпозиуме ISVHECRI-2016 и будут опубликованы в European Phys. Journal в 2017.

2) По программе изучения Широких атмосферных ливней (ШАЛ):

- Совместно с ЗАО «Люминофор» разработан новый светосостав ЛРБ-2 (сцинтиллятор) на основе натурального бора для регистрации тепловых нейтронов. Полученный светосостав по свойствам не уступает применявшемуся ранее литиевому светосоставу с обогащением по литию-6 до 90%, а по цене в 5 раз ниже. Изготовлена пробная партия этого светосостава и на его основе изготовлены 2 эн-детектора, площадью по 0.36 кв. м.

- Китайской стороной принято решение о финансировании создания полноценного прототипа из 3-х кластеров по 16 эн-детекторов будущей установки PRISMA-LHAASO в Тибете на высоте 4400 м над уровнем моря. Уже размещены заказы на поставку оборудования и комплектующих. В октябре 2016 г. первый кластер был собран и включен в режим тестового набора данных в Хэбейском нормальном университете. Идет отладка системы сбора данных.

- Кроме того было принято решение о создании двух компактных установок по 2 эн-детектора для изучения фоновых потоков тепловых нейтронов: в Лхасе (Тибетский университет). Начато их создание. Обе установки должны заработать в начале 2017 г.

- На установках PRISMA-YBJ и PRISMA-32 проводился непрерывный набор и анализ данных, как по изучению ШАЛ, так и вариаций фоновых потоков тепловых нейтронов на двух существенно различных уровнях наблюдения: 4300 м и уровень Москвы. Проведенные монте-карловские расчеты показали хорошее согласие с экспериментом. Показано, что спектр ШАЛ по числу нейтронов в ПзВной области первичных энергий имеет чисто степенной вид с интегральным показателем спектра близким к -1.95 . Измерены функции пространственного распределения электронов и

нейтронов в ШАЛ. По этим результатам были подготовлены доклады на конференциях и опубликованы и приняты в печать в журналы 4 статьи.

- Закончен анализ совместного с установкой ARGO-YBJ сеанса набора данных, продемонстрировавший адекватность разработанного нами нового метода изучения ШАЛ и достоверность абсолютной калибровки эн-детекторов по электромагнитной компоненте ШАЛ. Подготовленная совместно с коллаборацией ARGO-YBJ статья опубликована в журнале *Astroparticle Physics*.

В 2016 г. было опубликовано 4 статьи в журналах, 5 подготовлены и приняты в печать, Опубликовано 3 электронных препринта. Подготовлено 7 докладов на Международные конференции и 1 приглашенный доклад на Международный семинар WAPP-2016.

3.3 ПУБЛИКАЦИИ

1. Ю. В. Стенькин, В. В. Алексеенко, А.С. Багрова, В. И. Степанов, О. Б. Щеголев, С. Ма, Ш. Цюи, Ж. Жао. Долговременные вариации природного потока тепловых нейтронов на высоте 4300 м над уровнем моря. Известия РАН, серия физическая. (2017), в печати
2. Ю.В. Стенькин, О.Б. Щеголев от имени коллаборации PRISMA. Новый метод изучения химического состава космических лучей. Известия РАН, серия физическая. (2017), в печати
3. O B Shchegolev, V V Alekseenko, Z Y Cai, Z Cao, S W Cui, D M Gromushkin, X W Guo, H H He, Y Liu⁵, X Ma, Yu V Stenkin, V I Stepanov and J Zhao. Electron and thermal neutron lateral distribution functions in EAS at high altitude. *Journal of Physics: Conference Series* 718 (2016) 052038.
4. D M Gromushkin, F A Bogdanov, A A Petrukhin, O B Shchegolev, Yu V Stenkin, V I Stepanov, I I Yashin and K O Yurin. Temporal and lateral distributions of EAS neutron component measured with PRISMA-32. *JoP*, 2017, in press
5. Victor Alekseenko, Anastasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. Exotic geophysical phenomena observed in environmental neutron flux study using EAS PRISMA detectors. *EPJ, WoC*, (2017), in press
6. Victor Alekseenko, Anastasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. The PRISMA - LHAASO project: status and overview. *EPJ, WoC*, (2017), in press
7. O.B. Shchegolev, V.V. Alekseenko, D.M. Gromushkin, X. Ma, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, J. Zhao. Electron and thermal neutron lateral distribution functions in EAS at high altitude, *JoP*, 718 (2016) 052038.

8. B. Bartoli, P. Bernardini, X.J. Bi, et al. Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in extensive air showers selected by the ARGO-YBJ experiment. *Astroparticle Physics*, **81**, pp. 49–60 (2016).

9. О.Б. Щеголев, Ю.В. Стенькин. Функция пространственного распределения электронов и тепловых нейтронов в широких атмосферных ливнях на уровне моря. *Краткие сообщения по физике*. №7, (2016), сс. 24-31.

Препринты:

1. Yu. V. Stenkin, V.V. Alekseenko, D.M. Gromushkin, O.B. Shchegolev and V.P. Sulakov. Barometric pumping effect for radon-due neutron flux in underground laboratories. arXiv:1605.01283 [physics.geo-ph]

2. D. M. Gromushkin, F. A. Bogdanov, A. A. Petrukhin et al. Characteristics of EAS neutron component obtained with PRISMA-32 array. <http://arxiv.org/pdf/1612.09460>.

3. I.I.Yashin, N.S. Barbashina, A.A. Borisov, et al. New detectors of the Experimental complex NEVOD for multicomponent EAS detection. <http://arxiv.org/pdf/1612.09450>

Доклады на конференциях:

1. Ю.В. Стенькин, О.Б. Щеголев от имени коллаборации PRISMA. Новый метод изучения химического состава космических лучей. Доклад на 34 ВККЛ, (2016), Дубна

2. Ю. В. Стенькин, В. В. Алексеенко, А.С. Багрова, В. И. Степанов, О. Б. Щеголев, X. Ma, Sh. Cui, J. Zhao. Долговременные вариации природного потока тепловых нейтронов на высоте 4300 м над уровнем моря. Доклад на 34 ВККЛ, Дубна.

3. D M Gromushkin, F A Bogdanov, A A Petrukhin, O B Shchegolev, Yu V Stenkin, V I Stepanov, I I Yashin and K O Yurin. Temporal and lateral distributions of EAS neutron component measured with PRISMA-32. ISVHECRI-2016, Moscow.

4. Victor Alekseenko, Anastasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. Exotic geophysical phenomena observed in environmental neutron flux study using EAS PRISMA detectors. ISVHECRI-2016, Moscow.

5. Victor Alekseenko, Anastasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. The PRISMA - LHAASO project: status and overview. ISVHECRI-2016, Moscow.

6. D. M. Gromushkin, F. A. Bogdanov, A. A. Petrukhin et al. Characteristics of EAS neutron component obtained with PRISMA-32 array. ECRS-2016, Torino, Italy

7. I.I.Yashin, N.S. Barbashina, A.A. Borisov, et al. New detectors of the Experimental complex NEVOD for multicomponent EAS detection. ECRS-2016, Torino, Italy.

8. Yu.V. Stenkin. The PRISMA - LHAASO project: status and overview. Invited lecture. WAPP-2016, Ooty, India.

3.4 Лаборатория галлий-германиевого нейтринного телескопа БНО. Лаборатория радиохимических методов детектирования нейтрино ОЛВЭНА

3.4.1 Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель, заведующий лабораторией, чл.-корр.РАН В.Н.Гаврин

Исполнители:

Старший научный сотрудник, научный руководитель химико-технологической части работ на ГГНТ Е.П.Веретёнкин

Старший научный сотрудник, кфмн В.В.Горбачёв

Начальник установки Б.А. Комаров

Научный сотрудник Т.В.Ибрагимова

Научный сотрудник А.В.Калихов

Старший научный сотрудник, кфмн Ю.П.Козлова

Старший научный сотрудник, ктн И.Н.Мирмов

Младший научный сотрудник Ю.М. Малышкин

Ведущий инженер-технолог Н.Г.Хайрнасов

Научный сотрудник А.А.Шихин

3.4.1 РЕФЕРАТ

Отчет 9 с., 2 рис.

СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ СЧЕТЧИК

Объектом исследования является нейтринное излучение Солнца и подготовка условий для выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино. В 2015 году была создана специальная облучательная установка с каналом для ввода источника и размещением галлиевой мишени в двух независимых зонах, предназначенная для исследования осцилляционных свойств нейтрино на очень коротких расстояниях от высокоинтенсивного искусственного источника нейтрино, разработано и смонтировано дополнительное химико-технологическое оборудование и внедрены новые методики проведения измерений. В рамках выполнения НИР была проведена модернизация установки и всего химико-технологического комплекса ГГНТ и выполнены тестовые извлечения. В целях подготовки условий для выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино в 2016 году часть измерений скорости захвата солнечных нейтрино была выполнена на модернизированной установке с двухзонной галлиевой мишенью. Получены предварительные результаты скорости захвата для каждой зоны. Полученные результаты анализа измерений скорости захвата солнечных нейтрино на Установке согласуются в пределах статистических ошибок с измерениями на ГГНТ

3.4.1 ВВЕДЕНИЕ

Тема исследования нейтрино остается на первом плане в программах ведущих мировых научных центров. В нейтринных экспериментах изучаются взаимодействия нейтрино от всех доступных источников: от Солнца и звёзд, от ядерных реакторов и ускорителей частиц, от радиоактивных распадов во внутренних областях Земли и от искусственных высокоинтенсивных источников.

На Галлий-германиевом нейтринном телескопе (ГГНТ) в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН проводятся измерения нейтринного излучения от термоядерных реакций, протекающих в Солнце. Низкий порог захвата нейтрино на ^{71}Ga делает галлиевый эксперимент чувствительным к реакции протон-протонного синтеза, в которой генерируется подавляющая часть солнечной энергии. ГГНТ входит в мировую сеть подземных телескопов по исследованию потоков нейтрино от Солнца. В настоящее время в мире только два нейтринных телескопа имеют возможность вести мониторинг приходящего на Землю потока pp -нейтрино. Измерения, проводимые двумя независимыми методами и группами, значительно повышает достоверность получаемых результатов.

3.4.1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Измерения потока солнечных нейтрино в эксперименте SAGE на ГГНТ проводятся радиохимическим методом. Солнечные электронные нейтрино с энергией выше 233 кэВ захватываются ядрами мишени ^{71}Ga . Количество нейтринных взаимодействий определяется по числу распадов образующихся атомов ^{71}Ge .

Каждое измерение скорости захвата солнечных нейтрино в эксперименте начинается с добавления в галлиевую мишень носителя – стабильного германия (~210-250мкг), представляющего собой сплав галлия с известным количеством обогащенных по различным изотопам (^{76}Ge , ^{72}Ge , ^{70}Ge) германия, который равномерно распределяется в реакторах по всей массе галлия. В течение месяца происходит «облучение» галлиевой мишени солнечными нейтрино, по окончании экспозиции (около 30 дней) образовавшиеся атомы ^{71}Ge химически извлекаются из галлиевой мишени вместе с добавленным германиевым носителем и помещаются в миниатюрный пропорциональный счетчик, где регистрируются их распады. Процесс извлечения занимает около полутора суток, регистрация распадов – около шести месяцев.

Установка с двухзонной галлиевой мишенью (далее Установка) состоит из двух концентрических емкостей с цилиндрическим каналом для размещения источника в центре мишеней. Внутренняя зона - сфера, содержащая около 7,5 тонн галлия. Внешняя зона – цилиндр, содержащий около 42 тонн галлия.

Измерение скорости захвата на Установке отличается от измерений на ГГНТ следующими особенностями:

- перед солнечной экспозицией вносится в два раза больше носителя, по ~210-250 мкг в галлиевые мишени цилиндра и сферы;
- извлечение проводится отдельно из сферы и цилиндра с использованием отдельных технологических и транспортировочных систем, что несколько удлиняет время процесса;
- извлеченные из галлиевых мишеней цилиндра и сферы атомы ^{71}Ge помещаются в индивидуальные пропорциональные счетчики, счет проводится отдельно.

В соответствии с программой ежемесячных измерений скорости захвата солнечных нейтрино в 2016 году выполнено 12 извлечений. С января по май в период модернизации, измерения проводились на ГГНТ, с июня месяца измерения проводились на Установке. В предварительные результаты вошли 5 извлечений из ГГНТ и 5 извлечений из Установки (ноябрь и декабрь не вошли в анализ по причине кратковременного счета).

Предварительные результаты анализа измерений 2016 года (в результатах приводятся только статистические ошибки).

Величина скорости захвата из 5 измерений на ГГНТ составляет $66.0^{+16.3}_{-14.9}$ SNU.

Величина скорости захвата из 5 измерений на Установке составляет:

$31.1^{+17.2}_{-17.9}$ SNU - из 42-тонной галлиевой мишени внешнего цилиндра

$92.3^{+84.1}_{-73.7}$ SNU - из 7-тонной галлиевой мишени внутренней сферы

$33.9^{+17.5}_{-16.6}$ SNU - объединенный результат для сферы и цилиндра

Полученные величины скорости захвата из измерений в зонах Установки и на ГГНТ согласуются в пределах ошибок.

Предварительная величина скорости захвата солнечных нейтрино на галлии в 2016 году составляет $52.5^{+12.1}_{-11.2}$ SNU, скорость захвата завершенных измерений 2015 года, $77.8^{+16.4}_{-15.1}$ (в анализ включены результаты измерений из ГГНТ и из цилиндра Установки).

Объединенный результат анализа скорости захвата солнечных нейтрино на галлии за 2015- 2016 годы составляет $62.8^{+9.7}_{-9.1}$ SNU, что хорошо согласуется с величиной за период наблюдения с января 1990 года по декабрь 2014 года, 64.6 ± 2.4 , а также с величиной скорости захвата нейтрино за весь период наблюдения с января 1990 года по октябрь 2016 года, $64.5^{+2.2}_{-2.1}$ SNU (приведены только статистические ошибки).

Полученные результаты анализа измерений скорости захвата солнечных нейтрино на Установке согласуются в пределах статистических ошибок с измерениями на ГГНТ.

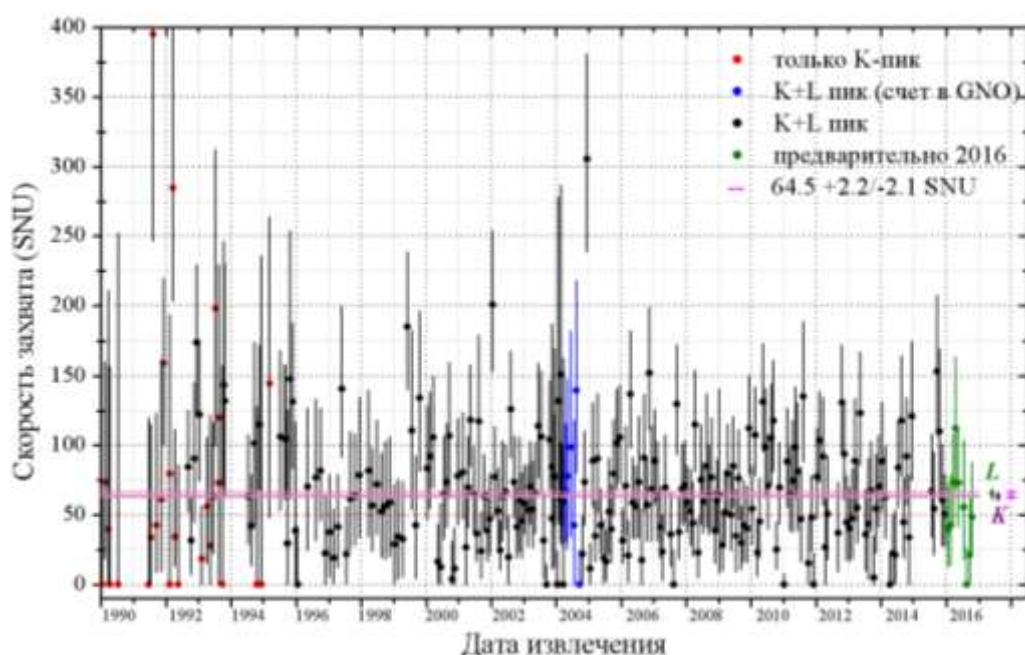


Рисунок 3.4.1.1 Результаты 259 измерений по времени извлечений на ГГНТ.

Вертикальные линии в каждой точке - статистические ошибки 68%. Зеленым цветом выделены предварительные результаты измерения скорости захвата на ГГНТ в 2016 г. L, K - результаты обработки по L- и по K-пику соответственно: 65.9 ± 3.5 , 63.3 ± 3.0 (SNU).

Горизонтальные линии - объединённый результат за весь период измерений 64.5 ± 2.2 SNU. Приведены только статистические ошибки.

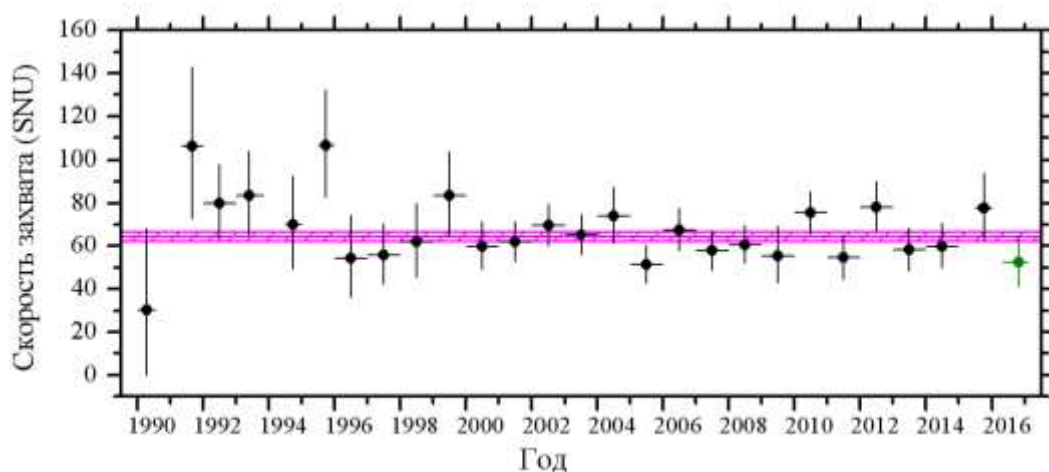


Рисунок 3.4.1.2 Результаты 259 измерений, объединенных по годам. Заштрихованная область соответствует объединенному результату 64.5 ± 2.2 (стат.) SNU. Вертикальные линии в каждой точке соответствуют статистической ошибке 68%, горизонтальные – временному интервалу объединённого анализа измерений. Зеленый цвет – предварительный объединенный результат 2016 г: $52.5^{+12.1}_{-11.2}$ SNU

В соответствии с планами НИР в 2016 году было изготовлено и аттестовано 600 слитков изотопно-обогащённой лигатуры (носителя), из которых 300 слитков обогащенные по изотопу ^{76}Ge и 300 - по изотопу ^{72}Ge .

В течение 2016 года на новой счётной системе проводились фоновые измерения пропорциональных счётчиков ГГНТ. Полученные фоновые характеристики согласуются с фоновыми характеристиками этих счетчиков, полученными в фоновых измерениях, проводившихся в разное время на счетной системе ГГНТ. Полученный результат подтверждает соответствие счётных характеристик двух счётных систем.

3.4.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План НИР по теме «Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории» на 2016 год выполнен в полном объеме.

3.4.1 ПУБЛИКАЦИИ

1. Vladislav Barinov, Vladimir Gavrin, Dmitry Gorbunov, and Tatiana Ibragimova. BEST sensitivity to $O(1)$ eV sterile neutrino Phys. Rev. D 93, (2016), 073002.
2. V.N. Gavrin, V.V. Gorbachev, T.V. Ibragimova, A.V. Kalikhov, A.A. Shikhin, V.E. Yants. Registration system for ^{71}Ge rare decays in proportional counters for BEST experiment. Отправлено в журнал “Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei”/“Физика элементарных частиц и атомного ядра”
3. V.N. Gavrin, B.T. Cleveland, V.V. Gorbachev, T.V. Ibragimova, A.V. Kalikhov, Yu.P. Kozlova, I.N. Mirmov, A.A. Shikhin and E.P. Veretenkin. Search for sterile neutrinos in gallium experiments with artificial neutrino sources. Отправлено в журнал “Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei”/“Физика элементарных частиц и атомного ядра”
4. A A Shikhin, V N Gavrin, V V Gorbachev, T V Ibragimova, A V Kalikhov and V E Yants. Registration of ^{71}Ge rare decays in radiochemical gallium experiments SAGE and BEST. Отправлена в печать.

Число публикаций, индексируемых в базе данных WoS: 1

3.4.2 Эксперимент с искусственным источником нейтрино на основе радионуклида ^{51}Cr активностью 3 МКи

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научные руководители:

старший научный сотрудник Е.П. Веретёнкин

старший научный сотрудник, кфмн В.В.Горбачёв

Исполнители:

Ведущий инженер П.П.Гуркина

Научный сотрудник Т.В.Ибрагимова

Научный сотрудник А.В.Калихов

Младший научный сотрудник С.Н. Даньшин

Старший научный сотрудник, кфмн Ю.П.Козлова

Старший научный сотрудник, ктн И.Н.Мирмов

Ведущий инженер А.А. Мартынов

Начальник установки Б.А. Комаров

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ИЯИ РАН – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) – Баксанский эксперимент по поиску переходов в стерильные нейтрино.

ГИП - газоизостатическое прессование.

ppm - *parts per million* - частей на миллион - единица измерения концентрации.

ППД – полупроводниковый детектор.

ВТИ – внутреннее тормозное излучение.

3.4.2 РЕФЕРАТ

Отчет 14 с., 2 рис., 2 табл.

СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО, ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ИСКУССТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРИНО, ВТИ, ХРОМОВАЯ МИШЕНЬ

Объектом исследования являются коротко-базовые осцилляционные переходы в стерильные состояния нейтрино от высокоинтенсивных нейтринных источников, в рамках которых можно интерпретировать результаты, полученные в галлиевых экспериментах SAGE и GALLEX при калибровках солнечных детекторов искусственными источниками нейтрино

Цель работы — разработка методик и создание технологии изготовления компактного источника нейтрино на основе радионуклида ^{51}Cr активностью 3 МКи для выполнения эксперимента по исследованию нестандартных свойств нейтрино.

В рамках выполнения НИР по разработке методики изготовления хромовой мишени проведена экспериментальная проверка основных этапов процесса, включающие получение и механическое измельчение электролитического хрома и последующее компактирование порошка методом ГИП. Полученные результаты показали, что данные методики в основном обеспечивают необходимые физические и химические характеристики получаемого материала и минимизацию его потерь, однако требуются дополнительные разработки по повышению чистоты хромовых мишеней.

В части работ по разработке методик и изготовлению систем высокоточного измерения активности источника нейтрино выполнена метрологическая поверка средств измерений, входящих в состав калориметрической системы для измерения активности искусственного источника нейтрино. Первые результаты метрологических характеристик измерительной калориметрической системы с учетом полученных в результате поверки погрешностей измерительного оборудования показали, что в режиме постоянного тепловыделения при мощностях более 100 Вт тепловыделение может быть измерено с точностью лучше 0,2 %. Полученная точность измерения относится к числу лучших в мире достигнутых в калориметрических измерениях активностей высокоактивных источников ионизирующего излучения.

Для обоснования заявляемой точности спектрометрического метода определения активности нейтринного источника были проведены измерения спектра ВТИ точечного источника ^{51}Cr малой активности (1 ГБк). Разработанным методом измерений активность источников ^{51}Cr малой интенсивности была измерена с точностью 3.3%. Активность, измеренная по гамма-линии ^{51}Cr 320 кэВ, согласуется с активностью, полученной по спектру ВТИ, в пределах 6%. Установлены вероятные значения основных неопределенностей метода. Работы по повышению точности прибора будут продолжены в 2017 году.

3.4.2 ВВЕДЕНИЕ

Использование компактных высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино рассматривается как одно из основных направлений в исследованиях нестандартных свойств нейтрино [1,2]. Это связано с тем, что такие источники дают потоки чисто электронных нейтрино с известными спектрами и интенсивностями, которые могут быть измерены с высокой точностью, и позволяют выполнять исследования на очень коротких расстояниях от источника. Начало этому направлению было положено четырьмя галлиевыми экспериментами SAGE [3,4] и GALLEX [5], в которых для калибровки детекторов использовались искусственные источники нейтрино. Неожиданно низкий результат, полученный в этих экспериментах, получил название «галлиевой аномалии». Дефицит нейтрино, обнаруженный в этих калибровочных экспериментах, также как и дефицит нейтрино в реакторных экспериментах на коротких расстояниях, может быть объяснен существованием осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния.

Для исследования причины «галлиевой аномалии» разрабатывается Баксанский эксперимент по исследованию переходов в стерильное состояние электронных нейтрино от искусственного источника хром-51 активностью выше 3 МКи (эксперимент BEST).

3.4.2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

3.4.2.1. Разработка технологии изготовления облучательной мишени из обогащенного хрома

3.4.2.1.1. Разработка методик повышения чистоты хромовой мишени

Одним из основных этапов изготовления источника нейтрино на основе ^{51}Cr является электролитическое восстановление металлического хрома из раствора ангидрида хрома CrO_3 . В 2015 г. разработана технология восстановления хрома, изготовлен электролизер и проведен пробный процесс электролиза с получением 1,5 кг металлического хрома. Металлический хром, полученный в результате электролитического восстановления представляет собой чешуйки размерами около 10 x 5 x 1 мм. Проведенные предварительные процессы горячего изостатического прессования (ГИП) показали, что насыпная плотность порошка металлического хрома должна составлять не менее 4 г/см³. Насыпная плотность чешуек электролитического хрома составляет ~ 2 г/см³, т.е. необходима дополнительная стадия помола чешуек хрома. При этом не должно происходить загрязнения хрома примесями, которые могут влиять как на качество прессованного материала, так и образовывать радиоактивные изотопы в течение облучения хромовых стрержней в атомном реакторе.

С точки зрения минимального загрязнения примесями оптимальным является помол с использованием струйной мельницы, в которой измельчение происходит за счет соударения частиц в псевдосжиженном слое (аэрозоле) потоками воздуха или пара высокого давления.

Другим типом мельниц, обеспечивающим необходимую дисперсность порошка, являются вибрационные мельницы, предназначенные для тонкого измельчения хрупких порошкообразных материалов за счет ударного и истирающего действия мелющих тел, находящихся вместе с измельчаемым материалом в вибрационном барабане. Был произведен помол 2 кг чешуек электролитического хрома производства ООО «ПОЛЕМА» на вибрационной мельнице Herzog HP-M 100P в лаборатории Металлургии порошков алюминия Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого. В качестве размольной гарнитуры использовались шары из стали Готфильда (11-14,5 % Мп, 0,9-1,3 % С) с высоким сопротивлением истиранию.

В результате помола был получен порошок металлического хрома с размерами частиц < 280 мкм и насыпной плотностью 3,45 г/см³. Химический анализ полученного порошка был проведен в химической лаборатории ООО «ПОЛЕМА». Результаты анализа представлены в таблице 3.4.2.1. Для сравнения в таблице 3.4.2.2 представлены результаты химического анализа чешуек электролитического хрома до измельчения.

Таблица 3.4.2.1 Химический анализ порошка металлического хрома после помола.

Элемент	Ppm масс	Элемент	Ppm масс	Элемент	Ppm масс
Li	<0,05	As	<0,5	Eu	<0,05
Be	<0,05	Se	<0,05	Gd	<0,05
B	<0,5	Rb	<0,5	Tb	<0,05
C	56	Sr	<0,1	Dy	<0,05
N	10	Y	<0,1	Ho	<0,05
O	250	Zr	<0,5	Er	<0,05
Na	10	Nb	<0,05	Tm	<0,05
Mg	1,1	Mo	<1,0	Yb	<0,05
Al	90	Rh	<0,05	Lu	<0,05
Si	13	Ru	<0,05	Hf	<0,05
K	6,0	Ag	<0,05	Ta	<0,05
P	<1,0	Pd	<0,05	W	<1,0
Ca	2,0	Cd	<0,05	Re	<0,05
Sc	<0,5	In	<0,05	Ir	<0,05
Ti	1,7	Sn	<0,3	Pt	<0,05
V	28	Sb	<0,5	Au	<0,50
Mn	18	Te	<0,1	Tl	<0,05
Fe	90	Cs	<0,05	Pb	<0,20
Co	<0,05	Ba	<0,5	Bi	<0,05
Ni	2,9	La	<0,05	Th	<0,05
Cu	3,0	Ce	<0,05	U	<0,05
Zn	1,9	Pr	<0,05	S	18
Ga	<0,1	Nd	<0,05		
Ge	<0,05	Sm	<0,05		

Таблица 3.4.2.2 Химический анализ чешуек металлического хрома до помола.

Элемент	Ppm масс	Элемент	Ppm масс	Элемент	Ppm масс
Li	<0,05	As	<0,5	Eu	<0,05
Be	<0,05	Se	<0,05	Gd	<0,05
B	<0,5	Rb	<0,5	Tb	<0,05
C	30	Sr	<0,1	Dy	<0,05
N	10	Y	<0,1	Ho	<0,05
O	20	Zr	<0,5	Er	<0,05
Na	18	Nb	<0,1	Tm	<0,05
Mg	0,9	Mo	<1,0	Yb	<0,05
Al	1,8	Rh	<0,10	Lu	<0,05
Si	<5,0	Ru	<0,10	Hf	<0,05
K	<1,0	Ag	<0,05	Ta	<0,05
P	<1,0	Pd	<0,05	W	<1,0
Ca	3,0	Cd	<0,05	Re	<0,05
Sc	<0,5	In	<0,05	Ir	<0,05
Ti	0,7	Sn	<0,1	Pt	<0,05
V	26	Sb	<0,5	Au	<0,50
Mn	<0,5	Te	<0,1	Tl	<0,05
Fe	6,0	Cs	<0,05	Pb	<0,10
Co	<0,05	Ba	<0,5	Bi	<0,05
Ni	2,0	La	<0,05	Th	<0,05
Cu	1,2	Ce	<0,05	U	<0,05
Zn	1,2	Pr	<0,05	S	<18
Ga	<0,1	Nd	<0,05		
Ge	<0,05	Sm	<0,05		

Химический анализ металлического хрома до и после измельчения показал, что в результате помола увеличилось содержание следующих элементов: О с 20 до 250 ppm, Fe с 6 до 90 ppm, Al с 1,8 до 90 ppm. Необходимо проведение дополнительной отмывки полученного порошка азотной кислотой для очистки.

Таким образом, опробованные традиционные методики включающие механическое измельчение электролитического хрома и последующее ГИП компактирование порошка, приводят к некоторому загрязнению получаемого материала и, как следствие, к необходимости дополнительной очистки и увеличению технологических потерь. В настоящее время изучается возможность проведения ГИП компактирования чешуек металлического хрома без его измельчения за счет проведения дополнительной стадии горячей подпрессовки электролитического хрома перед основным процессом ГИП. Это позволит избежать химического загрязнения материала при помоле, а также снизить его потери.

Разработка методик повышения чистоты хромовой мишени будет продолжена.

3.4.2.1.2. Разработка конструкции источника нейтрино с хромовой мишенью шестигранной конструкции.

Метрологическая поверка измерительных приборов калориметрической системы для измерения активности источника.

В рамках плановых работ НИР в 2016г. была проведена калибровка (метрологическая поверка) средств измерений, входящих в состав калориметрической системы для измерения активности искусственного источника нейтрино:

1. Цифровой мультиметр ADVANTEST R6452E.
2. Измерительный шунт ИШМ-01.

Калибровка выполнялась ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ) в следующих условиях: температура окружающей среды (20 ± 2) °C, атмосферное давление 99,9 Па, влажность 31,5 %. Полученные результаты калибровки занесены с соответствующие сертификаты измерительного оборудования калориметрической системы.

Первые результаты по определению метрологических характеристик измерительной системы с учетом полученных в результате поверки погрешностей измерительного оборудования показали, что в режиме постоянного тепловыделения при мощностях более 100 Вт тепловыделение может быть измерено с точностью лучше 0,2 %. Полученная точность измерения относится к числу лучших в мире достигнутых в

калориметрических измерениях активностей высокоактивных источников ионизирующего излучения.

Калориметр может быть использован в любых экспериментах с источниками по исследованию нестандартных свойств нейтрино.

Работы по повышению точности прибора будут продолжены.

Обоснование заявляемой точности спектрометрического метода измерения активности источника с учётом статистических и систематических неопределённостей.

В качестве альтернативного метода измерения активности источника нейтрино на основе хрома-51 интенсивностью выше 3 МКи разработан гамма-спектрометрический метод.

Для экспериментального обоснования разработанного гамма-спектрометрического метода измерения активности нейтринного источника ^{51}Cr проведены измерения функций отклика германиевого ППД на излучение γ -линий образцовых источников через коллиматор (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{22}Na , ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{109}Cd). Показано, что форма функций отклика не зависит от пространственного положения точечного источника и интенсивность регистрируемого излучения соответствует затенению коллиматором. Разработан метод измерений спектра ВТИ β -источников по измерениям спектров пары источников малой активности ^{51}Cr на ППД и на детекторе NaI. Получены функции отклика для ППД с коллиматором в диапазоне энергий регистрируемых фотонов до 3 МэВ.

Для обоснования заявляемой точности спектрометрического метода определения активности нейтринного источника были проведены измерения спектра ВТИ точечного источника ^{51}Cr малой активности (1 ГБк). В измерениях с источником была проведена проверка метода восстановления измеряемых спектров с помощью функций отклика, полученных от монохроматических источников; определена оптимальная геометрия расположения нейтринного источника с активностью, распределённой по объёму, относительно оси коллиматора, через который излучение попадает в детектор; определены ограничения на возможности точных измерений спектра ВТИ от источников, имеющих интенсивные γ -линии в спектре; определены основные характеристики детектора и детектирующей электроники.

Из измерений с источниками ^{51}Cr малой активности получен спектр ВТИ ^{51}Cr в диапазоне 360-580 кэВ. Полученная из анализа форма спектра ВТИ в указанном энергетическом диапазоне хорошо согласуется с теоретической формой, рисунок 3.4.2.1.

Установлены вероятные значения основных неопределенностей метода. Показано, что ошибки измерений спектров ВТИ от открытых источников, спектры излучения которых содержат интенсивные гамма линии, велики. Поэтому в анализе спектрометрических измерений эксперимента BEST будут использоваться теоретические значения формы и интенсивности спектра ВТИ. Поскольку нейтринный источник в эксперименте BEST будет окружён вольфрамовой защитой, подавляющей гамма-линию 320 кэВ, интенсивность регистрации фотонов ВТИ будет значительно выше фона детектора, и можно ожидать высокой статистической точности измерений активности.

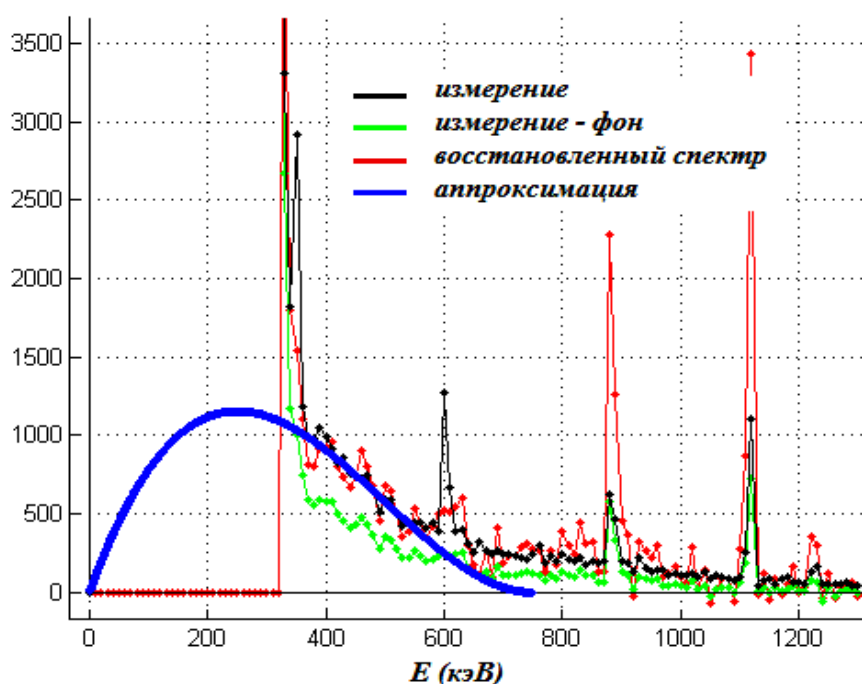


Рисунок 3.4.2.1 Измеренный спектр от ^{51}Cr выше 320 кэВ. Измеренный спектр – черная кривая, спектр после вычета фона ППД – зеленая кривая, спектр после применения процедуры восстановления – красная кривая, аппроксимирующий спектр ВТИ - синяя кривая.

Была выявлена проблема спектрометрического метода, связанная с необходимостью использования коррекций формы функций отклика, найденных методом Монте-Карло для всего диапазона регистрируемых фотонов. Коррекция проводилась по результатам измерений спектров импульсов от стандартных источников фотонов (^{137}Cs , ^{22}Na и др.), рисунок 3.4.2.2.

Разработанным методом измерений спектра ВТИ β -источников активность источников ^{51}Cr малой интенсивности была измерена с точностью 3.3%. Активность,

измеренная по гамма-линии ^{51}Cr 320 кэВ, согласуется с активностью, полученной по спектру ВТИ, в пределах 6%.

Работы по повышению и обоснованию точности спектрометрического метода, будут продолжены в 2017 году. Продолжатся измерения ВТИ от других источников малой активности, в частности от ^{37}Ar , у которого отсутствуют интенсивные фотонные линии в спектре.

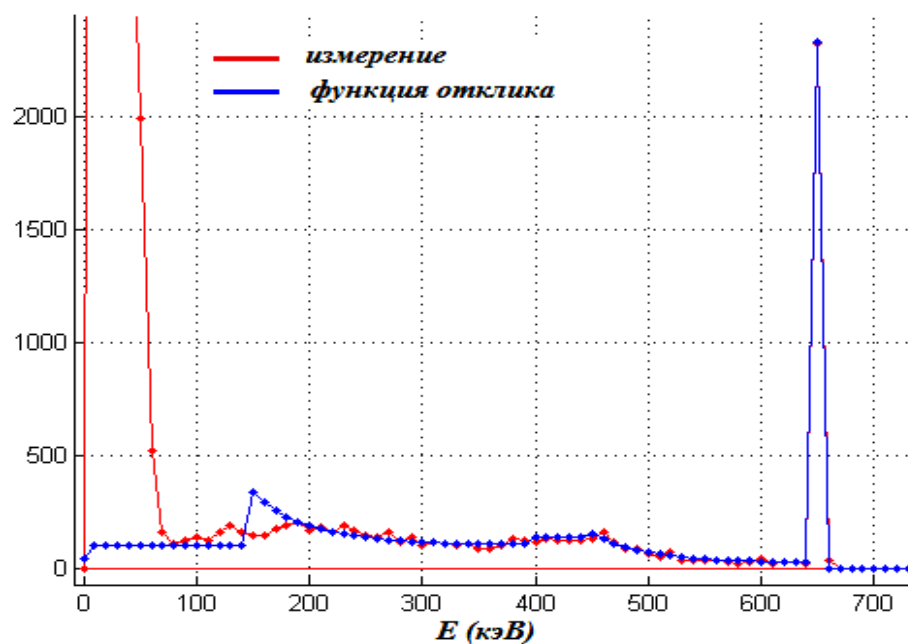


Рисунок 3.4.2.2 Сравнение вычисленной методом Монте-Карло функции отклика для энергии 662 кэВ (синяя кривая) и измеренного спектра от источника ^{137}Cs (красная кривая).

3.4.2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения НИР по теме «Эксперимент с искусственным источником нейтрино на основе радионуклида ^{51}Cr активностью 3 МКи» с целью повышения чистоты хромовой мишени в 2016 году была проведена экспериментальная проверка основных этапов процесса, включающие получение и механическое измельчение электролитического хрома и последующее компактирование порошка методом ГИП. Полученные результаты показали, что данные методики в основном обеспечивают необходимые физические и химические характеристики получаемого материала и минимизацию его потерь, однако требуются дополнительные разработки по повышению чистоты хромовых мишеней. В настоящее время изучается возможность проведения ГИП компактирования чешуек металлического хрома без его измельчения за счет проведения дополнительной стадии горячей подпрессовки электролитического хрома перед основным процессом ГИП. Это позволит избежать химического загрязнения материала при помоле, а также снизить его потери. Разработка методик повышения чистоты хромовой мишени будет продолжена.

В части работ по разработке методик и изготовлению систем высокоточного измерения активности источника нейтрино выполнена метрологическая поверка средств измерений, входящих в состав калориметрической системы для измерения активности искусственного источника нейтрино. Первые результаты по определению метрологических характеристик измерительной калориметрической системы с учетом полученных в результате поверки погрешностей измерительного оборудования показали, что в режиме постоянного тепловыделения при мощностях более 100 Вт тепловыделение может быть измерено с точностью лучше 0,2 %. Полученная точность измерения относится к числу лучших в мире достигнутых в калориметрических измерениях активностей высокоактивных источников ионизирующего излучения. Калориметр может быть использован в любых экспериментах с источниками по исследованию нестандартных свойств нейтрино.

Для обоснования заявляемой точности спектрометрического метода определения активности нейтринного источника были проведены измерения спектра ВТИ точечного источника ^{51}Cr малой активности (1 ГБк). Разработанным методом измерений спектра ВТИ β -источников активность источников ^{51}Cr малой интенсивности была измерена с точностью 3.3%. Активность, измеренная по гамма-линии ^{51}Cr 320 кэВ, согласуется с активностью, полученной по спектру ВТИ, в пределах 6%. Установлены вероятные значения основных неопределенностей метода. Выявлена проблема спектрометрического метода, связанная с необходимостью использования коррекций формы функций отклика, полученных методом Монте-Карло. Работы по повышению точности прибора будут продолжены в 2017 году.

3.4.2 ПУБЛИКАЦИИ

1. V.N. Gavrin, Yu.P. Kozlova, E.P. Veretenkin, A.V. Logachev, A.I. Logacheva, I.S. Lednev, A.A. Okunkova. Reactor target from metal chromium for “pure” high-intensive artificial neutrino source. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2016, Vo.13, No.2, pp.267-273
2. Kozlova Yu.P., Gavrin V. N., Danshin S.N., Ibragimova T.V., Veretenkin E. P., Calorimetric method for determining the activity of a neutrino source based on ^{51}Cr . Proceedings of International conference on thermal analysis and calorimetry in Russia (RTAC-2016), 16-23 September, 2016 Saint-Petersburg, Russia / [Ministry of Education and Science of the Russian Federation et al.]. Volume II Saint-Petersburg 2016, 383-386.
3. E P Veretenkin, V N Gavrin, S N Danshin, T V Ibragimova, A A Kalashnikova, J P Kozlova, A A Martynov. Calorimetric system for high-precision determination of activity of the ^{51}Cr neutrino source in the BEST experiment. Отправлена в журнал Journal of Physics: Conference series
4. V.V.Gorbachev, V.N.Gavrin, T.V.Ibragimova, A.V.Kalikhov, Yu.M.Malyshkin, A.A.Shikhin. Measurement of activity and spectrum of internal bremsstrahlung of ^{51}Cr source. Отправлена в журнал “Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei”.

Число публикаций, индексируемых в базе данных WoS: 2

4 Баксанская нейтринная обсерватория. Лаборатория подземного сцинтилляционного телескопа БНО ИЯИ РАН

4.1 Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ

Руководитель: зав. лаб ПСТ, д.ф.-м.н. В.Б. Петков

4.1 РЕФЕРАТ

В отчёте приведены результаты научных исследований по теме “Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ” за 2016 год. В 2016 году по данной теме было запланировано выполнение следующих работ: проведение поиска нейтринных всплесков от взрывов сверхновых с коллапсом ядра в Галактике; поддержание установок БПСТ, “Ковёр-2” и “Андырчи” в работоспособном состоянии; продолжение непрерывного набора информации на установках, мониторинг потоков частиц космического излучения высоких и сверхвысоких энергий. Все запланированные работы выполнены, полученные результаты обсуждаются в отчёте.

4.1 ВВЕДЕНИЕ

На уникальном комплексе экспериментальных установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, расположенная над ним ливневая установка “Андырчи” и комплексная ливневая установка “Ковер-2”) в течение многих лет проводятся исследования в области физики космических лучей и нейтринной астрофизики. Для выполнения исследований установки комплекса в течение 2016 года поддерживались в работоспособном состоянии. Проводились работы по модернизации установок. Поддерживался режим непрерывного набора информации на установках комплекса и проводился мониторинг потоков частиц космического излучения. Создан архив экспериментальных данных установок за 2016 год. По экспериментальным данным БПСТ проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, получено новое ограничение на частоту вспышек с коллапсом ядра в Галактике.

4.1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. Полное живое время работы установки в 2016 году составило 8407 часов (95.7% календарного времени), полное число триггерных событий за это время – $5.08 \cdot 10^8$. На рисунке 4.1.1 приведена зависимость от времени числа триггерных событий (1) и числа зарегистрированных мюонов (2) за сутки. Уменьшение числа событий в

отдельные дни связано с проведением в это время ремонтных работ. За 2016 было отремонтировано и подстроено 167 счетчиков, в том числе произведена замена 102 переменных потенциометров в делителях напряжения и 213 конденсаторов в формирователях импульсного сигнала. Произведена замена ФЭУ на двух счетчиках.

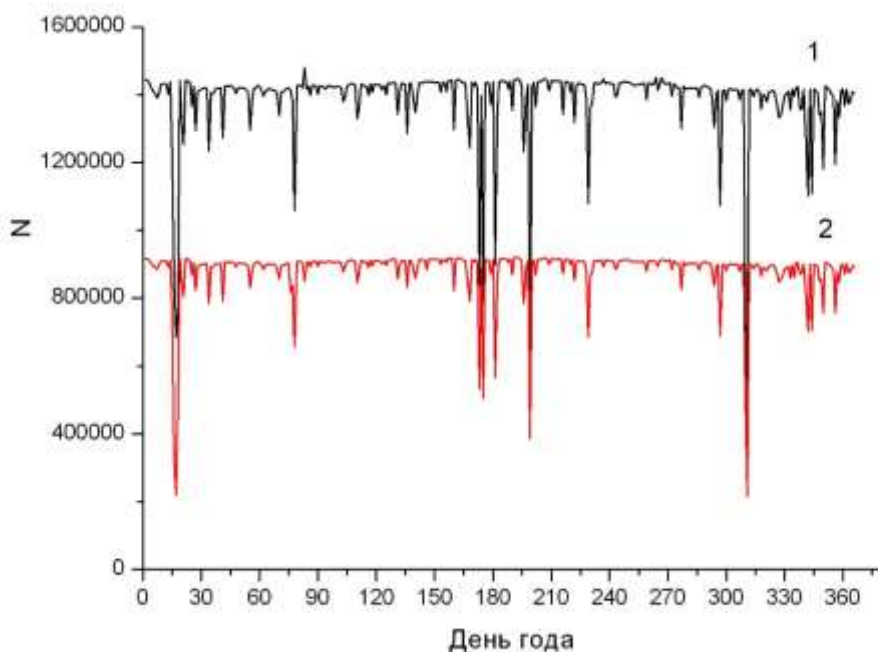


Рисунок 4.1.1 Зависимость от времени числа триггерных событий (1) и числа зарегистрированных мюонов (2) за сутки.

Проводились работы по поддержанию работоспособности системы сбора информации БПСТ, в том числе ремонт годоскопа импульсных каналов (ГИК) и годоскопа амплитудных каналов (ГАЗ).

Наглядной иллюстрацией высокого качества работы БПСТ является распределение числа счетчиков по средней величине интервала между измеренным и ожидаемым временем срабатывания счетчика, полученным по результатам обработки мюонных событий рис.4.1.2, где приведено такое распределение за месяц набора информации для 2012 и 2016 годов, демонстрирует высокую стабильность работы сцинтилляционных счетчиков и измерительных систем БПСТ.

Продолжалась работа по созданию нового годоскопа импульсных каналов для БПСТ. К настоящему времени распаяны, собраны в конструктив КАМАК и настроены на физическом уровне 24 кассеты приема информации и 2 кассеты управляющих блоков. Этого количества кассет достаточно для двух плоскостей БПСТ

2. Продолжался набор экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино из нижней полусферы. В 2016 году чистое время регистрации по нейтринной программе составило 7990 часов (91% календарного времени). Меньшее время регистрации по данной задаче, по сравнению с полным временем набора, объясняется ремонтом неисправностей регистрирующих систем, критичных для данной задачи, без остановки набора информации на БПСТ. За 2016 год выделено 44 кандидата в нейтринные события. Полное живое время набора информации по нейтринной программе за весь период с 1978 года составляет 268334 часа (30.6 года). Всего за это время было зарегистрировано 1614 событий из нижней полусферы.

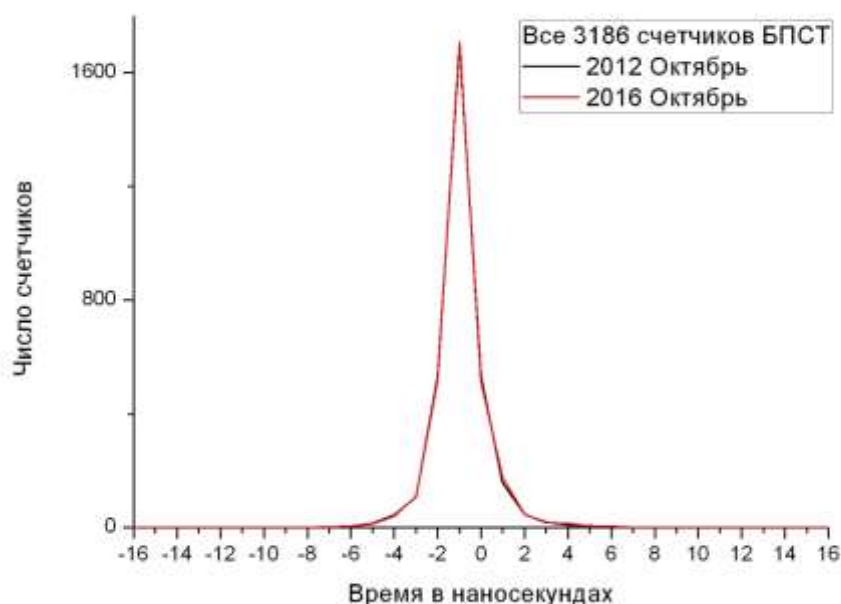


Рисунок 4.1.2 Распределение числа счетчиков по средней величине интервала между измеренным и ожидаемым временем срабатывания счётчика.

3. По информации БПСТ за 2016 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд. БПСТ состоит из 8 плоскостей, на которых расположены 3184 сцинтилляционных счетчика. В качестве мишени используются 3 нижние горизонтальные плоскости БПСТ, которые содержат 1200 счетчиков (по 400 на каждой плоскости) общей массой 130 тонн, порог срабатывания счётчика 8 МэВ. Фоновый темп счета событий, когда срабатывает только один счетчик на установке, на этих плоскостях равен 0.02 с⁻¹. Метод регистрации нейтринного излучения основан на регистрации антинейтрино в реакции обратного бета-распада. Т.к. средняя энергия позитрона ≈ 15 МэВ, то, как правило, будет срабатывать только один счетчик на установке. Ожидаемое событие от

коллапса звезды должно выглядеть в установке как серия одиночных срабатываний счетчиков (событие "1 из 3200" на БПСТ) в течение времени нейтринной вспышки (предполагаемая длительность которой составляет 10 – 20 секунд). Поэтому для поиска нейтринной вспышки от коллапсирующей звезды используется метод поиска временного кластера одиночных срабатываний счетчиков в установке.

Чистое время набора по задаче поиска нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд за 2016 год составляет 330.9 суток (90.4 % календарного времени). Из 48412814 обработанных событий было отобрано 695929 одиночных событий, из которых все критерии отбора прошли 618818 события. Стабильность работы установки по данной задаче в 2016 году демонстрирует рисунок 4.1.3, на котором представлены измеренное и расчетное распределения числа кластеров по множественности для не перекрывающихся (начало следующего совпадает с концом предыдущего) интервалов 20-секундной длительности.

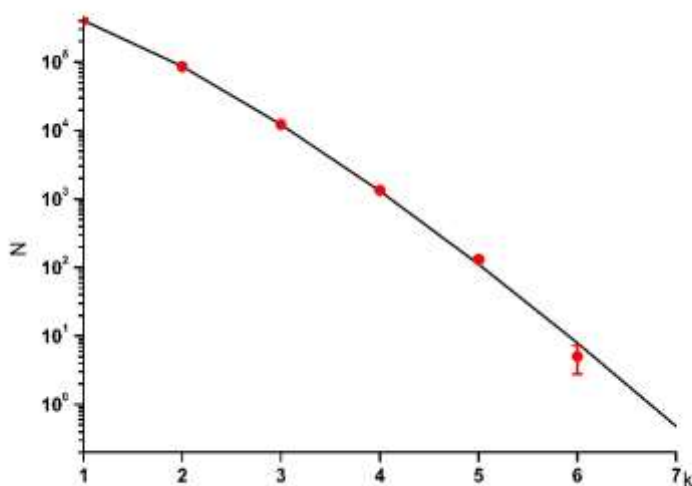


Рисунок 4.1.3 Распределение числа кластеров по множественности для не перекрывающихся интервалов 20-секундной длительности. Точки – эксперимент, линия – зависимость, ожидаемая из распределения Пуассона.

Для поиска нейтринного всплеска применяется метод скользящего окна от события к событию. При такой обработке всегда имеется хотя бы одно событие в кластере, и сгусток событий, вызванный нейтринной вспышкой, гарантированно не будет пропущен. Претендентов на кластер нейтринных сигналов от коллапсирующих звёзд по экспериментальным данным 2016 года не обнаружено. Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2016 года составляет 31.27 года. Верхняя граница на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике равна 0.074 в год на 90% доверительном уровне.

4. Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на ливневой установке “Ковер-2” по всем физическим задачам. Для этого проводился непрерывный мониторинг информации, по результатам которого производилась настройка и ремонт сцинтилляционных счетчиков и регистрирующей электроники. Было отремонтировано 79 формирователей импульсного сигнала, 92 LC-преобразователей и 4 RC-преобразователя. Проведены контрольные измерения и настройка коэффициентов усиления на 400 счетчиках “Ковра”.

Чистое время набора информации составляет 88 % календарного времени для задачи регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ; 85% – для задачи регистрации мюонной компоненты ШАЛ на мюонном детекторе (МД); 70% – для регистрации вторичной нейтронной компоненты на нейтронном мониторе (НМ).

5. В 2016 году продолжались работы по созданию установки “Ковер-3”, предназначенной для изучения спектра и состава ПКИ в области первичных энергий 50 ТэВ – 10^4 ТэВ. Разрабатывались и изготавливались электронные блоки системы сбора данных мюонного детектора, проводилась настройка электронных узлов сцинтилляционных счетчиков МД.

1) Изготовлены блоки приемных каналов логарифмических преобразователей LCN-1 для двух тоннелей мюонного детектора, произведена настройка всех 410 каналов блоков. Конструктивно блоки расположены в двух отдельных крейтах системы «Вишня» по 205 шт. в каждом. В каждом крейте предусмотрен блок отладочного устройства, предназначенный для спектрометрических измерений и настройки порогов формирователей SKN-1 и LCN-1.

2) С помощью упомянутого выше отладочного устройства произведена совместная настройка 205 преобразователей LCN-1 и 205 формирователей SKF-1, расположенных парой в едином кожухе с индивидуальным ФЭУ для эталонного сцинтилляционного детектора. Это законченный комплект настроенных электронных устройств, предназначенных для одного тоннеля мюонного детектора.

3) Разработан и изготовлен усилитель анодных сигналов сцинтилляционных детекторов, адаптированный к многоканальному блоку аналого-цифрового преобразователя АЦП-USB-8К. Эти устройства (усилитель + АЦП) совместно с компьютером позволили получить амплитудный анализатор с возможностью построения спектра энерговыделений в детекторе в режиме реального времени.

4.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В течение 2016 года на установках комплекса БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации всем физическим задачам, и проводились работы по модернизации установок. Проводилась обработка и анализ экспериментальных данных, полученных на установках, и мониторинг потоков частиц космического излучения. Продолжается набор информации по программе регистрации нейтринных всплесков, получено новое ограничение на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике.

4.1 ПУБЛИКАЦИИ.

1. V.B. Petkov. Prospects of the search for neutrino bursts from Supernovae with Baksan Large Volume Scintillation Detector. *Physics of Particles and Nuclei*, Vol. 47, No. 6, pp. 975–979, 2016.

2. P. Kuusiniemi, T. Enqvist, L. Bezrukov, H. Fynbo, L. Inzhechik, J. Joutsenvaara, K. Loo, B. Lubsandorzhiev, V. Petkov, M. Slupecki, W.H. Trzaska and A. Virkajarvi. Muon multiplicities measured using an underground cosmic-ray array. *Journal of Physics: Conference Series* 718 (2016) 052021.

3. I.M. Dzaparova, A.M. Gangapshv, Yu.M. Gavriluk, V.B. Petkov, A.V. Sergeev, V.I. Volchenko, S.P. Yakimenko, A.F. Yanin. Study of the characteristics of SiPMs matrix as a photosensor for the scintillation detectors. *PoS(PhotoDet2015)063*.

4. R.V. Novoseltseva, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, and A.F. Yanin. The Search for Neutrino Bursts from Supernovae with Baksan Underground Scintillation Telescope. *Physics of Particles and Nuclei*, Vol. 47, No. 6, pp. 968–974, 2016.

5. M.M. Kochkarov, I.A. Alikhanov, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, R.V. Novoseltseva, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, and A. F. Yanin. Neutron Flux Measurement Using Activated Radioactive Isotopes at the Baksan Underground Scintillation Telescope. *Physics of Particles and Nuclei*, Vol. 47, No. 6, pp. 980–985, 2016.

6. Д.Д. Джаппуев, А.У. Куджаев, Н.Ф. Клименко. Мюонно-адронный детектор установки “Ковер-2”. *Ядерная физика*, т. 79, № 3, с. 245–252, 2016.

7. D.D. Dzhappuev, V.B. Petkov, A.U. Kudzhaev, N.F. Klimenko, A.S. Lidvansky, S.V. Troitsky. Search for cosmic gamma rays with the Carpet-2 extensive air shower array. *Proceedings of the International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Russia*,

Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2015, pp. 35-41, Publishing house “Sneg”, Pyatigorsk, 2016.

8. Agafonova N.Yu., Ashikhmin V.V., Boliev M.M., Volchenko V.V., Dadykin V.L., Dzaparova I.M., Dobrynina E.A., Enikeev R.I., Kochkarov M.M., Novoseltsev Yu.F., Novoseltseva R.V., Mal’gin A.S., Petkov V.B., Ryazhskaya O.G., Shakiryanova I.R., Yakushev V.F., Yanin A.F. and the LVD Collaboration. The search for coincidences of rare events using LVD and BUST detectors. Proceedings of the International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2015, pp. 16-22, Publishing house “Sneg”, Pyatigorsk, 2016.

9. Novoseltsev Yu.F., Boliev M.M., Dzaparova I.M., Kochkarov M.M., Novoseltseva R.V., Petkov V.B., Volchenko V.I., Volchenko G.V., Yanin A.F. A search for neutrino bursts signal from supernovae at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Proceedings of the International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2015, pp. 85-94, Publishing house “Sneg”, Pyatigorsk, 2016.

10. R.V. Novoseltseva, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, A.F. Yanin, N.Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, V.L. Dadykin, E.A. Dobrynina, R.I. Enikeev, A.S. Mal’gin, O.G. Ryazhskaya, I.R. Shakiryanova, V.F. Yakushev, and the LVD Collaboration. Joint analysis of experimental data on the search for neutrino bursts using the BUST and LVD detectors. Proceedings of the International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2015, pp. 95-101, Publishing house “Sneg”, Pyatigorsk, 2016.

11. V.B. Petkov. Prospects of detecting the QCD phase transition in the Galactic supernova neutrino burst with 20-kton scale liquid scintillation detectors. Proceedings of the International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2015, pp. 102-106, Publishing house “Sneg”, Pyatigorsk, 2016.

4.2 Лаборатория низкофоновых исследований

4.2.1 Поиск солнечных адронных аксионов

Научный руководитель: зав. лаб. А.М. Гангапшев.

Исполнители:

зав. БНО ИЯИ РАН, В. В. Кузьминов

н. с. Ю. М. Гаврилюк

н. с. В. В. Казалов

м.н.с. С.П. Якименко

м.н.с. Дж.А. Текуева

с.н.с. А.Х.-А. Хоконов

н. с. ХНУ им. В.Н.Каразина (г.Харьков) С. И. Панасенко

с. н. с. ХНУ им. В.Н.Каразина (г.Харьков) С. С. Раткевич.

4.2.1 Реферат.

Проводится поиск аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в М1-переходе ядер ^{83}Kr на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения $A + ^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma, e$ (9.4 кэВ). Для регистрации γ -квантов и электронов, возникающих в результате разрядки ядерного уровня, используется пропорциональный счетчик, заполненный криптоном и размещенный в низкофоновой установке в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900. По предварительным результатам обработки данных за 2016г. получено ограничение сверху на массу аксиона на уровне $m_A \leq 75$ эВ (95 %у.д.). Измерения продолжаются.

Параллельно, в 2016г. начаты работы по исследованию возможностей создания детектора адронных солнечных аксионов, излучаемых в М1-переходе ядер ^{57}Fe на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения $A + ^{57}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Fe}^* \rightarrow ^{57}\text{Fe} + \gamma, e$ (14.4 кэВ). Предварительно, в качестве возможного рабочего материала детектора выбран пирит (FeS_2). Пирит является полупроводником, что может позволить использовать его как материал для полупроводникового детектора или криогенного болометра.

4.2.1 Введение

Наиболее естественное решение СР-проблемы сильных взаимодействий было получено путем введения новой киральной симметрии, спонтанное нарушение которой при энергии f_A полностью компенсирует СР-неинвариантный член в лагранжиане квантовой хромодинамики (КХД) и приводит к появлению аксиона. На данный момент развиты модели двух классов “невидимого” аксиона. Это модели адронного (или KSVZ)-

аксиона, и GUT- или DFSZ-аксиона. Масса аксиона m_A в обеих моделях может быть выражена через свойства π^0 -мезона:

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

где m_π и f_π – масса и константа распада пиона, $z = m_u/m_d = 0.56$ и $w = m_u/m_s = 0.029$ – отношения масс кварков. Значения $z = 0.56$ и $w = 0.029$ являются общепринятыми в аксионной литературе, хотя существующие экспериментальные данные разрешают достаточно широкий интервал для возможных значений z и w . Ограничения на массу аксиона возникают как следствие экспериментальных ограничений на константы связи аксиона с фотонами ($g_{A\gamma}$), электронами (g_{Ae}) и нуклонами (g_{AN}), которые, в свою очередь, являются модельно зависимыми величинами. Если аксион существует, Солнце должно быть одним из наиболее мощных его источников. Целью данной работы является поиск монохроматических аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в M1-переходе в ядрах ^{83}Kr на Солнце. На Земле аксионы могут быть обнаружены в обратной реакции резонансного поглощения путем регистрации частиц (γ и рентгеновских квантов, конверсионных и оже-электронов), возникающих при разрядке возбужденного ядерного уровня. Вероятность испускания и последующего поглощения аксионов зависит только от константы связи с нуклонами, которая является наименее модельно-зависимой и пропорциональна $(g_{AN})^4$.

4.2.1 Основная часть

^{83}Kr : Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов ядром ^{83}Kr в зависимости от вероятности излучения аксиона в данном переходе (ω_A/ω_γ), параметра $(g_3 - g_0)^2$, описывающего аксионнуклонное взаимодействие, и массы аксиона в KSVZ-модели может быть представлена как:

$$\begin{aligned} R[\text{г}^{-1}\text{сут}^{-1}] &= 4.23 \cdot 10^{21} \omega_A/\omega_\gamma = \\ &= 8.53 \cdot 10^{21} (g_{AN}^3 - g_{AN}^0)^4 (p_A/p_\gamma)^6 = \\ &= 2.41 \cdot 10^{-10} m_A^4 (p_A/p_\gamma)^6. \end{aligned}$$

Количество зарегистрированных γ -квантов, следующих за поглощением аксиона, определяется массой мишени, временем измерений и эффективностью регистрации детектора, в то время как вероятность наблюдения пика с энергией 9.4 кэВ зависит от уровня фона экспериментальной установки. Для регистрации рентгеновских и γ -квантов, конверсионных и оже-электронов, возникающих в результате разрядки возбужденного уровня с энергией 9.4 кэВ, используется большой медный пропорциональный счётчик, заполненный криптоном, обогащенным по изотопу ^{83}Kr до 99,9%. Рабочий объём счетчика составляет 8.77 л, давление газа — 1.8 ат. Масса изотопа ^{83}Kr в рабочем объёме

58.5 г. Счётчик окружен пассивной защитой из меди (20 см), свинца (20 см) и полиэтилена (8 см). Установка расположена в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900 м.в.э. (НЛГЗ-4900), где поток мюонов космических лучей ниже более чем в 10^7 раз по сравнению с поверхностью.

Результаты по ^{83}Kr . На данный момент набрана статистика за 12000 часов измерений. Идёт обработка полученных данных. По предварительным результатам получен новый предел на массу адронного аксиона $m_A \leq 75 \text{ эВ}$. Измерения продолжаются.

^{57}Fe : Монохроматические аксионы могут излучаться в М1-переходе в ядрах ^{57}Fe на Солнце, по аналогии с ^{83}Kr . Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов ядром ^{57}Fe в $3.5 \cdot 10^3$ раз выше, чем для ^{83}Kr . Однако на данный момент нет детекторов ионизирующего излучения, с достаточно хорошим энергетическим разрешением, основанных материале содержащим железо в значительном количестве.

В качестве возможного рабочего материала детектора выбран пирит (FeS_2). Пирит является полупроводником, что может позволить использовать его как материал для полупроводникового детектора или криогенного болометра. С целью исследования возможностей использования пирита приобретены несколько кристаллов пирита кубической формы. На две противоположные грани одного кристалла нанесен $\sim 100 \text{ мкм}$ слой меди. Предварительные измерения проводимости кристаллов показало, что наличие в них природных примесей не позволяет их использовать в качестве рабочего материала полупроводникового детектора. Идет поиск организации, которая сможет вырастить искусственные кристаллы пирита необходимой чистоты. Так же идет поиск других веществ, содержащих железо, которые возможно использовать как материал для изготовления детектора ионизирующего излучения.

4.2.2 Новый этап эксперимента по поиску 2К-захвата в ^{124}Xe

Научный руководитель: зав. БНО ИЯИ РАН, В. В. Кузьминов

Исполнители:

зав. лаб. А.М. Гангапшев.

н. с. Ю. М. Гаврилюк

н. с. В. В. Казалов

м.н.с. С.П. Якименко

м.н.с. Дж.А. Текуева

н. с. ХНУ им. В.Н.Каразина (г.Харьков) С. И. Панасенко

с. н. с. ХНУ им. В.Н.Каразина (г.Харьков) С. С. Раткевич.

4.2.2 Реферат

В БНО ИЯИ РАН проводится эксперимент по поиску 2К-захвата ^{124}Xe . Методика основана на использовании большого медного пропорционального счётчика, заполненного ксеноном, содержащим изотоп ^{124}Xe . На данный момент набрана статистика за ~5500 часов, проводится обработка набранных данных. Искомое эффекта не обнаружено, первичная оценка дает предел на период полураспада на уровне $\sim T_{1/2} \geq 7 \cdot 10^{21}$ лет.

4.2.2 Основная часть

Экспериментальная установка состоит из большого медного пропорционального счётчика, окруженного составной пассивной защитой, состоящей из 20см меди, 15см свинца и 5см борированного полиэтилена. Рабочий объём счетчика составляет 8.77 л. Установка расположена в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900 м.в.э. (НЛГЗ-4900), где поток мюонов космических лучей снижен более чем в 10^7 раз по сравнению с поверхностью. В 2016г. продолжались измерения с образцом ксенона объемом 50л, обогащенного по изотопу ^{124}Xe до 21% (58,6г). За ~2500 часов набора данных фон в искомом интервале энергии составляет 0 событий, пользуясь рекомендациями работы [Feldman G.J. and Cousins R.D], можно определить, что эффект от 2К2ν-захвата не превышает 2,44 событий, что дает нам предел на период полураспада Хе-124 относительно 2К2ν-захвата на 90% уровне достоверности $T_{1/2} \geq 4,6 \times 10^{21}$ лет. На данный момент набрана статистика за ~5500 часов, проводится обработка набранных данных. Искомое эффекта не обнаружено, первичная оценка дает предел на период полураспада на уровне $\sim T_{1/2} \geq 7 \times 10^{21}$ лет. Измерения продолжаются.

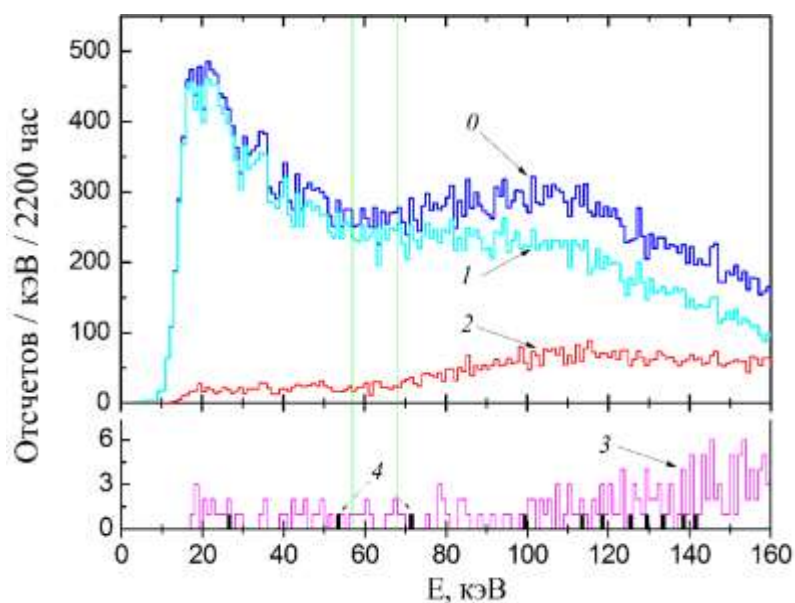


Рис. 4.2.2.1 Амплитудные спектры фона МПС: 0- полный спектр всех событий; 1-, 2- и 3- спектры одно-, двух- и трёх-точечных событий, соответственно; 4 - спектр трёх-точечных

событий, отобранный при условии $5,0 < m_0 < 13,0$ кэВ и $m_1/m_2 > 0,7$. m_i -ранжированные по амплитуде энергосвечения в каждой «точке» трехточечного события. Зелёные линии ограничивают область поиска эффекта.

4.2.2 ПУБЛИКАЦИИ

1. Yu.M. Gavriluk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov et al., «The Origin of the Background Radioactive Isotope ^{127}Xe in the Sample of Xe Enriched in ^{124}Xe », *Physics of Particles and Nuclei*, 2016, Vol. 47, No. 6, pp. 1065–1069.

4.2.2 ИСТОЧНИКИ

1. A. S. Barabash, “Average and recommended half-life values for two neutrino double beta decay,” *Nucl. Phys. A* 935, 52 (2015); arXiv:1501.05133.
2. A. P. Meshik, C. M. Hohenberg, O. V. Pravdivtseva, and Y. S. Kapusta, “Weak decay of ^{130}Ba and ^{132}Ba : Geochemical measurements,” *Phys. Rev. C* 64, 035205 (2001).
3. Yu. M. Gavriluk, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenko, and S. S. Ratkevich, “Indications of capture in ^{78}Kr ,” *Phys. Rev. C* 87, 035501 (2013).
4. D.-M. Mei, I. Marshall, W.-Z. Wei, and C. Zhang, “Measuring double-electron capture with liquid xenon experiments,” *Phys. Rev. C* 89, 014608 (2014); . doi 0.1103/PhysRevC.89.014608
5. E. Aprile et al., “The XENON100 dark matter experiment”, *Astroparticle Physics* 35, 573 (2012). doi 10.1016/j.astropartphys.2012.01.003
6. M. Doi and T. Kotani, “Neutrino emitting modes of double beta decay,” *Prog. Theor. Phys. (Kyoto)* 87, 1207 (1992).
7. X-Ray-Data-Booklet, Center for X-ray Optics and Advanced Light Source LBNL, <http://www.scribd.com/doc/>; <http://xdb.lbl.gov>.
8. Yu. M. Gavriluk, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov, et al., “Pulse shape analysis and identification of multipoint events in a large-volume proportional counter in an experimental search for $^{-}\text{capture}$ ^{78}Kr ,” *Instr. Exper. Tech.* 53, 57 (2010); arXiv: nucl-ex/1006.5133.
9. Ju. M. Gavriljuk, A. M. Gangapshev, A. M. Gezhaev, et al., “Working characteristics of the New Low Background Laboratory (DULB-4900, Baksan Neutrino Observatory).” *Nucl. Instr. Meth. A* 729, 576 (2013); arXiv: physics.ins-det/1204.6424. doi 10.1016/j.nima.2013.07.090.10.1016/j.nima.2013.07.090
10. Yu. M. Gavriluk, A. M. Gangapshev, Dj. A. Zhantudueva, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenko, S. S. Ratkevich, K. V. Efendiev, and S. P. Yakimenko, “Results of experiments devoted to searches for capture on ^{78}Kr and for the double-beta decay of ^{136}Xe with the aid of proportional counters,” *Phys. At. Nucl.* 76, 106 (2013). doi 10.1134/S1063778813090068
11. G. J. Feldman and R. D. Cousins, “Unified approach to the classical statistical analysis of

small signals,” Physics Review D 57 , 3873 (1998).

12. M. Hirsch, K. Muto, K. Oda, and H. V. Klapdor-Kleingrothaus, Z. Phys. A 347 , 151 (1994).

13. O. Rumyantsev and M. Urin, Phys. Lett. B 443 , 51 (1998).

14. S. Singh, R. Chandra, P. K. Rath, P. K. Raina, and J. G. Hirsch, Eur. Phys. J. A 33 , 375 (2007). doi 10.1140/epja/i2007-10481-7

15. J. Suhonen, “Double beta decays of ^{124}Xe investigated in the QRPA framework,” J. Phys. (London) G 40 , 075102 (2013). doi 10.1088/0954-3899/40/7/075102

4.2.3 Участие в международном эксперименте AMORE по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа ^{100}Mo

Научный руководитель: н. с. В. В. Казалов

Исполнители:

зав. БНО ИЯИ РАН, В. В. Кузьминов

зав. лаб. А.М. Гангапшев.

н. с. Ю. М. Гаврилюк

м.н.с. С.П. Якименко

м.н.с. Дж.А. Текуева

инж. иссл. А.М. Гежаев

В Южной Корее основна коллаборация AMORE, которая проводит эксперимент по поиску безнейтринного двойного бета распада ^{100}Mo . В коллаборацию входят сотрудники ИЯИ РАН, в том числе и сотрудники ЛНФИ. Экспериментальная установка основана на криогенном болометре из сцинтилляционных кристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$. С кристаллов снимаются два сигнала, фонный и сцинтилляционный. На данный момент измерения идут в тестовом режиме. В задачи ЛНФИ входило измерение содержания радиоактивных примесей в сырье для производства кристаллов и готовых образцах, а также в различных конструкционных материалах.

4.2.3 ПУБЛИКАЦИИ

1. J.Y. Lee, V. Alenkov, L. Ali et al., «A Study of Radioactive Contamination of Crystals for the AMORE Experiment», IEEE Transactions on Nuclear Science 63(2):543-547 (2016).

4.2.3 ИСТОЧНИКИ

1. S. Fukuda et al., "Solar ^8B and hep neutrino measurements from 1258 days of super-kamiokande data ", Phys. Rev. Lett., vol. 86, no. 25, pp. 5651-5655, 2001.

2. Q. R. Ahmad et al., "Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the sudbury neutrino observatory", Phys. Rev. Lett., vol. 89, no. 1, pp. 011301-6p, 2002.

3. R. N. Mohapatra et al., "Theory of neutrinos: A white paper", Rep. Prog. Phys., vol. 70, pp. 1757-1867, 2007.
4. H. Bhang et al., " AMoRE experiment: A search for neutrinoless double beta decay of ^{100}Mo isotope with ^{40}Ca $^{100}\text{MoO}_4$ cryogenic scintillation detector ", J. Phys.: Conf. Ser., vol. 375, pp. 042023-4p, 2012.
5. V. B. Mikhailik, H. Kraus, "Performance of scintillation materials at cryogenic temperatures", Phys. Status Solidi (b), vol. 247, no. 7, pp. 1583-1599, 2010.
6. S. Pirro et al., "Scintillating double-beta-decay bolometer", Phys. Atomic Nucl., vol. 69, no. 12, pp. 2109-2116, 2006.
7. H. J. Kim et al., " Neutrino-less double beta decay experiment using Ca $^{100}\text{MoO}_4$ scintillation crystals ", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 57, no. 3, pp. 1475-1480, Jun. 2010.
8. R. Arnold et al., " Search for neutrinoless double-beta decay of ^{100}Mo with the NEMO-3 detector ", Phys. Rev., vol. D 89, no. 11, pp. 111101-6p, 2014.
9. F. T. Avignone, G. S. King, Y. G. Zdesenko, "Next generation double-beta decay experiments: Metrics for their evaluation", New J. Phys., vol. 7, no. 1, pp. 6-46p, 2005
10. V. V. Alenkov et al., " Growth and characterization of isotopically enriched ^{40}Ca $^{100}\text{MoO}_4$ single crystals for rare event search experiment ", Cryst. Res. Technol., vol. 46, no. 12, pp. 1223-1228.
11. J. H. So et al., " A study of CaMoO_4 crystals for the AMoRE experiment ", Proc. 2012 IEEE Nuclear Science Symp. and Medical Imaging Conf. Record (NSS/MIC), pp. 1987-1990, 2012.
12. H. S. Lee, Dark matter search with CsI(Tl) crystals, 2007.
13. J. H. So, Study of CaMoO_4 scintillation crystals for neutrinoless double beta decay search, 2013.
14. R. Brun, F. Rademakers, "ROOT–An object oriented data analysis framework", Nucl. Instrum. Meth, vol. A 389, pp. 81-86, 1997.
15. F. A. Danevich, V. V. Kobychiev, O. A. Ponkratenko, V. I. Tretyak, Y. G. Zdesenko, " Quest for double beta decay of ^{160}Gd and Ce isotopes ", Nucl. Phys. A, vol. 694, pp. 375-391, 2001.
16. A. N. Annenkov et al., "Development of CaMoO_4 crystal scintillators for a double beta decay experiment with ^{100}Mo ", Nucl. Instr. Meth. A, vol. 584, pp. 334-345, 2008.

4.2.4. Изучение вариаций потока тепловых нейтронов природного происхождения в подземной лаборатории с помощью детекторов на основе ZnS(Ag) с добавкой ^6LiF :

Научный руководитель: зав. лаб. А.М. Гангапшев.

Исполнители:

зав. БНО ИЯИ РАН, В. В. Кузьминов

н. с. Ю. М. Гаврилюк

н. с. В. В. Казалов

м.н.с. С.П. Якименко

м.н.с. Дж.А. Текуева

с.н.с. А.Х.-А. Хоконов

инж. иссл. А.М. Гежаев

н. с. ХНУ им. В.Н.Каразина (г.Харьков) С. И. Панасенко

с. н. с. ХНУ им. В.Н.Каразина (г.Харьков) С. С. Раткевич.

4.2.4 Реферат

В подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900 расположена экспериментальная установка, состоящая из 4-х сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов. Долговременные измерения потока тепловых нейтронов в лаборатории позволят выявить его зависимость от различных параметров, таких как влажность, температура, атмосферное давление, приливные лунные волны в литосфере и т. д. Выявлена годовая модуляция потока тепловых нейтронов в лаборатории с амплитудой волны не менее 5% от среднегодового значения.

4.2.4 Основная часть.

Для исследования вариаций потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900, в одном из боксов лаборатории собрана установка, состоящая из четырех детекторов тепловых нейтронов. Каждый детектор представляет собой бак в форме параллелипипеда (70*70*30см) посматриваемого через окно фотоумножителем ФЭУ-49Б. На дне бака уложен тонкий сцинтиллятор толщиной 0.7мм и площадью 0.36м². Сцинтиллятор представляет собой сплав двух компонент ZnS(Ag) и ^6LiF в соотношении 1/3. ^6Li — является изотопом, на котором происходит захват нейтрона: $^6\text{Li} + n \rightarrow ^3\text{H} + \alpha$. ($Q = 4.79 \text{ MeV}$, $E_\alpha = 2051 \text{ keV}$, $E_n = 2735 \text{ keV}$, $\sigma = 945 \text{ b}$ at 300 K). На данный момент набрана статистика за ~4.2 года измерений. Сезонная вариация потока тепловых нейтронов в НЛГЗ составляет не менее 5% от среднегодового значения. Измерения продолжаются.

4.2.4 ПУБЛИКАЦИИ

1. V.V. Alekseenko, Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshv et al., «The Study of the

Thermal Neutron Flux in the Deep Underground Laboratory DULB-4900», Physics of Particles and Nuclei, 2016, Vol. 47, No. 6, pp. 1057–1060.

4.2.3 ИСТОЧНИКИ

1. Yu. M. Gavriluk, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov, et al., “Indications of capture in ^{78}Kr ”, Phys. Rev. C 87 , 035501 (2013).
2. Yu. M. Gavriluk, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov, et al., “First result of the experimental search for the 2K-capture of ^{224}Xe with the copper proportional counter”, Phys. Part. Nucl. 46 (2), 147 (2015).
3. V. N. Gavrin, “The Russian-American gallium experiment SAGE”, Phys. Usp. 54 , 941 (2011).
4. V. V. Kuzminov, “The Baksan Neutrino Observatory”, Eur. Phys. J. Plus. 127 , 113 (2012).
5. Ju. M. Gavriljuk, A. M. Gangapshev, A. M. Gezhaev, et al., “Working characteristics of the New Low Background Laboratory (DULB-4900, Baksan Neutrino Observatory)”, Nucl. Instr. Meth. A 729 , 576 (2013); arXiv: physics.ins-det/1204.6424. doi 10.1016/j.nima.2013.07.090
6. Yu. V. Sten'kin, “Large scintillator detector for thermal neutron recording”, Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications ISBN: 978-1-60876-826-4 , Ed. by M. Sidorov and O. Ivanov, 2010, Ch. 10, pp. 253–256.
7. V. V. Alekseenko, Yu. M. Gavriluk, V. V. Kuzminov, and Yu. V. Stenkin, “Tidal effect in the radon-induced neutron flux from the Earth's crust”, J. Phys.: Conf. Ser. 203 , 012045 (2010).

4.2.4 Создание воздушной ионной камеры высокого давления (ИКВД) для измерения содержания ^{222}Rn в подземных условиях

Научный руководитель: зав. БНО ИЯИ РАН, д.ф.-м.н. В. В. Кузьминов

Исполнители:

научный сотрудник Ю. М. Гаврилюк;

зав. лаб, к.ф.-м.н. А. М. Гангапшев;

ст. инженер-экспериментатор А. М. Гежаев;

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. В. В. Казалов;

старший инженер Р. А. Этезов;

научный сотрудник ХНУ им. В. Н. Каразина (г. Харьков) С. И. Панасенко;

старший научный сотрудник ХНУ им. В. Н. Каразина (г. Харьков) С. С. Раткевич.

4.2.4 РЕФЕРАТ

Одним из основных источников фонового излучения во всех низкофоновых экспериментах является изотоп ^{222}Rn , присутствующий в воздухе лабораторных помещений, и его дочерние продукты распада. Прямой метод контроля содержания радона в воздухе может быть осуществлён только с помощью импульсных ионных ионизационных камер высокого разрешения, использующих в качестве рабочего газа исследуемый воздух. В БНО ИЯИ РАН была создана цилиндрической воздушной импульсной ионной ионизационной камеры (ЦВИК) с рабочим объёмом ~ 3 л, обеспечивающая при давлении 620 мм рт. ст. энергетическое разрешение 1.7 % при регистрации α -частиц с энергией 5.49 МэВ от распада ^{222}Rn . Изготовлены 3 камеры. Разработана схема и конструкция мобильного Rn-монитора с ЦВИК. Завершены комплектация и изготовление трёх приборов. Проводятся испытания и выпускная наладка первого экземпляра.

4.2.4 Введение

В практике проведения низкофоновых экспериментов заметное место занимает проблема выявления и устранения летучей компоненты радиоактивного фона, создаваемого распадами ^{222}Rn и его дочерних продуктов (д.п.р.) в воздушной среде. Радон является промежуточным радиоактивным летучим изотопом радиоактивного ряда ^{238}U и материнским изотопом конечной части этого ряда: ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3.823$ сут, α -распад, $E_\alpha = 5490$ кэВ) $\rightarrow$ ^{218}Po ($T_{1/2} = 3.11$ мин., α , $E_\alpha = 6003$ кэВ) $\rightarrow$ ^{214}Pb ($T_{1/2} = 26.8$ мин., β) $\rightarrow$ ^{214}Bi ($T_{1/2} = 19.9$ мин., β) $\rightarrow$ ^{214}Po ($T_{1/2} = 164.3$ мкс, α , $E_\alpha = 7687$ МэВ) $\rightarrow$ ^{210}Pb ($T_{1/2} = 21.8$ лет., β) $\rightarrow$ ^{210}Bi ($T_{1/2} = 5.01$ сут., β) $\rightarrow$ ^{210}Po ($T_{1/2} = 138.4$ сут., α , $E_\alpha = 5297$ кэВ) $\rightarrow$ ^{206}Pb (стабильный) [1].

Центральным элементом системы контроля фоновых характеристик воздушной среды является детектор активности радона. Оптимальным представляется детектор, использующий воздух в качестве рабочего вещества. Он должен обладать достаточно большим объёмом для обеспечения высокой чувствительности и хорошим энергетическим разрешением для того, чтобы разделить пики α -частиц от распада ^{222}Rn и дочерних ^{218}Po , ^{214}Po , одновременно присутствующих в пробе.

В БНО ИЯИ РАН разработана конструкция цилиндрической воздушной импульсной ионной ионизационной камеры (ЦВИК), изготовлен детектор и исследованы его характеристики. Результаты этой работы представлены ниже.

Конструкция ЦВИК. На рис. 4.2.4.1 приведен схематический продольный разрез и схема подключения ЦВИК. Одна ось стержней подвески условно смещена на 60° по

отношению к действительному расположению для удобства восприятия рисунка. Названия некоторых узлов приведены в подписи к рисунку.

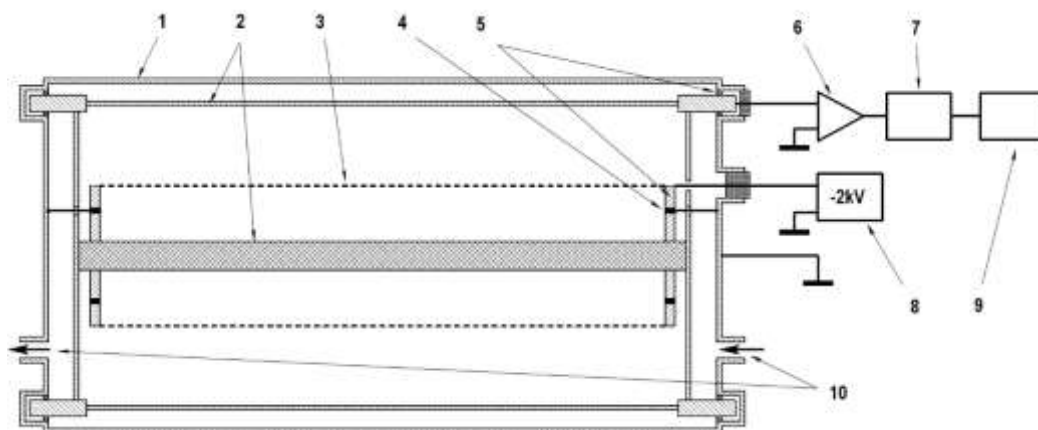


Рис. 4.2.4.1 Схематический продольный разрез и схема подключения ЦВИК.

1. Корпус. 2. Собирающий электрод (анод). 3. Высоковольтный сетчатый электрод (катод).
4. Охранный электрод. 5. Изоляторы. 6. Зарядочувствительный предусилитель.
7. Цифровой осциллограф. 8. Высоковольтный источник. 9. Персональный компьютер.
10. Входной и выходной штуцеры продувки камеры.

Полный объём, из которого может собираться первичная ионизация, равен 3220 см^3 . Длина камеры с отсеком для аппаратуры равна 450 мм. Масса камеры равна ~6 кг.

Рабочие характеристики ЦВИК. Для измерения рабочих характеристик камера была подвешена горизонтально на резиновых растяжках внутри металлического корпуса от персонального компьютера. Отрицательное высокое напряжение (-1.5 кВ) подавалось на катодную сетку от программируемого источника МАНТИГОРА HV-2000N через RCRC-фильтр, где $R=120 \text{ МОм}$, $C=0.047 \text{ мкФ} \times 4 \text{ кВ}$. Сигнал снимался самодельным з.ч.у. Высоковольтный фильтр и з.ч.у. размещены в аппаратном отсеке и экранированы друг от друга металлическими перегородками. С выхода з.ч.у. импульсы подаются на вход моноблочного ц.ос. ЛА-н10-12USB. С выхода ц.о. сигналы поступают на USB-порт переносного п.к. типа Net Book, который управляет режимами работы ц.о. и записывает оцифрованные импульсы. В проверочной серии измерений частота оцифровки была выбрана равной 1.56 МГц (ширина временного канала 0.64 мс). Запуск ц.о. на запись осуществляется по превышению заданного порога. В записанном кадре присутствует «предыстория» (участок шумовой дорожки, предшествующий импульсу) и «история» (сам импульс).

Камера была заполнена с помощью аквариумного насоса фильтрованным

атмосферным воздухом обычного лабораторного помещения без дополнительной обработки. На высоте расположения Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, где проводились измерения, среднее атмосферное давление равно 620 мм рт.ст.

Подход к обработке формы оцифрованных выходных импульсов основан на предположении, что функция отклика з.ч.у. на длинный импульс тока равна сумме нормированных на конкретные амплитуды функций отклика для коротких составляющих импульсов. Функция отклика (ф.о.) з.ч.у. на короткий импульс тока может быть задана разными способами: 1) в аналитическом виде, если известен закон преобразования короткого импульса тока; 2) в виде эмпирического выражения, наилучшим образом аппроксимирующего форму измеренного выходного импульса при подаче на вход короткого импульса; 3) в виде таблицы значений выходного импульса для короткого входного импульса. Как правило, выразить ф.о. устройства, сочетающего зарядочувствительный входной усилитель и последующий усилитель с большим коэффициентом усиления, в общем аналитическом виде оказывается затруднительным. По этой причине для описания ф.о. предусилителя был использован вариант (2). Задача обработки формы импульса заключается в восстановлении значения полного заряда ионизации, которое соответствует амплитуде с выхода усилителя, не имеющего саморазряда. Для получения этой величины записанный импульс предварительно сглаживается методом «скользящего среднего по нескольким точкам». Из амплитуды импульса вычитается значение амплитуды усреднённой шумовой дорожки. Предполагается, что значение амплитуды импульса в начальном канале соответствует неискажённой амплитуде входного импульса тока a_1 . Рассчитывается полная форма выходного импульса от такого тока в виде $a_{i1} = a_1 \cdot \exp(-n_i \cdot \Delta t / \tau)$, где n_i – номер временного канала полного импульса ($i = 0 \div n_{\max}$), Δt – длительность временного канала (0.64 мс), τ – время спада амплитуды экспоненты в е раз, $n_{\max}$ – последний временной канал полного импульса. Полученный расчётный выходной импульс вычитается из полного импульса. Теперь неискажённой оказывается амплитуда a_2 в начальном канале нового импульса. Процедура определения амплитуд a_j повторяется, пока не будет достигнуто $j = n_{\max}$. Полный заряд ионизации соответствует амплитуде импульса, полученного как $\sum a_j$, в точке максимума.

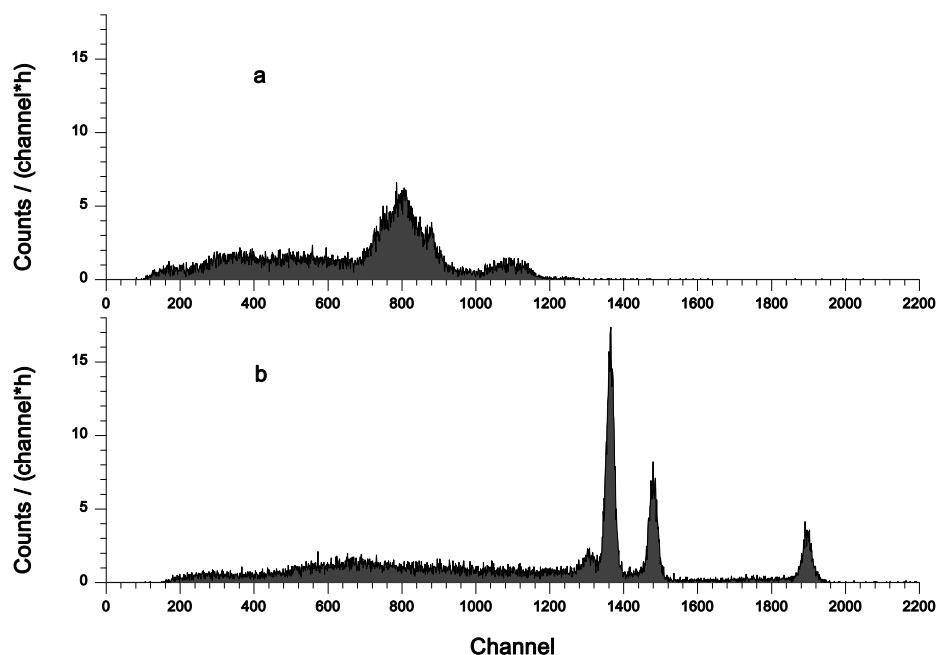


Рис. 4.2.4.2 Спектры амплитуд импульсов от распада радона и его д.п.р. в ЦВИК, заполненной воздухом до 620 мм рт.ст. (0.83 Бар), при напряжении (-1.5 кВ): а) амплитуды исходных импульсов; б) амплитуды восстановленных импульсов.

На рис. 4.2.4.2а представлен нормированный на 1 час. спектр амплитуд импульсов от α -частиц распада радона и его д.п.р. Значения амплитуд считывались в максимуме записанных импульсов. При таком определении амплитуды полученный спектр малоприменим для спектрометрических измерений. На рис. 4.2.4.2б представлен спектр амплитуд, построенный из тех же импульсов после восстановления величины полного заряда. Его значение так же считывалось в канале максимума исходного импульса. На спектре присутствуют пики α -линий ^{210}Po (5297 кэВ), ^{222}Rn (5537 ± 6 кэВ), ^{218}Po (6003 кэВ), ^{214}Po (7687 кэВ). Энергетическое разрешение линии ^{222}Rn равно (1.7 ± 0.1)%.

Результаты исследования рабочих характеристик ИКВД изложены в работе [2].

Конструкция Rn-монитора с ЦВИК.

В соответствии с исходными техническими условиями радоновый монитор должен быть оформлен в виде носимого однокорпусного прибора. В связи с этим за основу был выбран стандартный корпус от персонального компьютера. В состав монитора входят ЦВИК с ЗЧУ и фильтром высокого напряжения, управляющий миникомпьютер (УМК), Цифровой Осциллограф (ЦОС), аквариумный компрессор, блок управления, низковольтные источники питания всех перечисленных узлов. Схема

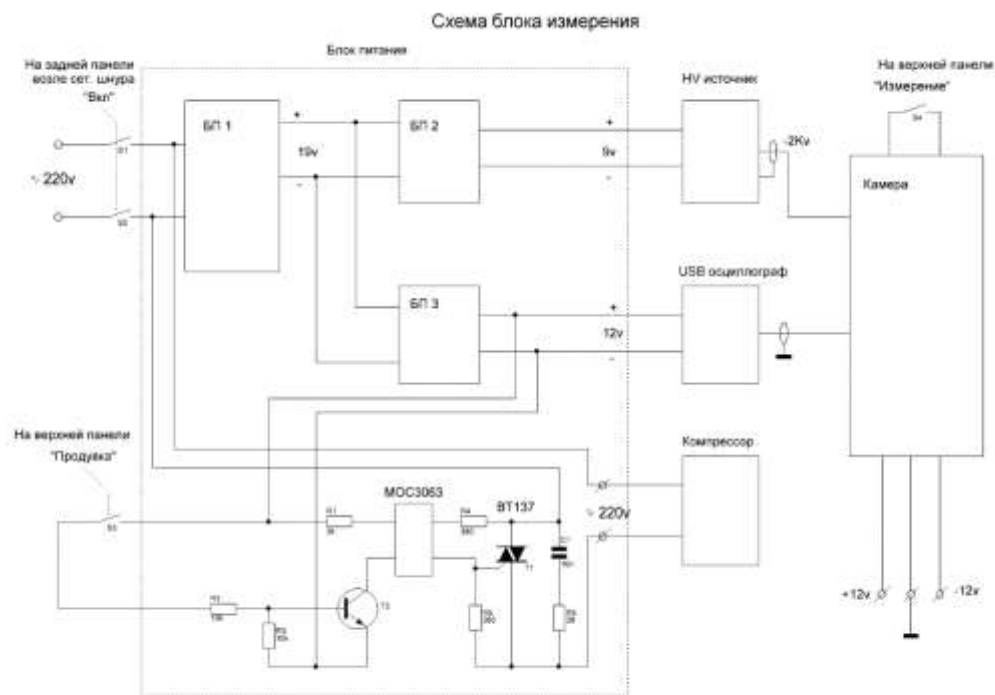


Рис. 4.2.4.3. Схема Rn-монитора на базе ЦВИК.

монитора представлена на рис. 4.2.4.3. Управляющий компьютер на схеме не указан. На этапе лабораторной проверки был использован ноутбук. Для мобильного варианта было решено использовать одноплатный микрокомпьютер MinnowBoard MAX. Все блоки расположены и закреплены на 3х уровнях полок, встроенных в рабочий корпус. Порядок размещения узлов показан на фото рис. 4.2.4.4. Ведётся настройка узлов и отладка программ.



Рис. 4.2.4.4 Вид внутреннего пространства и размещения узлов Rn-монитора

4.2.4 Заключение

Изготовлены 3 ИКВД. Разработана схема и конструкция мобильного Rn-монитора с ЦВИК. Завершены комплектация и изготовление трёх приборов. Проводятся испытания и выпускная наладка первого экземпляра. Работа продолжается.

4.2.4 Источники

1. Публикация 38 МКРЗ. Справочник. «Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения». кн.2, часть 2. М., Энергоатомиздат, 1987.

ICRP Publication 38. “Radionuclide Transformations. Energy and Intensity of Emissions.”.

Published by PERGAMON PRESS, 1984.

2. Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev, R.A. Etezov, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, D.A. Tekueva, S.P. Yakimenko.

“High-resolution ion pulse ionization chamber with air filling for the ^{222}Rn decays detection”

a) arXiv [physics.ins-det]:1508.04295

b) Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Volume 801, 21 November 2015, Pages 27–33

4.2.5 Проверка экспериментально наблюдаемого эффекта годовых и суточных вариаций константы распада ядра ^{214}Po на короткоживущем ядре ^{213}Po

Научный руководитель: ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н. Е.Н. Алексеев

Исполнители:

научный сотрудник Ю. М. Гаврилюк;

зав. лаб, к.ф.-м.н. А. М. Гангапшев;

ст. инженер-экспериментатор А.М.Гежаев;

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. В. В. Казалов;

зав. БНО ИЯИ РАН, д.ф.-м.н. В. В. Кузьминов;

научный сотрудник ХНУ им. В.Н.Каразина (г.Харьков) С. И. Панасенко;

старший научный сотрудник ХНУ им. В.Н.Каразина (г.Харьков) С. С. Раткевич.

4.2.5 РЕФЕРАТ

ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА, ВАРИАЦИИ СУТОЧНЫЕ И ГОДОВЫЕ, ИЗОТОП ^{214}Po

Представлены результаты анализа временных рядов значений периода полураспада (τ) ядра ^{214}Po с различным временным шагом с установок ТАУ-1 (354 дня) и ТАУ-2 (973 дня). Усреднённое значение τ составило величину 163.47 ± 0.03 мкс. В рядах значений τ обнаружены годовая вариация с амплитудой $A = (9.8 \pm 0.6) \cdot 10^{-4}$ и суточные вариации в солнечном, лунном и звёздном времени с амплитудами солнечно-суточная вариация с амплитудой $A_s = (5.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$, лунно-суточная вариация с амплитудой $A_l = (6.9 \pm 2.0) \cdot 10^{-4}$ и звёздно-суточная вариация с амплитудой $A_z = (7.2 \pm 1.2) \cdot 10^{-4}$. Показано, что вариации микроклиматических параметров не могут быть причиной вариаций τ .

4.2.5 ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях [1]-[3], посвящённых поискам пределов выполнимости закона сохранения величины константы распада, для нескольких радиоактивных изотопов достигнуты ограничения на возможные годовые вариации этого параметра на уровне чувствительности не хуже $2 \cdot 10^{-4}$. В то же время в работах [4]-[6] приводятся свидетельства того, что величина эффекта, произведённого излучением исследуемого изотопа, испытывает годовые периодические вариации на уровне $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ под действием не выявленных факторов.

Высокая чувствительность счётных характеристик пары детектор-источник и условий измерений к изменениям известных наземных геофизических, климатических или метеорологических факторов является слабым местом экспериментов по долговременному слежению за постоянством скорости счёта контролируемого излучения. Представляется, что этот недостаток становится несущественным для измерений константы распада, основанных на непосредственной регистрации времени жизни ядра от рождения до

распада. В работе [7] нами была реализована подобная методика для ^{214}Po , который испытывает α -распад ($T_{1/2}=164.3\pm 2.0$ мкс, $E_\alpha= 7.687$ МэВ) [8]. Изотоп ^{214}Po образуется в результате β -распада ^{214}Bi на возбуждённые уровни ^{214}Po . Таким образом, в момент образования ядра ^{214}Po в ряде случаев испускается β -частица и γ -квант (старт), в момент распада – α -частица (стоп). Измерение интервалов времени «старт-стоп» позволяет построить распадную кривую и по ней определить период полураспада. Источник ^{226}Ra ($T_{1/2}=1600$ лет) используется в качестве генератора ядер ^{214}Bi , образующихся в цепочке распадов исходного изотопа.

В настоящей работе приводятся краткое описание использованных установок ТАУ-1 и ТАУ-2 и результаты расширенного анализа данных, накопленных за 354 дня (ТАУ-1) и 973 дня (ТАУ-2).

Методика измерений. В работе использованы две одинаковых установки, состоящие из двух сцинтилляционных детекторов каждая. Детектор Д1 изготовлен из двух склеенных по окружности дисков ($d=18$ мм, $h=0.8$ мм) пластмассового сцинтиллятора. Между дисками в пакете из лавсана толщиной 2.5 мкм размещён источник ^{226}Ra (~50 Бк), в цепочке распадов которого рождается ^{214}Bi . Детектор Д1 регистрирует β -частицы от распада ^{214}Bi и α -частицы от распада ^{214}Po . Детектор Д2, изготовленный из двух кристаллов NaI(Tl) ($d= h=150$ мм), регистрирует γ -кванты. Детектор Д1 вставлен в зазор между кристаллами Д2. Измерения проводятся в БНО ИЯИ РАН в подземной низкофоновой лаборатории КАПРИЗ (установка ТАУ-1) на глубине 1000 м в.э. в защите (15 см Pb + 9 см Cu) и в лаборатории НЛГЗ-4900 (ТАУ-2) на глубине 4900 м.в.э. [9] в низкофоновой защите из 15 см Pb.

Регистрация импульсов осуществляется двухканальным цифровым осциллографом ЛА-н20-12РСІ. Из анализа осциллограмм извлекаются значения задержек между событиями ($\gamma+\beta$) и α и для выбранного периода объединяются в распадную кривую. Компьютерной аппроксимацией из этой кривой выделяется экспонента и находится величина τ .

Поиск долговременных вариаций τ по данным установки ТАУ-2.

Полное время работы детектора ТАУ-2 за период октябрь 2012 - май 2015 составило 973 суток. Полученный из этих данных период полураспада ^{214}Po составляет $\tau=163.47\pm 0.03$ мкс, что согласуется с величиной $\tau=163.58\pm 0.29(\text{стат.})\pm 0.10(\text{сист.})$ мкс, полученной в [10]. Для построения временной зависимости величины τ непрерывный набор данных разбивался на участки равной длительности. Для каждого участка строилась распадная кривая и находилась величина τ . Таким образом формировался непрерывный ряд значений τ с заданным временным шагом. На рис. 4.2.5.1 символами ($\blacktriangledown$) представлена

зависимость от

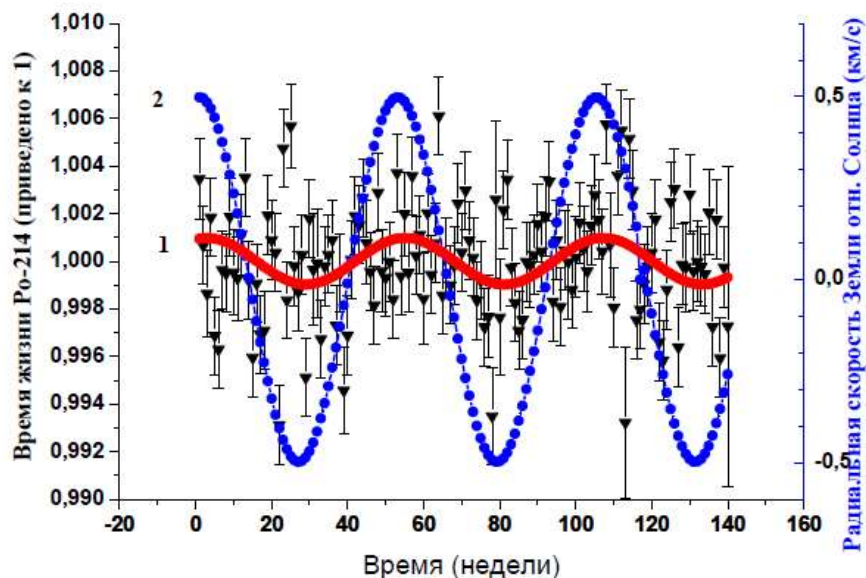


Рис. 4.2.5.1 (▼) - Зависимость от времени нормированных величин $[(\tau/\tau_0)-1]$, полученных за неделю, на установке ТАУ-2 (973 час). Кривая (1) – вариация, полученная из анализа результатов обработки данных методом ВСС. Кривая (2) - скорость Земли относительно Солнца (правая шкала).

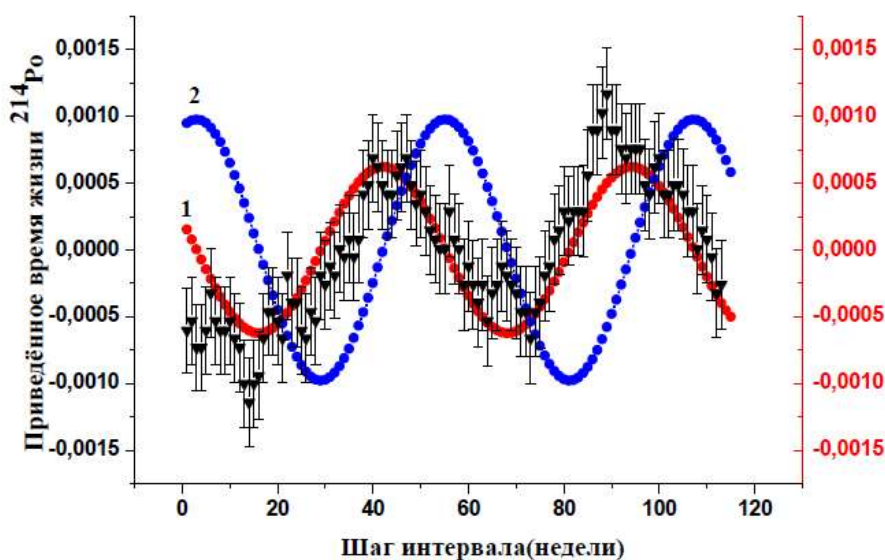


Рис. 4.2.5.2. (▼) - Зависимость от времени величины $[(\tau/\tau_0)-1]$ детектора ТАУ-2, полученная методом ВСС. Кривая 1 - аппроксимационная функция. Кривая 2 – восстановленная зависимость $[(\tau/\tau_0)-1]=9.8 \cdot 10^{-4} \cdot \sin(\omega \cdot (t-196))$.

времени величины τ с недельным шагом накопления данных. Величина τ определялась аппроксимацией кривых распада, полученных за 7 дней набора информации, функцией $F(t)= A \cdot \exp(-\ln(2) \cdot t/\square)+b$. Для поиска какой-либо гармоник в ряду данных выбирается

интервал длительностью 0.5 ожидаемого периода и для этого интервала определяется величина искомого параметра. Далее интервал сдвигается на 1 шаг и процедура повторяется (метод «внутреннего скользящего суммирования» -ВСС). Для поиска годовой периодичности был выбран интервал 0.5 года и шаг 1 неделя. Результат представлен символами (▼) на рис.2. Величина ошибки каждого значения определяется комбинацией статистической ошибки данных и систематической ошибки компьютерного разделения распадной кривой на экспоненту и плоскую подложку. Из этих данных методом χ^2 получена аппроксимирующая зависимость $\tau(t) = \tau_0 \cdot [1 + A \cdot \sin(\omega \cdot (t - \varphi))]$, где τ_0 – средний период полураспада; $\omega = 2\pi/365 \text{ сут}^{-1}$; $A = 6.2 \cdot 10^{-4}$ – амплитуда; $\varphi = 105 \text{ сут.}$ – фазовый сдвиг начальной точки кривой относительно 1 января. (В точке $x = \varphi$ функция $\sin(\omega \cdot (t - \varphi)) = 0$ и испытывает рост с увеличением аргумента). Нормированная зависимость приведена на рис.2, кривая 1. Исходная зависимость имеет тот же период (1 год), амплитуду в $\pi/2$ раз больше и смещена на 0.5 скользящего интервала (91 сут.). Восстановленная годовая волна с амплитудой $A = (9.8 \pm 0.6) \cdot 10^{-4}$ и фазой $\varphi = 196 \pm 7 \text{ сут.}$ приведена на рис. 4.2.5.2 (кривая 2) и на рис. 4.2.5.1 (кривая 1).

Найденная периодическая составляющая не может быть объяснена изменением расстояния между Землей и Солнцем, так как фазы найденного периода и периода изменения расстояния, связанного с движением Земли, различаются на 3 месяца. При орбитальном движении Земли вокруг Солнца имеется такой параметр как относительная скорость движения Земли и Солнца (**Z**). Изменение этого параметра в период работы детектора приведено на рис. 4.2.5.1 (кривая 2). Зависимости от времени величин τ и **Z** совпадают по фазе с точностью ± 1 неделя.

Для поиска возможного влияния периодических изменений микроклиматических параметров на характеристики установок были исследованы многолетние ряды данных о величине температуры, влажности и давления воздуха в рабочих помещениях. Установлено, что фазы годовых вариаций этих параметров опережают фазу вариации τ на ~ 1.5 -3 месяца. Поэтому они не могут являться прямой причиной вариаций τ .

Для поиска суточных вариаций периода полураспада ^{214}Po в солнечном, звездном и лунном времени также был применен метод ВСС. В каждом случае длительность соответствующих суток разделялась на 24 часа. Длительность звёздных и лунных суток в стандартном солнечном времени составляет 23 часа 56 минут 4.09 с и 24 часа 50 мин. 28.2 с, соответственно. В качестве интервала осреднения был выбран промежуток времени 12 часов, шаг сдвига 1 час. Были обнаружены суточные вариации в солнечном, звёздном и лунном времени с амплитудами $(7.5 \pm 1.2) \cdot 10^{-4}$; $(7.2 \pm 1.2) \cdot 10^{-4}$ и $(6.9 \pm 2.0) \cdot 10^{-4}$ соответственно. При изменении точки начала отсчёта анализируемого временного ряда

данных с установки ТАУ-2 фазы звёздно-суточной и лунно-суточной вариаций τ изменяются в соответствии с ожиданиями из астрономических закономерностей движения Земли относительно Солнца, Луны и звёзд. Подобного поведения вариации температуры не наблюдается.

Результаты поиска вариаций τ по данным установки ТАУ-1.

Полное время работы детектора ТАУ-1 за период май 2014 - май 2015 составило 354 суток. Для поиска вариаций различной периодичности была использована та же процедура, что для данных установки ТАУ-2. В ряду данных ТАУ-1 были обнаружены солнечно-суточная вариация с амплитудой $A_c = (1.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$, звёздно-суточная вариация с амплитудой $A_z = (9.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-4}$, лунно-суточная вариация с амплитудой $A_l = (8.0 \pm 3.0) \cdot 10^{-4}$. Для определения амплитуды годовой вариации по методу ВСС не хватает длины накопленного ряда.

Выводы. Из сравнения результатов для ТАУ-1 и ТАУ-2 следует, что выделенные вариации периода полураспада ^{214}Po , происходящие в двух независимых установках, расположенных в низкофоновых лабораториях с разной глубиной залегания и разным микроклиматом, совпадают в пределах статистических ошибок. Для выяснения настоящей причины наблюдаемых вариаций τ был исследован вопрос возможного влияния вариаций температуры, влажности и давления воздуха в подземных условиях на характеристики измерительных установок. Из сравнения фаз годовых вариаций различных природных параметров с фазой вариации параметра τ установлено, что ни один из рассмотренных процессов не совпадает по фазе с τ последней вариацией. Из сравнения поведения суточных вариаций температуры в солнечном, звёздном и лунном времени с поведением одноимённых вариаций параметра τ в ответ на изменения условий формирования выборок можно сделать выводы, что рассмотренные микроклиматические параметры не оказывают заметного влияния на величину τ и на достигнутом уровне чувствительности не могут вызывать наблюдаемых вариаций периода полураспада ^{214}Po .

Обнаружена сильная корреляция солнечно-суточной и лунно-суточной вариации τ и скорости установки в направлении на выделенный астрономический объект. Поскольку однозначная причинная связь между вариациями τ и Z пока не установлена, требуется продолжить работу по изучению обнаруженных закономерностей.

4.2.5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе приведены результаты анализа данных, полученных на установках ТАУ-1 и ТАУ-2, предназначенных для длительного контроля величины периода полураспада изотопа ^{214}Po . Показано, что значение τ испытывает годовые и суточные вариации, которые не могут быть объяснены влиянием вариаций

микроклиматических параметров на характеристики регистрирующей аппаратуры. Исследования и анализ результатов продолжаются.

4.2.5 ИСТОЧНИКИ

1. J.C. Hardy, J.R. Goodwin and V.E. Jacob.// arXiv: 1108.5326.
2. E.Bellotti, C.Broggini, G. Di Carlo, et al.// arXive: 1202.3662.
3. E.Bellotti, C.Broggini, G.Di Carlo, et al.// arXive: 1311.7043.
4. J.H. Jenkins, E. Fischbach, J.B. Buncher, et al. //Astroparticle Physics 32 (2010) 42-46.
5. P.A. Sturrock, E. Fischbach, and J. Jenkins. //arXiv: 1408.3090
6. P.A. Sturrock, E. Fischbach, D. Javorsek II, et al. //Astropart. Phys. 50, (2014) 47-58.
7. E.N. Alexeyev, V.V. Alekseenko, Ju.M. Gavriljuk, et al. //Astropart. Phys., 46 (2013) 23-28.
8. “Table of Isotopes”, Seventh Edition, Edited by C.M. Lederer and V.S.Shirley.// A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, INC., New York, 1978.
9. Ju.M. Gavriljuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev, et al.// NIM, A 729 (2013) 576–580.
10. G. Bellini, J.Benziger, D.Bick et al. (Borexino Collaboration). //Eur. Phys. J. A (2013) 49:92.

4.2.5 ПУБЛИКАЦИИ

1. Е. Н. Алексеев, Ю. М. Гаврилюк, А. М. Гангапшев, А.М.Гежаев, В. В. Казалов, В. В. Кузьминов, С. И. Панасенко, С. С. Раткевич. « Наблюдение суточных и годовых вариаций периода полураспада ^{214}Po .» Доклад на Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий – 2016”. Дубна, 12-15 апреля 2016 г.
2. E. N. Alexeyev, Yu. M. Gavriljuk, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenko, S. S. Ratkevich. “Results of a search for daily and annual variations of the ^{214}Po half-life at the two year observation period”. Physics of Particles and Nuclei, 47(6), (2016), 986-994

5 Отдел экспериментальной физики. Лаборатория гамма-астрономии и реакторных нейтрино.

5.1 ГЕРДА (Germanium Detector Array)

Руководитель И.Р. Барабанов

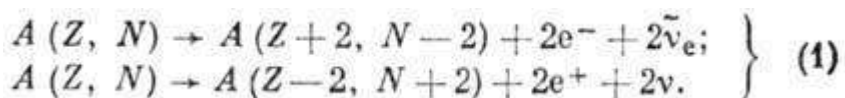
Исполнители: Л.Б. Безруков, В.И. Гуренцов, А.В. Вересникова, Г.Я. Новикова, Е.А. Янович

5.1.1 Реферат

Поиск безнейтринного двойного бета-распада ядер является в настоящее время одной из центральных задач экспериментальной физики низких энергий. Его целью является определение природы массы нейтрино (Дираковской или Майорановской) и возможное нарушение лептонного числа. Решение этих задач будет иметь фундаментальные следствия для физики частиц и космологии. Эксперимент GERDA предполагает создание детектора нового поколения с ультранизким фоном для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge . Основным преимуществом проекта является применение пассивной защиты из жидкого инертного газа и создание германиевых кристаллов нового типа, обеспечивающих высокую степень дискриминации фоновых событий по форме импульса. Проект включает три последовательные фазы. В 2013 г. Завершена первая фаза эксперимента. В результате получен верхний предел для периода полураспада $^{76}\text{Ge} - 2,1 \cdot 10^{25}$ лет (90%). В течение 2016 г полностью введена в строй вторая фаза эксперимента Герда, в которой наряду с модифицированными старыми коаксиальными кристаллами, использованы 30 новых кристаллов нового типа (кристаллы с точечным анодом, так наз. BEG кристаллы) и получен первый результат – новый верхний предел для $0\nu 2\beta$ распада Ge-76 - $T_{1/2} > 4 \cdot 10^{25}$ лет

5.1.2 Введение

ДВОЙНОЙ БЕТА-РАСПАД ($2\beta 0\nu$) (ДБР) - особый вид бета-распада ядер, при котором ядро испускает два электрона или позитрона, превращаясь в ядро-изобару с зарядом $Z \mp 2$ (Z - заряд родительского ядра). В случае сохранения лептонного числа ДБР сопровождается испусканием двух электронных антинейтрино или нейтрино:



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 $2\beta 0\nu$ распад (БДБР):

$$\left. \begin{aligned} A(Z, N) &\rightarrow A(Z+2, N-2) + 2e^-; \\ A(Z, N) &\rightarrow A(Z-2, N+2) + 2e^+. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

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 строго 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 толь разности квадратов масс различных типов нейтрино, но не позволяют определить их абсолютные значения.

В простейшем раширении Стандртной модели БДБР происходит в результате обмена лёгкими Майорановскими нейтрино или смеси правых токов в слабом взаимодействии, при этом время жизни изотопа относительно БДБР обратно пропорционально массе нейтрно Таким образом поиск БДБР позволяет в случае положительного результата подтвердить майорановскую природу нейтрино (как и предполагается в простейших моделях расширения Стандртной 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.

5.1.3 Основная часть. Эксперимент GERDA

В эксперименте GERDA (GermaniumDetectorArray) создан детектор 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 расположении открытых Ge детекторы внутри жидкого газа большого объёма. 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.

Жидкий инертный газ (в настоящее время используется жидкий аргон), используемый в качестве пассивной защиты, может быть очищен до высокой степени чистоты по радиоактивным примесям, недоступной для твердотельной защиты, используемой в предыдущих экспериментах. Кроме того, сцинтилляционный сигнал от жидкого аргона в антисовпадении с сигналом германиевых детекторов может использоваться для дальнейшего подавления фона.

Эскиз принципиальной схемы GERDA изображен на рисунке 5.1.1.



Рисунок 5.1.1 - Схема установки GERDA

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 .

Вторая фаза эксперимента.

В 2016 г закончена подготовка второй фазы эксперимента

1. Изготовлены, испытаны и подготовлены к установке в криостат 30 кристаллов нового типа (кристаллы с точечным анодом, так наз. BEG детекторы) из обогащенного ^{76}Ge .
2. Модернизированы и готовы к использованию коаксиальные детекторы,

используемые в первой фазе эксперимента, которые предполагается использовать во второй фазе эксперимента в параллель с новыми детекторами.

3. Смонтирована полная система все кристаллов (рисунок 3) и установлена в криостат.

4. Создана эффективная система светосбора сцинтилляционного света от жидкого аргона на основе оптических волокон (рис.2).

5. В течение 2016 г полностью введена в строй вторая фаза эксперимента Герда и получен первый результат – новый верхний предел для распада Ge-76.

Установка (Рис.3) включает 7 коаксиальных германиевых детекторов улучшенной конструкции (с общей массой 15,8 кг) и 30 новых детекторов с точечным анодом (BEG детекторы с общей массой 20 кг).

В результате использования анализа формы сигнала детекторов и антисовпадений с сцинтилляционным сигналом от окружающего жидкого аргона индекс фона понижен в 10 раз по сравнению с фазой 1 и достигнут величины 10^{-3} /кэВ.кг.год, что является уникальным достижением. К настоящему моменту на основе экспозиции 10,8 кг.год для периода двойного безнейтринного бета распада изотопа Ge-76 получен верхний предел

$$T_{1/2} > 4 \cdot 10^{25} \text{ лет,}$$

что является наилучшим мировым достижением.

Полученные результаты представлены на рис. 4 отдельно для коаксиальных детекторов и BEG детекторов.

Набор статистики продолжается.

Результат представлен на международной конференции “Neutrino Physics and Astrophysics” (Neutrino 2016) и в настоящее время подготавливается несколько публикаций в центральных физических журналах.



Рисунок 5.1.2 - Система светособирающих волокон

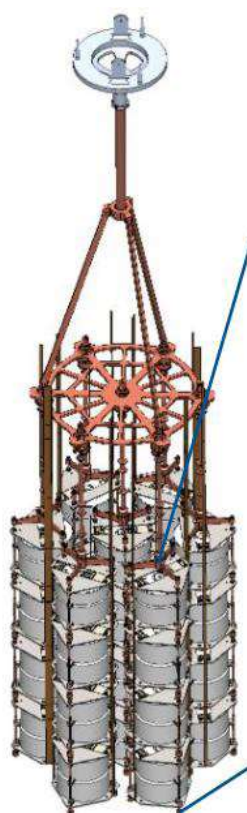


Рисунок 5.1.3 - Система детекторов в полной сборке

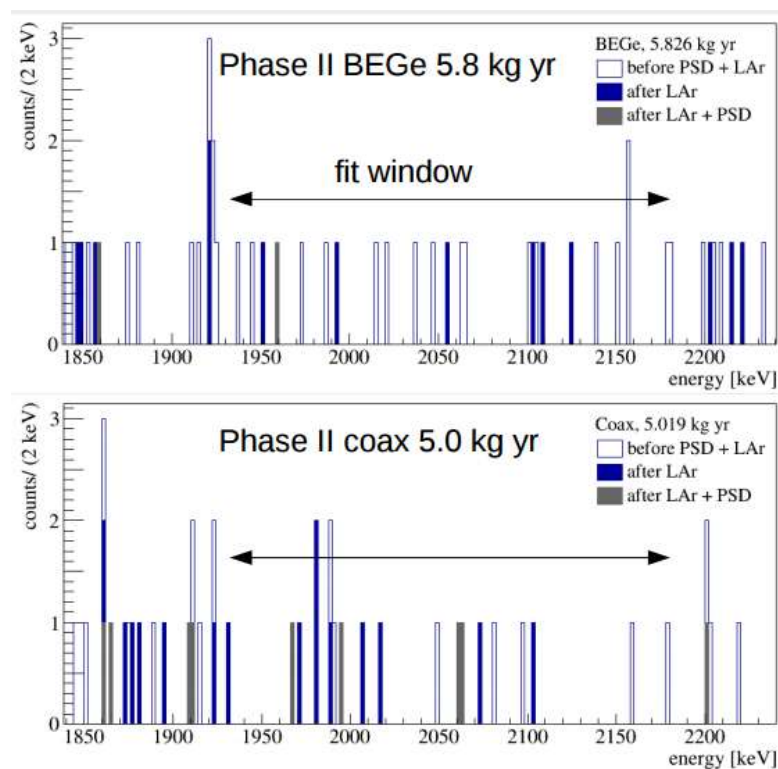


Рисунок 5.1.4 - Полученный результат.

5.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение 2016 г полностью введена в строй вторая фаза эксперимента Герда

Установка включает 7 коаксиальных германиевых детекторов улучшенной конструкции (с общей массой 15,8 кг) и 30 новых детекторов с точечным анодом (с общей массой 20 кг).

В результате использования анализа формы сигнала детекторов и антисовпадений с сцинтилляционным сигналом от окружающего жидкого аргона индекс фона понижен в 10 раз по сравнению с фазой 1 и достигнут величины 10^{-3} /кэВ.кг.год, что является уникальным достижением. К настоящему моменту на основе экспозиции 10,8 кг.год для периода двойного безнейтринного бета распада изотопа Ge-76 получен верхний предел $T_{1/2} > 4 \cdot 10^{25}$ лет, что является наилучшим мировым достижением. Набор статистики продолжается.

Результат представлен на международной конференции “Neutrino Physics and Astrophysics” (Neutrino 2016) и в настоящее время подготавливается несколько публикаций в центральных физических журналах.

5.1 ПУБЛИКАЦИИ

1. “GERDA collaboration” Limit on the radiative neutrinoless double electron capture of ^{36}Ar from GERDA Phase I” Eur. Phys. J. C (2016) 76: 652

2. GERDA Collaboration “The performance of the Muon Veto of the GERDA experiment EPJC 76 (2016)298”

3. GERDA collaboration “Search of Neutrinoless Double Beta Decay with the GERDA Experiment” Nucl. Part. Physics Procs. 273 -- 275 (2016) 1876

Число публикаций, индексируемых в бд Web of Sciences – 2.

5.2 Разработка проекта создания большого сцинтилляционного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН

Исполнители:

И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А. В. Вересникова, Ю. М. Гаврилюк, А. М. Гангапшев, В. И. Гуренцов, В. П. Заварзина, В. В. Казалов, С. Д. Крохалева, В. В. Кузьминов, А. С. Курлович, В. Ю. Гришина, Б. К. Лубсандоржиев, С. Б. Лубсандоржиев, Г. Я. Новикова, А. М. Пшуков, В. В. Синев, Ш. И. Умеров, Е. А. Янович

5.2 РЕФЕРАТ

В 2016 г. проводились модельные расчёты геонейтринного эффекта для сравнения с общепринятой моделью. Результаты измерений геонейтрино двумя действующими детекторами Borexino и KamLAND находятся в согласии между собой, но слегка отличаются. Различие можно объяснить разной толщиной земной коры при условии распределения радиоактивных источников преимущественно в земной коре. На базе расчетов подготовлена статья.

Продолжаются работы по измерению содержания ^{14}C в жидких сцинтилляторах в низкофоновой лаборатории БНО при помощи детектора малого объема. Измерения необходимы для разработки сцинтиллятора, не содержащего ^{14}C , для детектора большого объема.

Подготовлен проект развития БНО, основанный на создании детектора большого объема для исследования нейтринных потоков.

Проведены измерения концентрации радиоуглерода ^{14}C в образце сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола объемом 1.36 л. Двумя методами анализа были получены результаты, совпадающие в пределах экспериментальной погрешности, усредненный результат $(3.3 \pm 1.1) \times 10^{-17}$ ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$).

5.2 ВВЕДЕНИЕ

В последнее время активно обсуждается ряд проектов по созданию больших сцинтилляционных жидкостных детекторов для регистрации крайне редких событий, в частности нейтринных потоков от различных природных источников. Фундаментальной задачей является измерение потоков антинейтрино от распадов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K , содержащихся в земных недрах. Надежная регистрация этих частиц (геонейтрино) позволит установить вклад энерговыделения от радиоактивного распада указанных изотопов в общий тепловой поток Земли. С другой стороны, рассматривается возможность регистрации нейтрино от Солнца, образующихся в реакциях захвата протонов ядрами C, N, O и F, а затем позитронного распада образовавшихся ядер (так называемый цикл CNO), с помощью крупномасштабного жидко-сцинтилляционного

детектора (типа LENA). Измерение потока этих нейтрино позволит получить важную информацию о химическом составе солнечных недр.

5.2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. Детектор геонейтрино.

В качестве детектора геонейтрино предлагается использовать жидкосцинтилляционный детектор объемом от несколько килотонн до нескольких десятков килотонн. Объем детектора определяется необходимой статистикой регистрируемого эффекта. Проведенное моделирование показало, что 25 кт·лет измерений достаточно, чтобы сделать выводы о количестве урана и тория в Земле о их распределении внутри.

Проблема фонов в сцинтилляторе.

В сцинтилляторах для исследования слабых нейтринных потоков очень важной характеристикой является радиационная чистота. На сегодняшний день самый чистый сцинтиллятор используется в детекторе BOREXINO. По содержанию урана и тория его чистота доходит до 10^{-18} г/г.

Однако, этого недостаточно для изучения низкоэнергетических событий ($< 150-200$ кэВ), где в качестве фона выступает радиоактивный изотоп углерода ^{14}C (граничная энергия бета-спектра 156.48 кэВ, а граничная энергия нейтринного спектра от pp -цикла 423 кэВ). Измеренное содержание ^{14}C в жидком сцинтилляторе находится на уровне 10^{-18} г/г в детекторе BOREXINO, в то время, как расчетное значение находится на уровне 10^{-21} г/г.

Непонятно откуда берется ^{14}C в жидком сцинтилляторе, так как, согласно современной теории происхождения нефти, она хранится без контакта с атмосферой сотни миллионов лет. За это время весь ^{14}C должен был распасться, так как его период полураспада 5730 лет. Есть одна гипотеза, которая объясняет происхождение ^{14}C в нефти, но она требует тщательной проверки. Если удастся подтвердить эту гипотезу, то появляется возможность значительно уменьшить его содержание в сцинтилляторе или убрать вовсе.

5.2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана установка по измерению содержания радиоуглерода ^{14}C в образцах жидкого сцинтиллятора. Проведены первые измерения со сцинтиллятором на основе отечественного ЛАБа. Значение фона в диапазоне 200-300 кэВ составляет 1.5–2 события в час, Результат содержания ^{14}C оказывается на порядок больше полученного в сцинтилляторе в детекторе Borexino. Усреднённое по двум методам измерение, дает значение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = (3.3 \pm 1.1) \times 10^{-17}$.

Разработана модель фона детектора, которая позволяет надежно выделить сигнал от спектра ^{14}C . На рисунке показано измерение фона за 282 часа и смоделированный фон от внешнего и внутреннего излучения от источников естественной радиоактивности.

Разработан метод измерения собственной радиоактивности сцинтиллятора по коррелированным распадам ^{212}Bi - ^{212}Po от цепочки тория с характерным временем между событиями до 1000 нс и ^{214}Bi - ^{214}Po от цепочки урана во временном окне до 15 мкс.

Полученная методика комплексного исследования образцов сцинтиллятора позволяет выбрать растворитель для полномасштабного детектора объемом 10^4 м^3 с пониженным содержанием ^{14}C .

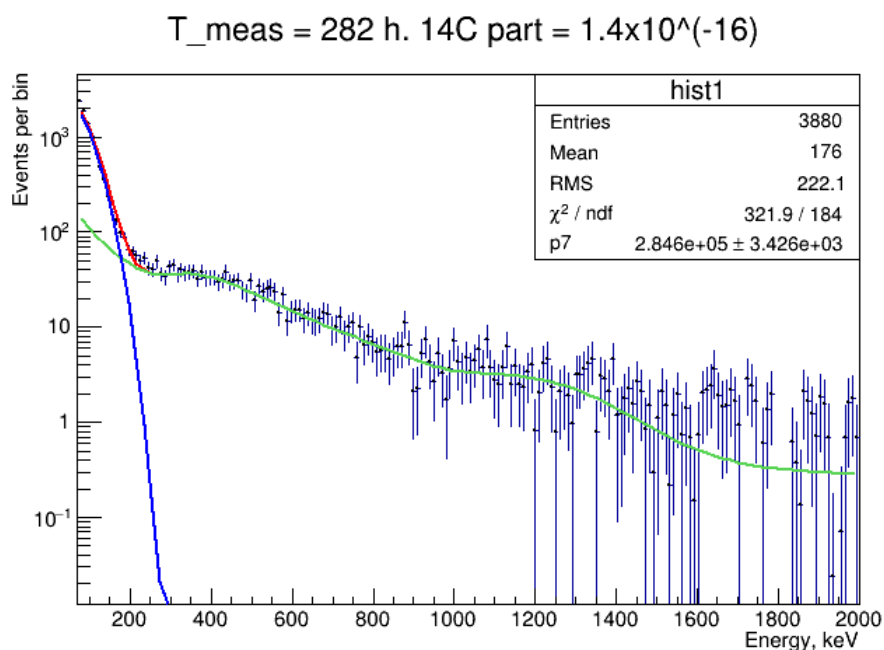


Рисунок 5.2 Измерения образца сцинтиллятора на основе ЛАБ китайского производства за 282 часа. Точки с погрешностью – эксперимент. Зеленая линия – смоделированный фон на основе модели с семью компонентами. Синяя линия – спектр ^{14}C . Красная – сумма фона и спектра ^{14}C .

5.2 ПУБЛИКАЦИИ

1. И.В. Синев, Прототип большого сцинтилляционного детектора геонейтрино на БНО, препринт ИЯИ-1419/2016.

2. T. Enqvist, I. Barabanov, L. Bezrukov, et al. Measuring the ^{14}C content in liquid scintillators, Journal of Physics: Conference Series **718**, 062018 (2016).

3. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А.В. Вересникова и др., Детектор большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН для исследования природных потоков нейтрино для целей гео- и астрофизики, препринт ИЯИ-1422/2016.

4. L. Bezrukov and V. Sinev, Atmospheric Neutrinos for Investigation of Earth Interior, Письма в ЭЧАЯ, № [47], issue 6, p. 915-917, 2016; Physics of Particles and Nuclei, 2016, Vol. 47, No. 6, pp. 915–917.

5. L.B. Bezrukov, A.S. Kurlovich, B.K. Lubsandorzhiev et al., On Geoneutrinos, EPJ Web of Conferences 125, 02004 (2016).

5.3 Поиск всплесков гравитационного излучения на подземном детекторе ОГРАН

Координатор Леонид Борисович Безруков

Научный руководитель Валентин Николаевич Руденко

5.3 РЕФЕРАТ

Гравитационный детектор ОГРАН на пикете ПК-14 Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН выведен в рабочий режим «непрерывного мониторинга» с целью выполнения тестовой серии наблюдений.

5.3 ВВЕДЕНИЕ

Гравитационный детектор ОГРАН создаётся содружеством ИЯИ РАН, ГАИШ МГУ и ИЛФ СО РАН для регистрации гравитационных волн. Детектор размещён в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Статус детектора.

Завершен монтаж гравитационного детектора ОГРАН на пикете ПК-14 - месте постоянной подземной дислокации данной установки. Проведены тесты функционального соответствия конструктивных узлов и блоков детектора, их соответствия проектным характеристикам. Обнаруженные эффекты деградации ряда параметров как вакуумно – механической системы откачки, так и электронно-оптических компонент детектора, успешно устранены. Остающейся технической проблемой является активная термостабилизация детектора на уровне сотых долей градуса в режиме долговременного мониторинга гравитационного фона. Главным достижением отчетного периода явился монтаж зеркал высокой технологии с рекордной отражательной способностью (резкость 30 тыс.) и малыми потерями. Измерена спектральная плотность шума детектора и проведен тест силовой калибровки, с использованием модельного сигнала, имитирующего гравитационное волновое воздействие. Данные демонстрируют достижение чувствительности близкой к проектной.

В текущем состоянии антенна выведена в рабочий режим «непрерывного мониторинга» с целью выполнения тестовой серии наблюдений вместе с приборами

контроля окружающих возмущений, включая гравитационную антенну геофизического уровня «УЛИТКА».

Параллельно на пилотной модели Крио-ОГРАН выполнялись эксперименты по увеличению чувствительности антенны за счет охлаждения тела детектора до азотной температуры. Предварительные результаты продемонстрировали перспективность предложенной методики.

5.3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введении в строй активной термостабилизации детектора на уровне сотых долей градуса позволит перейти в режим долговременного мониторинга гравитационного фона.

5.3 ПУБЛИКАЦИИ

1. Повышение чувствительности гравитационного детектора OGRAN. В.В.Кулагин, С.И.Орешкин, С.М.Попов, В.Н.Руденко, И.С.Юдин “Ядерная физика и инжиниринг”. 2016. V.7. №. 1. (на рус. яз.) Physics of Atomic Nuclei. 2016. V.79. №. 11-12. (на англ. яз.)
2. Opto-acoustical gravitational bar detector with cryogenic mirrors/V.V.Kulagin , S.I.Oreshkin , S.M.Popov , V.N.Rudenko , M.N.Skvortsov, I.S.Yudin Gravitational and Cosmology v. 22 , N 4 , p 374, 2016
3. Current status of GW experiment and multi-messenger astronomy / V.N.Rudenko Proc.Int.Workshop “Quark Phase Transition and Multimessenger Astronomy” издания Publishing house “Sneg” Pyatigorsk, том 1, с. 96-104, 2016

6 Лаборатории новых методов детектирования нейтрино и других элементарных частиц

Научный руководитель: зав. лаб. И.М. Железных.

Исполнители:

ст.н.с. С.Х. Караевский,

н.с. В.И. Береснев,

н.с. А.А. Миронович,

м.н.с. А.Г. Гасанов,

ст. инж. Н.Г. Литвинова,

ст. инж. Л.М. Захаров

6 РЕФЕРАТ

Новые методы регистрации космических нейтрино и других частиц сверхвысоких и экстремально высоких энергий 10^{15} - 10^{21} эВ (альтернативные оптическому методу) дают возможности создать крупномасштабные детекторы космических нейтрино с регистрирующими объемами вещества мишеней (морской воды, антарктического льда или лунного грунта) в десятки и даже тысячи кубических километров, в том числе, с использованием новейших лавинных фотодиодов.

Проведены разработки альтернативных методов детектирования космических лучей:

- радиоастрономического метода регистрации космических лучей экстремально высоких энергий $>10^{19}$ эВ (нейтрино, протонов и др.), взаимодействующих с поверхностными слоями Луны;

- гидроакустического метода детектирования космических нейтрино сверхвысоких энергий $>10^{15}$ эВ;

- радиоволнового метода регистрации космических нейтрино сверхвысоких энергий $>10^{15}$ эВ, взаимодействующих с массивами антарктического льда;

Разработаны полупроводниковые детекторы частиц на основе микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД).

Методы выполнения работы:

Использование высокочувствительного радиотелескопа БСА ФИАН (Пушинская радиоастрономическая обсерватория) для разработки радиоастрономического метода регистрации нейтрино.

Разработка метода быстрого моделирования «трехмерных» электронно - адронных каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий 10^{15} - 10^{21} эВ в веществе с целью дальнейших расчетов производимых ими радио (или акустических) сигналов.

Разработка и создание глубоководного измерительного модуля для исследования акустических шумов и коэффициента Грюнайзена на больших глубинах Океана.

Создание и испытание макетов (лабораторных образцов) сцинтилляционных детекторов нейтронов на основе МЛФД.

Разработка полистирольного сцинтиллятора для регистрации нейтронов.

6 ВВЕДЕНИЕ

Как известно для регистрации взаимодействий астрофизических нейтрино с энергиями 6×10^{13} - 2×10^{15} эВ с массивом прозрачного антарктического льда потребовался объем детектора IceCube на Южном полюсе порядка 1 кубического километра. Для детектирования космических нейтрино с энергиями 10^{16} - 10^{19} эВ и выше (в том числе космологических или ГЗК - нейтрино) объем нейтринной мишени должен быть не менее 10 - 1000 кубических километров вещества.

Для создания нейтринных телескопов подобных гигантских размеров еще в 80-х годах в ИЯИ РАН впервые были предложены альтернативные методы детектирования нейтрино, а именно радиоволновой (Г.А. Гусев и И.М. Железных [1]) и радиоастрономический (Р.Д. Дагкесаманский и И.М. Железных [2,3]) методы с использованием антарктического льда и Луны как нейтринных мишеней. Еще раньше в ФИАНе (Г.А. Аскарян и Б.А. Долгошеин) был предложен гидроакустический метод детектирования нейтрино.

Разработка радиоволнового нейтринного телескопа РАМАНД в Антарктиде [4], разработка глубоководного оптического детектора (проект НЕСТОР) и акустического детектора нейтрино (проект САДКО) в Средиземном море успешно выполнялись до 1991 г. в рамках программы М.А. Маркова «Советский ДЮМАНД» (1981-1991).

Одновременно в рамках этой программы была весьма успешно выполнена разработка нового класса полупроводниковых лавинных фотоприемников - микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД), предложенных в ИЯИ РАН (З.Я. Садыгов и др.).

В конце 80-х ИЯИ РАН опережал зарубежных научных конкурентов на 5-10 лет.

Несмотря на трудности с финансированием работа по созданию альтернативных детекторов нейтрино и других элементарных частиц продолжалась в 90-е и 2000-е годы. Так поиск радиоимпульсов, которые возникают при взаимодействии нейтрино с лунным реголитом, проводился на Калязинском радиоастрономическом телескопе в начале 2000-х в рамках программы В.А. Матвеева «Нейтринная физика и астрофизика». Это позволило

не только опробовать радиоастрономический метод, но и получить ограничения на потоки космических нейтрино экстремально высоких энергий [5].

Удавалось получать финансирование и для создания новых типов МЛФД, и они были созданы. См. публикации [6, 7]:

Sadygov Z., Jejer V., Musienko Yu., Zheleznykh I., et.al. Supersensitive avalanche silicon photodiode with surface transfer of charge carriers”.- Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res., A504 (2003), 301-303.

Sadygov Z., Olshevski A., Chirikov I., Zheleznykh I., Novikov A.. “Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiodes: their present status, maximum possibilities and limitations”. Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res., A 567, (2006) 70–73.

Однако наши проекты, нацеленные на перспективное сотрудничество в 2010-е годы, например, с Грецией и другими европейскими странами по глубоководным исследованиям, связанным с созданием нейтринного телескопа в Средиземном море [8], или с США по разработке нейтринных радио телескопов в Антарктиде [9], не были поддержаны Минобрнауки.

Следует особо подчеркнуть, что если в 80-е – 90-е годы в ИЯИ РАН и в 2000-е годы в ОИЯИ были разработаны и созданы микропиксельные лавинные фотодиоды – МЛФД, то в ближайшие годы будут широко востребованы и нанопиксельные лавинные фотодиоды.

ПЗС-матрицы на основе лавинных фотодиодов с поверхностным переносом заряда [6, 7] могут найти самое широкое применение в приборостроении (системы обнаружения и др.). К сожалению несколько предложений ИЯИ РАН и ОИЯИ по разработке и созданию сверхчувствительных и быстродействующих полупроводниковых матричных лавинных фотоприемников также не были поддержаны (РФФИ, Минобрнауки и др.).

В настоящее время проекты создания в Антарктиде гигантских радиодетекторов нейтрино с регистрирующим объемом вплоть до 10^3 куб. км (ARA - Askaryan Radio Array и ARIANNA) осуществляются американскими учеными.

Представляет большой интерес проект использования радиоастрономического телескопа SKA (площадью 1 кв. км) в Австралии и Южной Африке для регистрации радио импульсов от каскадов экстремально высоких энергий, производимых нейтрино и другими космическими частицами, бомбардирующими Луну [10, 11].

Ведущие зарубежные фирмы Японии, Европы вкладывают большие средства в производство новых лавинных фотодиодов именно МЛФД-типа.

Таким образом развитие альтернативных методов детектирования космических нейтрино и других частиц, а также полупроводниковых МЛФД, которое началось в ИЯИ

РАН, сейчас весьма успешно продолжено, но в основном за рубежом. Конечно, выше перечисленные исследования необходимо продолжать и в России.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что успехи в разработках координатно-чувствительных (матричных) детекторов элементарных частиц на основе новейших мультипиксельных лавинных фотодиодов – МЛФД будут иметь важнейшее значение не только для экспериментальной физики высоких энергий и астрофизики, но и для других областей науки и техники, в частности для создания в России нового поколения медицинского оборудования (позитронно-эмиссионных томографов и др.).

6 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НИР В 2016 г.

6.1 Разработка радиоастрономического метода детектирования нейтрино

6.1.1 Составление проекта (ИЯИ РАН совместно с ПРАО ФИАН) «Радиоастрономический метод детектирования нейтрино и космических лучей экстремально высоких энергий»

Проект направлен на разработку метода детектирования наносекундных импульсов радиоизлучения в метровом диапазоне радиоволн от каскадов, возникающих при взаимодействии космических частиц предельно высоких энергий (в частности нейтрино) с поверхностными слоями Луны.

Для выполнения этой работы будет использована пилотная антенная система широкоугольного радиотелескопа метровых волн, создаваемого в Пушинской радиоастрономической обсерватории, а также высокочувствительный радиотелескоп БСА ФИАН (площадь которого 187х384 кв. м).

6.1.2 Разработка метода быстрого моделирования «трехмерных» электронно-адронных каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий (10^{15} - 10^{21} эВ): расчеты характеристик каскадов в лунном грунте (совместно с МГУ).

Новая схема для быстрого моделирования каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий в плотной среде (так называемая гибридная схема Л.Г.Деденко (физфак МГУ)) успешно применялась последние годы в расчетах акустических сигналов от каскадов в воде. В 2016 г. эта схема была использована для расчетов следующих характеристик электромагнитных каскадов в лунном грунте: продольных и поперечных распределений избытка электронов (над позитронами) в каскадах, а также временных характеристик каскадов.

Именно такие характеристики каскадов определяют величину и свойства когерентного черенковского радиоизлучения электронно-фотонных каскадов в диэлектрических средах (антарктический лед, лунный грунт и др.), и их необходимо знать

прежде всего для дальнейших расчетов радиоизлучения каскадов с энергиями 10^{20} эВ и выше.

Предложение об использовании гибридного метода для расчета электронного избытка в каскадах, также как и предложение об использовании установок ПРАО ФИАН в качестве прототипов низкочастотных (~100 МГц) радио детекторов для лунных экспериментов были доложены на Международном симпозиуме в ФИАНе [12], а статья “Development of the radio astronomical method of cosmic particle detection for Extremely High-Energy Cosmic Ray Physics and Neutrino Astronomy”, Igor Zheleznykh, Rustam Dagkesamanskii, Leonid Dedenko, and Grigorii Dedenko принята к печати [13].

6.2 Разработка ядерно-физических зондов для глубоководных исследований характеристик морской среды

6.2.1 Составление проекта (ИЯИ РАН совместно с ИО РАН) «Разработка и создание новых эффективных технологий и технических средств (ядерно-физических и океанологических зондов) для многоцелевых глубоководных исследований океанской среды»

Приборы, разработанные для глубоководных исследований состояния водной среды в местах размещения нейтринных детекторов, могут внести большой вклад в исследование Мирового океана.

Для выполнения задач проекта ЛНМДН и ЭЧ совместно с ЛАЯ, КОРЭ и Институтом океанологии РАН предложено провести следующую НИР (заявка представлена в РНФ):

разработка и создание прототипа нового мобильного приборно-технического комплекса, допускающего размещение на маломерных судах, для проведения океанологических и ядерно-физических измерений и отбора проб воды и донных отложений с использованием новых бескабельных возвращаемых глубоководных (до 6 км) измерительных устройств и пробоотборников с целью определения актуальных параметров фактического состояния морской среды, включая гидрооптические характеристики на различных глубинах, химическую загрязненность и радиоактивность воды и грунта.

Комплексный характер проблем, связанных с изучением Мирового океана, требует создания и использования в российских океанологических исследованиях передовых (отечественных!) технологий, новейшей исследовательской аппаратуры (в том числе ядерно-физической), переоснащения и модернизации научно-исследовательского флота.

Такой подход даст возможность существенно увеличить российский вклад в ряд международных проектов и тем самым усилить эффективность сотрудничества России с другими государствами в фундаментальных и прикладных исследованиях, проводимых в Мировом океане.

Проект направлен также на активизацию российских океанологических исследований с применением уникальных глубоководных технологий и оборудования, которые будут разработаны в ходе проекта: а именно бескабельных зондов и автоматических пробоотборников (Атлантическое отделение Института океанологии РАН), глубоководного альфа-бета-гамма спектрометра (Институт ядерных исследований РАН и Атлантическое отделение ИО РАН), компактного погружного фотометра на основе фотодиодов нового поколения для измерения оптических свойств воды (ИЯИ РАН).

Созданная аппаратура будет также использована для комплексных подспутниковых океанологических наблюдений с целью валидации результатов и совершенствования методов зондирования Океана.

Макетный образец сцинтилляционного спектрометра α , β и γ -излучения предложен ИЯИ РАН и АО ИО РАН для определения активности радионуклидов *in situ*.

Спектрометр должен обеспечивать работу в следующих вариантах:

1. Компактный бортовой низкофоновый ($\alpha\beta$)- γ - спектрометр с большой эффективной площадью регистрации для измерения уровня активности и определения состава α и β излучающих радионуклидов (радий, радон и т.п.) в пробах воды и грунта.

2. Погружной автономный низкофоновый α , β , γ – спектрометр/счетчик с большой эффективной площадью регистрации. Для регистрации α и β - частиц в погружном спектрометре предлагается использовать тонкопленочный полимерный (с малой эффективностью регистрации γ - квантов) сцинтиллятор с большой площадью регистрации. Большая регистрирующая площадь сцинтиллятора обеспечивает требуемый эффективный объем детектора.

В основе спектрометра лежит метод регистрации и измерения энергии γ -квантов в режиме временных совпадений с регистрацией α - или β -частиц, излучаемых в том же акте распада, что и γ -кванты.

В отличие от обычно применяемых счетчиков радиоактивности предлагаемый спектрометр позволяет определить состав излучателей, и, совместно с другими измеряемыми параметрами (распределение течений и т.д.), источники возникновения этих излучателей.

Актуальность задачи контроля радиационной обстановки в Океане с увеличением использования радиоактивных материалов в промышленности и военных применениях только возрастает.

Предложена также разработка компактного погружного фотометра на основе лавинных фотодиодов нового поколения для измерения оптических свойств воды.

Предлагаемый компактный погружной фотометр отличается простотой, надежностью и высокой чувствительностью за счет использования в нем современных лавинных фотодиодов. Подобный фотометр будет за счет применения микроканальных полупроводниковых структур обеспечивать уверенную регистрацию вспышки света интенсивностью 100-200 фотонов/вспышку при погрешности измерения интенсивности примерно 10-20% (суммарно, с учетом влияния всех компонентов конструкции).

С помощью такого погружного фотометра возможны измерение прозрачности, рассеяния света в морской воде. Фотометр состоит из стеклянной сферы, набора лазерных светодиодов с различной длиной волны и фотоприемников на основе лавинных фотодиодов, системы контроля за стабильностью параметров излучения. Импульсы светодиодов с разной длиной волны излучения разнесены по времени и синхронизированы с их регистрацией фотоприемниками.

6.2.2 Реконструкция и тестирование электронного блока аналогового тракта для 4-х канальной гидроакустической антенны глубоководного автономного измерительного модуля

1. Проведена реконструкция и тестирование электронного блока аналогового тракта для 4-х канальной гидроакустической антенны глубоководного автономного измерительного модуля (Рис.6.1) для измерения коэффициента Грюнайзена.

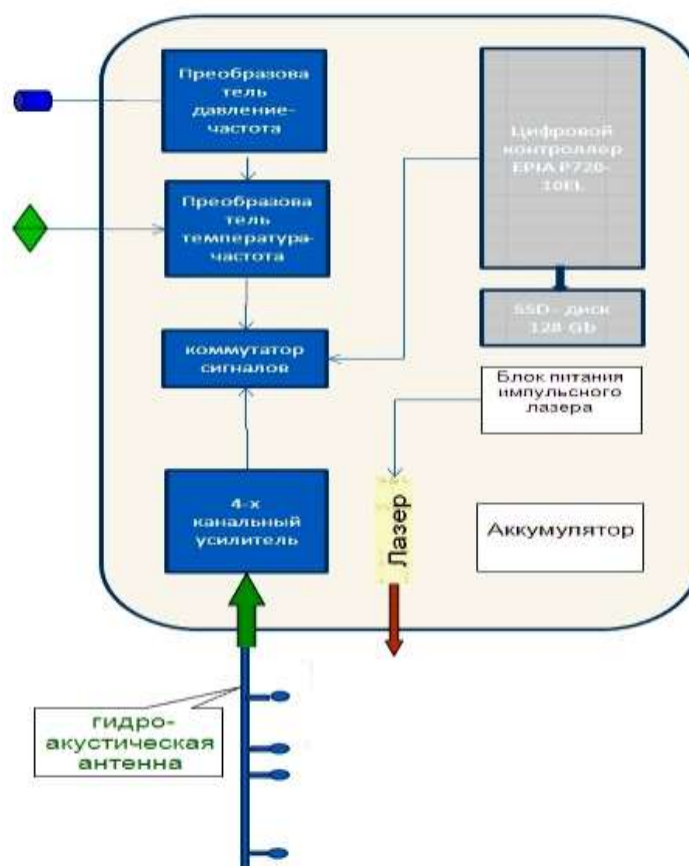


Рисунок 6.1 Схема глубоководного автономного измерительного модуля.

Аналоговый тракт содержит 4-х канальный усилитель на операционных усилителях с маломощными предусилителями на полевых транзисторах КП903А, согласованные с пьезокерамическими гидрофонами.

Амплитудно-частотная характеристика усилителей адаптирована под предполагаемым спектром гидроакустических шумов в океане (Рис. 6.2). В диапазоне от 1 кГц до 15-20 кГц коэффициент передачи плавно растет (6Дб\окт.) и затем, после 35-30 кГц, резко падает. Выходное напряжение согласовано с диапазоном входных напряжений аналого-цифрового преобразователя и не превышает 500 мВ.

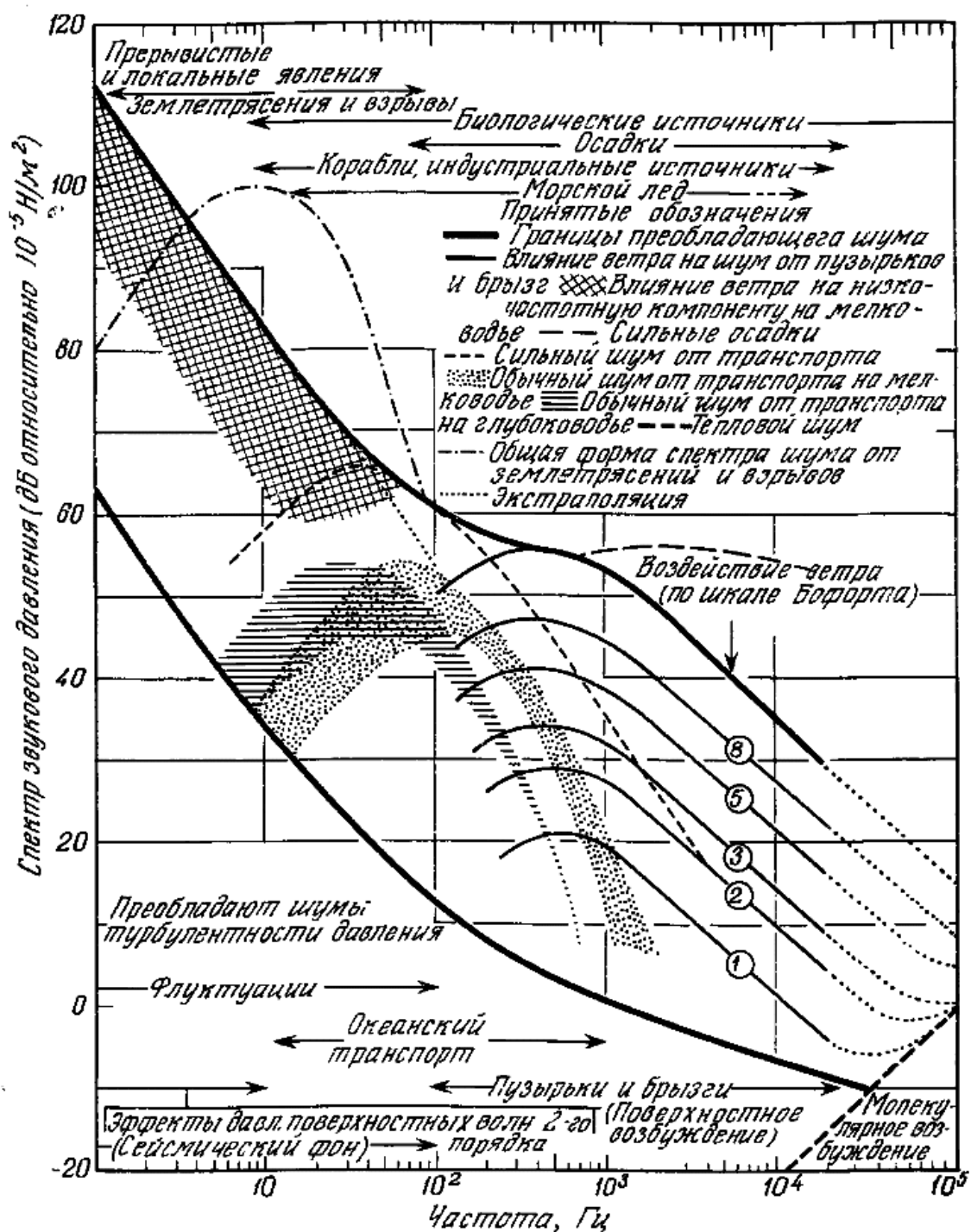


Рисунок 6.2 Характерные спектры гидроакустических шумов в Океане.

6.3 Разработка детекторов элементарных частиц

6.3.1 Разработка лабораторных образцов детекторов элементарных частиц на основе

МЛФД

Результаты работы по разработке и изготовлению матричного сцинтилляционного детектора на основе микропиксельных лавинных фотодиодов MAPD-3N и

сцинтилляционных кристаллов LFS (совместно с ЛАЯ ИЯИ РАН) для использования в установке, предназначенной для изучения эффектов протон-протонной корреляции в реакциях взаимодействий дейтронов и гелия-3 с водородом, опубликованы в [14].

6.3.2 Участие в разработке и изготовлении детекторов медленных нейтронов

1) Для калибровки детектора тепловых нейтронов на основе сцинтиллятора ZnS/LiF, световодов и контроля поля нейтронов источника разработаны и изготовлены два ^3He – детектора медленных нейтронов. Детекторы используют серийные газовые пропорциональные счетчики «Гелий-18/140-8,0/БЦ», дополненные усилителем-формирователем с выходным сигналом ТТЛ уровня. Для подсчета нейтронов использованы 4-х канальный 16-ти разрядный счетчик Quad Scaler 401 и система сбора данных на основе САМАС.

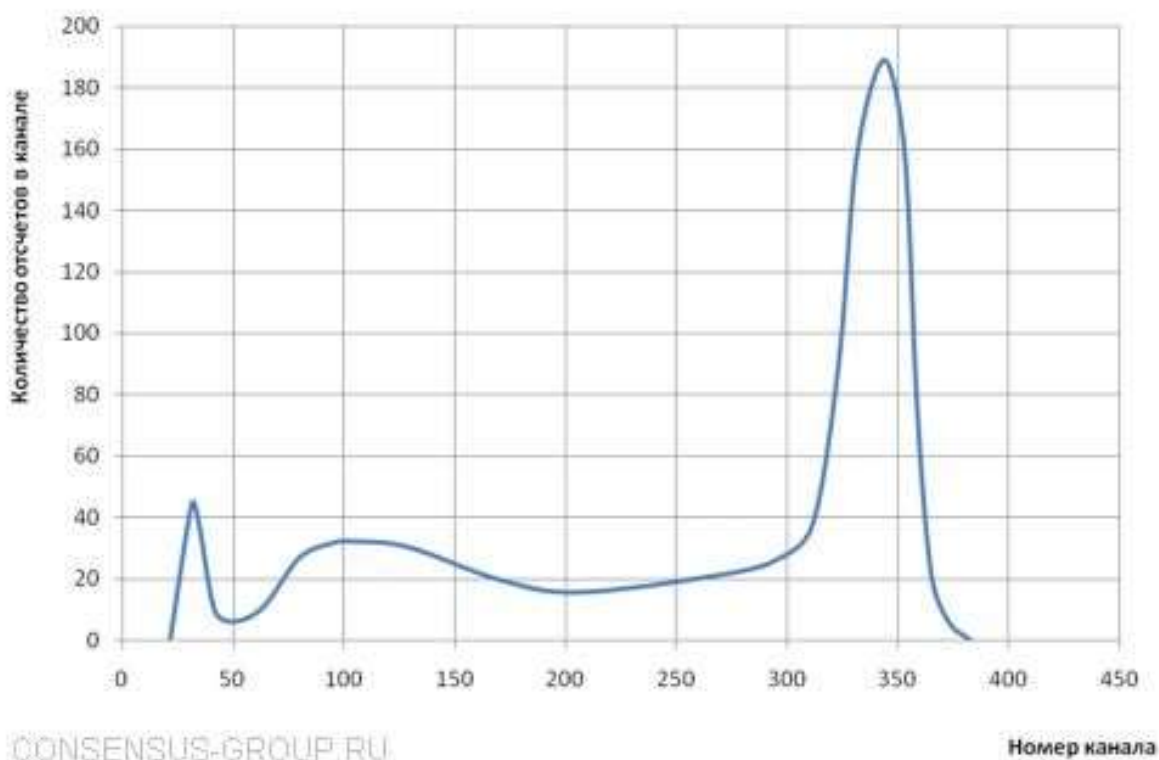


Рисунок 6.3 Амплитудный спектр импульсов при рабочем напряжении 1400 В.

2) Совместно с лабораторией ЛАИ ИЯИ проведены работы по модернизации и исследования детектора медленных нейтронов на основе пропорциональной газовой камеры с активным слоем из ^{10}B площадью $120 \times 120 \text{ мм}^2$ (Рис. 6.4).

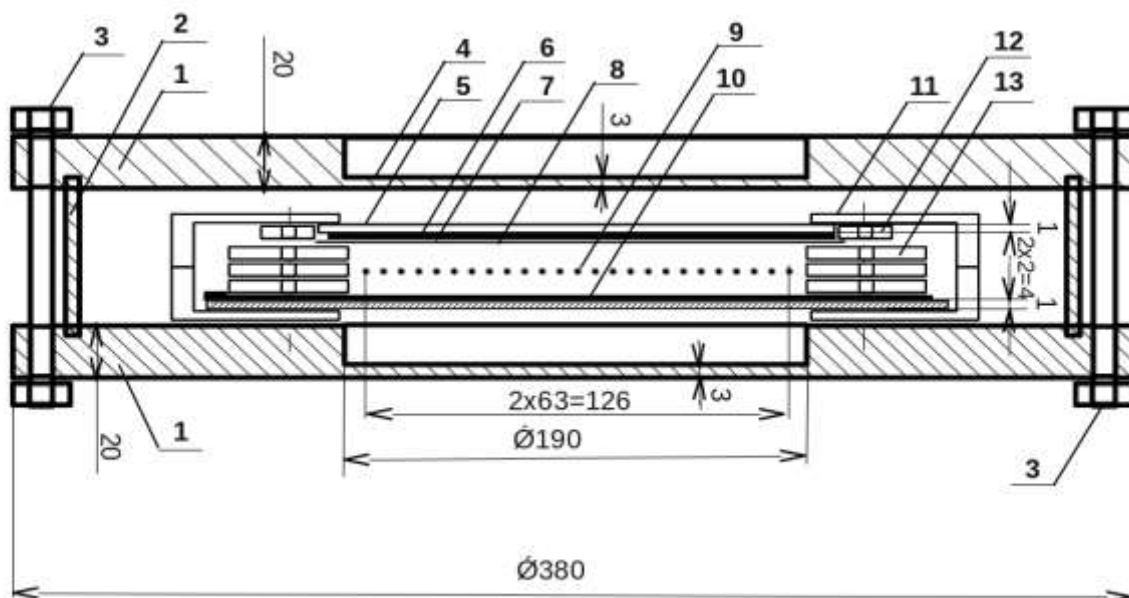


Рисунок 6.4 Устройство пропорциональной камеры. 1 -крышки корпуса; 2 - боковая стенка корпуса; 3 -болты и гайки; 4 - окно; 5 - пластина из стекла; 6 - слой бора-10; 7 - слой полиимида; 8 - слой алюминия; 9 - высоковольтный сигнальный проволочный анод координаты X; 10 - сигнальный полосковый катод координаты Y; 11 - фторопластовый кожух детектирующего элемента; 12 - фиксатор стеклянной пластины; 13 - несущий элемент проволоки.

Эксперименты проводились на электронном ускорителе ЛУЭ-8 с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов $\sim 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Детектор был размещен под углом 60° к пучку на расстоянии $\sim 6 \text{ м}$ от бериллиевой мишени. Детектор показал низкую чувствительность к γ -квантам и быстрым нейтронам. Соотношение эффект/фон $< 10^{-5}$. Амплитудное разрешение $\sim 15\%$, координатное разрешение $\sim 2,5 \text{ мм}$.

Результаты работ по созданию детекторов нейтронов доложены на конференциях [15-17] и опубликованы [18-19].

6.3.3 Разработка и создание нейтронного полистирольного сцинтиллятора

В течение 2016 года совместно с ИФВЭ (Протвино) продолжены работы в рамках программы разработки и создания нейтронного полистирольного сцинтиллятора (НПС). Для получения НПС с повышенной сцинтилляционной эффективностью (СЭ) были опробованы в качестве шифтера 2п-диметиламинофенил 1,2(d)-нафтоксазол и 1-метил – 2-бифенилил – 4,5-бензиндол. В качестве активатора использовались паратерфинил (РТ) и РРО.

Измерены сцинтилляционные эффективности полученных образцов полистирольного сцинтиллятора разных составов (в зависимости от концентрации

активаторов в пределах 0,5-5%). Концентрация шифтера во всех образцах была одинакова – 0,05%. Получены графики зависимости СЭ образцов от концентрации активатора в стироле. Амплитуды максимумов кривых СЭ изготовленных образцов лежат в районе 5% концентрации активаторов в стироле и в пределах ошибки измерения (5%) равны СЭ эталона (стирол + 2% РТ + 0,05% РОРОР).

Технология полимеризации стирола в ампулах для изготовления модуля детектора тепловых нейтронов (длина 14–16 см и диаметр 2,5 см) пока не позволяет стабильно получать однородные прозрачные заготовки для создания чувствительной части детектора тепловых нейтронов (ДТН).

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместно с ПРАО ФИАН и ЛАЯ ИЯИ составлен проект использования высокочувствительного радиотелескопа БСА ФИАН (площадь которого 187х384 кв. м) в качестве пилотной установки для разработки метода детектирования импульсов радиоизлучения метровых длин волн от каскадов, возникающих при взаимодействии космических лучей (протонов, нейтрино) предельно высоких энергий с веществом лунного реголита.

Для выполнения подобной работы будет также использована антенная система широкоугольного радиотелескопа метровых волн, создаваемого в ПРАО ФИАН.

Так называемая гибридная схема Л.Г. Деденко (физфак МГУ) была использована для расчетов следующих характеристик электромагнитных каскадов в лунном грунте: продольных и поперечных распределений избытка электронов (над позитронами) в каскадах, а также временных характеристик каскадов.

Результаты работы по разработке двух пилотных антенных систем для поиска импульсных сигналов в метровом диапазоне радиоволн от Луны, а также результаты расчетов характеристик электромагнитных каскадов в лунном грунте были представлены в докладе И.М. Железных и др. на 19 Международном симпозиуме по взаимодействиям космических лучей сверхвысоких энергий [12]. Статья [13] принята к печати.

Разработка ядерно-физических зондов для глубоководных исследований характеристик морской среды. С целью создания в местах размещения нейтринных телескопов ЛНМДН и ЭЧ совместно с ЛАЯ, КОРЭ и Институтом океанологии РАН предложено провести НИР (заявка подана в РНФ):

1. Разработка и создание прототипа нового мобильного приборно-технического комплекса, допускающего размещение на маломерных судах, для проведения океанологических и ядерно-физических измерений, включая измерения

гидрооптических характеристик на различных глубинах и радиоактивности воды и грунта. В случае получения финансирования ИЯИ РАН совместно с АО ИО РАН будут созданы макетный образец сцинтилляционного спектрометра α , β и γ -излучения для определения активности радионуклидов *in situ*, а также компактный погружной фотометр на основе лавинных фотодиодов нового поколения для измерения оптических свойств воды.

2. Проведена реконструкция и тестирование электронного блока аналогового тракта для 4-х канальной гидроакустической антенны глубоководного автономного измерительного модуля для измерения коэффициента Грюнайзена.

Разработка детекторов элементарных частиц:

1. В 2016 г. ЛНМДН и ЭЧ принимала активное участие в разработке и изготовлении детекторов нейтронов совместно с сотрудниками ЛНИ и ЛАЯ [14-19].

2. Разработка и создание нейтронного полистирольного сцинтиллятора.

Продолжена работа по отработке технологии получения нейтронного полистирольного сцинтиллятора.

В дальнейшем отработку технологии полимеризации стирола в ампулах с увеличенной длиной для изготовления модуля детектора тепловых нейтронов следует продолжать, поскольку полистирольные детекторы нейтронов обладают сравнительно низкой стоимостью, коротким временем отклика. Применение таких детекторов перспективно в атомной энергетике, радиационной медицине, геологоразведке нефтегазовых месторождений, экологии, на таможне и в других областях науки и техники.

А.А. Миронович участвовала в работе по обнаружению сверхпроводимости в сульфиде водорода [20].

6 ИСТОЧНИКИ

1. Г.А.Гусев, И.М. Железных. О детектировании мюонов и нейтрино по радиоизлучению каскадов, производимых ими в диэлектрических средах. Письма в ЖЭТФ, т. 38, стр.505-507, 1983.
2. I.M. Zheleznykh (Moscow, INR). Prospects for large scale detectors of superhigh energy neutrinos (10^{15} eV to 10^{20} eV). Published in “Boston 1988, Proceedings of the 13th Int. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics”, ed. J.Schneps, T. Kafka et al., World Scientific, pp. 528-535.
3. Р.Д. Дагкесаманский, И.М. Железных, Радиоастрономический метод регистрации нейтрино и других элементарных частиц супервысоких энергий. Письма в ЖЭТФ, т. 50, вып.5, стр. 233-235, 1989.
4. I.N. Boldyrev, M.A. Markov, A.L. Provorov, I.M. Zheleznykh et al. RAMAND: a status report. “Venice 1991”, Proc. of the 3d Int. Workshop on Neutrino Telescopes, ed. Baldo-Ceolin, pp. 337-355.
5. Березняк А.Р., Дагкесаманский Р.Д., Железных И.М., Коваленко А.В., Орешко В.В., «Ограничения на поток нейтрино сверхвысоких энергий по радиоастрономическим наблюдениям», Астрон. журнал, 82, № 2, 1-8 (2005).
- R.D. Dagkesamanskii, V.A. Matveev, I.M. Zheleznykh/ “Prospects of radio Detection of extremely high energy neutrinos bombarding the Moon”//Nuclear Instr. & Methods in Phys. Res. A 626-627 (2011) S44-S47.
6. Sadygov Z., Jejer V., Musienko Yu., Zheleznykh I., et.al. Supersensitive avalanche silicon photodiode with surface transfer of charge carriers”.- Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res., A504 (2003), 301-303.
7. Sadygov Z., Olshevski A., Chirikov I., Zheleznykh I., Novikov A.. “Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiodes: their present status, maximum possibilities and limitations”. Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res., A 567, (2006), 70–73.
8. V.A. Matveev, I.M. Zheleznykh, P.I. Korotin, V.T. Paka, N.M. Surin/ “Alternative Techniques for dear-water monitoring”//Nuclear Instr. & Methods in Phys. Res. A 626-627 (2011) S106-S108.
9. D. Besson, R. Dagkesamanskii, E. Kravchenko, I Kravchenko, I. Zheleznykh/ “Tethered balloons for radio detection of ultra high energy cosmic neutrinos in Antarctica”//Nuclear Instr.& Methods in Phys. Res. A662 (2012) S50-S53.
10. J.D.Bray, J.Alvarez-Muniz, S.Buitink, R.D.Dagkesamanskii, R.D.Ekers, H.Falcke, K.G.Gayley, T.Huege, C.W.James, M.Mevius, R.L.Mutel, R.J.Protheroe, O.Scholten, R.E.Spencer, S.ter Veen/ Lunar detection of ultra-high-energy cosmic rays and neutrinos with the Square Kilometre Array // arXiv: 1408.6069v2, 19 Dec. 2014.
- .
11. J.D.Bray, J Alvarez-Muniz, S.Buitink, R.D.Dagkesamanskii, R.D.Ekers, et al., Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array, PoS, V.1, pp. 961-977, 2015.

6 ПУБЛИКАЦИИ

1. I.M. Zheleznykh, R.D. Dagkesamanskii, L.G. Dedenko, G.L. Dedenko “Detection of extremely high-energy cosmic rays and neutrinos by radio astronomical Method”. 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interact. (ISVHECRI), (устный доклад). Москва, ФИАН, 22 - 27 Августа 2016 г. <http://www.lebedev.ru>
2. Igor Zheleznykh, Rustam Dagkesamanskii, Leonid Dedenko, and Grigori Dedenko. “Development of the radio astronomical method of cosmic particle detection for Extremely High-Energy Cosmic Ray Physics and Neutrino Astronomy”, EPJ Web of Conferences, 2016.
3. С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, М.В. Мордовской, А.Г. Гасанов, И.М. Железных / «Установка для изучения NN-корреляций в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$ »// ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2016, том 80, № 3, с. 254–259.
4. IV совещание по малоугловому рассеянию нейтронов "МУРомец 2016" 28-30 сентября 2016 Гатчина, устный доклад, С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, А. И. Драчев, С. Х. Караевский, Г. В. Солодухов/ «Двухкоординатный гибридный детектор медленных нейтронов на основе твердого бора-10 и газовой камеры размерами 128 x128 мм²»//, сайт: <https://oiks.pnpi.spb.ru/events/muromets>, 2016
5. The 2nd international conference on particle physics and astrophysics, 10-14 October 2016, Moscow/ S. I. Potashev, Yu. M. Burmistrov, A. I. Drachev, S. Kh. Karaevsky, E. S. Konobeevski, S. V. Zuyev (устный доклад, С.И. Поташев)// TWO-DIMENTIONAL HYBRID SOLID STATE GAS DETECTOR BASED ON 10B LAYER FOR THERMAL AND COLD NEUTRONS сайт: <http://indico.cfr.mephi.ru/event/4/>
6. Научно практическая конференция "Научное приборостроение-современное состояние и перспективы развития" (стендовый доклад)/ С.Х.Караевский, С.И.Поташев, Ю.М.Бурмистров, А.И.Драчев // «Двухкоординатные газовые детекторы тепловых и холодных нейтронов размерами 120x120мм² и 380x380мм² с активным слоем из твердого бора-10» сайт: http://fano.gov.ru/ru/press-center/card/?id_4=37554
7. В. С. Литвин, В. Н. Марин, С. Х. Караевский, Д. Н. Трунов, С. Н. Аксёнов, А. А. Столяров, Р. А. Садыков / “СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ И СВЕТОВОДОВ” // КРИСТАЛЛОГРАФИЯ, 2016, том 61, № 1, с. 115–119
8. S. Potashev, Yu. Burmistrov, A. Drachev, S. Karaevsky, E. Konobeevski, S. Zuyev/ “Two-dimensional solid state gaseous detector based on 10B layer for thermal and cold neutrons” // <https://scirate.com/arxiv/1612.06664>
9. I. A. Troyan, A. G. Gavriliuk, R. Rüffer, A. Chumakov, A. A. Mironovich, I. S. Lyubutin, D. Perekalin, A. Drozdov, M. Eremets, “Observation of superconductivity in hydrogen sulfide from nuclear resonant scattering”, Science 351, 1303-1306 (2016).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

поиск и исследование редких процессов с участием элементарных частиц на протонных и вторичных (пионных, каонных, мюонных) пучках высокой интенсивности в целях открытия новых явлений, происходящих на сверхмалых расстояниях;

создание новых и развитие существующих методов регистрации частиц и излучений для будущих экспериментов в области физики элементарных частиц;

экспериментальный поиск гравитационного излучения космического происхождения, создание прототипов детекторов гравитационных волн;

в области физики нейтрино и астрофизики:

поиск частиц темной материи в неускорительных и коллайдерных экспериментах;

разработка методов регистрации тёмной материи;

исследование осцилляционных переходов нейтрино в экспериментах с использованием пучков дальних нейтрино от ускорителей (эксперименты T2K, OPERA, NOvA) и реакторов (эксперимент Daya Bay);

прецизионное измерение параметров нейтринных осцилляций, поиск в них эффектов CP-нарушения;

измерение космических потоков нейтрино высоких энергий, обнаружение их источников, сооружение с этой целью глубоководного Байкальского нейтринного телескопа с рабочим объемом до 2 км³;

исследование потоков нейтрино, образованных в распадах тяжёлых ядер и ядерных реакциях, происходящих в недрах Земли, создание с этой целью детектора геонейтрино;

развитие методов нейтринной спектроскопии Солнца, мониторинг потока солнечных нейтрино различных энергий;

исследование формирования нейтринного излучения нейтронных звёзд;

развитие радиоастрономического метода детектирования нейтрино предельно высоких энергий по наблюдениям всплесков когерентного черенковского радиоизлучения;

в области физики космических лучей:

измерение состава и энергетического спектра всех компонентов космического излучения (ядер, электронов, позитронов, фотонов) во всем диапазоне измеряемых энергий;

выяснение природы космических лучей сверхвысоких энергий, обнаружение их источников, исследование механизмов их генерации;

исследования физических процессов ускорения, распространения и излучения заряженных частиц в космической плазме;

поиск и исследование антиматерии в составе космического излучения;

исследование астрофизических источников гамма-квантов высоких энергий, обнаружение новых типов таких источников, исследование механизмов генерации гамма-квантов;

мониторинг галактических и солнечных космических лучей, их состава, временных вариаций;

исследование влияния космических лучей на атмосферные процессы в натурных и лабораторных экспериментах;

геофизические эффекты космических лучей и их влияние на климат.

Из полученных результатов можно выделить:

В апреле 2016 г. на оз. Байкал введён в эксплуатацию в режиме долговременного набора данных первый кластер Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD в его проектной конфигурации, содержащий восемь гирлянд оптических модулей общим числом 288 (по 36 оптических модуля в каждой). Кластер Baikal-GVD является нейтринным телескопом мультимегатонного масштаба, который способен вести исследование потока астрофизических нейтрино на уровне чувствительности ~ 0.4 события в год. В ходе эксплуатации установки в течение 2016 г. выполнена калибровка измерительных систем телескопа, осуществляется непрерывный мониторинг фоновых условий среды, непрерывное измерение координат оптических детекторов. По мере накопления и первичного анализа данных формируется банк экспериментальных событий для последующего физического анализа, и в частности, в задаче выделения мюонных событий от нейтрино астрофизической природы. В течение 2015-2016 г.г. разработаны критерии подавления фона от свечения водной среды, методы восстановления мюонных траекторий и критерии выделения событий от мюонов из-под горизонта. Разработаны программы численного моделирования событий от нейтрино астрофизической природы и событий от фоновых потоков атмосферных мюонов и нейтрино. Все программы адаптированы для использования в единой среде обработки и моделирования BARS.

В работах 2016 года по исследованию физики первичных чёрных дыр было показано, что существуют двухполевые модели инфляции, в которых возможно формирование спектра первичных флуктуаций плотности, приводящего к переизбытку рождения первичных чёрных дыр в радиационную эпоху ранней Вселенной; проведен

расчёт ограничений на параметры двухполевых моделей с ловушками, на основе наблюдательных данных по первичным чёрным дырам. В исследование ядерных эффектов в фотоядерном взаимодействии мюонов сверхвысокой энергии был произведён расчёт ядерного затенения для ряда лёгких ядер.

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов проводился анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску редкого распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu \nu$, т.е. распада положительно каона на мюон и три нейтрино, запрещенного в первом порядке в Стандартной Модели и возможного только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при поиске тяжёлых нейтрино на основе данных E949.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, были проведены новые сеансы по набору статистики и начат анализ данных по поиску тяжёлых нейтрино в распадах каонов на лету.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведён анализ данных, накопленных в 2014-2016 гг. в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования CP-нарушения в лептонном секторе. Кроме того, важным результатом анализа является измерение сечений взаимодействия нейтрино (мюонных и электронных) с различными ядрами, а также поиск стерильных нейтрино.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой в рамках нейтринной платформы ЦЕРН проведена разработка магнитного нейтринного детектора Baby-MIND, который будет состоять из 33 слоёв (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами. Детектор Baby-MIND будет одним из основных элементов эксперимента WAGASCI для измерения нейтринных сечений в области энергий 1 ГэВ на ядрах мишеней из воды и пластика (углерод и кислород), что, в свою очередь, позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC).

Разработан программный пакет FANSY 2.0 для моделирования взаимодействий адронов в широком интервале энергий ($10^{11} - 10^{20}$ эВ, воспроизводящий данные LHC, основные характеристики взаимодействий протон-протон в широком интервале энергий

($10^{11} - 10^{20}$ эВ) и генерацию основных типов вторичных частиц, оказывающих влияние на развитие ШАЛ, содержащих u, d, s, c кварки (заряженные и нейтральные пионы, каоны, нуклоны и барионы, чармированные частицы, мезонные и барионные резонансы)

Результаты сравнения данных ЛНС и моделирования компланарности ЭВЧ противоречат первоначальной, предложенной около 15 лет назад, концепции объяснения компланарности большими поперечными импульсами (в плоскости компланарности) ЭВЧ и требуют новой концепции объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности.

Предложена концепция эксперимента на ЛНС для проверки явления компланарности энергетически выделенных вторичных частиц при сверхвысоких энергиях.

Показано, что измерение диффузионного гамма-излучения при $E \sim 1$ ТэВ является очень мощным методом ограничения доли протонов в спектре космических лучей сверхвысоких энергий. Используя имеющуюся в настоящее время статистику и плохое знание галактического диффузного фона, невозможно исключить чисто протонный или почти чисто протонный состав при $(1 - 40)$ ЕэВ.

В международном эксперименте NOvA с участием сотрудников ИЯИ впервые были получены результаты, которые с достоверностью 2.5σ указывают на то, что примеси мюонных и тау нейтрино в третьем массовом состоянии нейтрино не одинаковы. Это означает, что угол смешивания θ_{23} не равен 45° градусам, т. е. смешивание нейтрино не является максимальным.

Анализ результатов по регистрации на дальнем детекторе электронных нейтрино в пучках мюонных нейтрино позволил исключить обратную иерархию масс нейтрино ($m_1 > m_2 > m_3$), угол смешивания $\theta_{23} < 45^\circ$ и значение фазы нарушения СР-инвариантности $\delta = 90^\circ$, на уровне 3σ .

Разработан мультикатодный счётчик, который является эффективным детектором одиночных электронов, эмитируемых из поверхности катода. Результаты проведённых измерений позволили получить предел на константу кинетического смешивания для скрытых фотонов с массой от 5 эВ до 10 кэВ. Измерение температурной зависимости темнового тока позволит прояснить вопрос о наличии криогенной составляющей темновой скорости счёта, которая, как следует из экспериментов, растёт по мере охлаждения детектора от 270-250 К до температуры жидкого гелия. В случае подтверждения, это может стать одним из интересных физических результатов.

Проведены работы по поддержанию установок LVD и АСД в работоспособном состоянии для обеспечения научных программ экспериментов; обработка информации по поиску всех типов нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд на детекторах АСД и LVD; установлен верхний предел на частоту коллапсов в Галактике. Изучен фон, создаваемый мюонами космических лучей и естественной радиоактивностью; изучена генерация нейтронов мюонами к.л. в различных веществах, входящих в состав детекторов и защиты; изучены сезонных вариации мюонов и нейтронов.

На основании изучения экспериментальных данных по вариациям интенсивности частиц, зондирующих грозовую атмосферу, получена количественная оценка разности потенциалов в стратосфере над локально распределённой активной грозовой областью.

Впервые зарегистрированы события непрерывного свечения атмосферы над грозовыми облаками, коррелирующие с аномальными возмущениями вторичных частиц космических лучей, отвечающими условиям электрического пробоя стратосферы в припороговом режиме лавинного размножения убегающих электронов.

Зарегистрировано возмущение геомагнитного поля дрейфовым током электронов, инжектированных в магнитосферу из атмосферы посредством «медленного пробоя стратосферы на убегающих электронах» в припороговом режиме, в процессе грозовой активности и измерены параметры процесса: период обращения электронов вокруг Земли 12 мин, их средняя энергия в магнитосфере 3.6 МэВ.

Зафиксирован факт взаимодействия грозового фронта с высыпанием протонов в атмосферу из радиационного пояса Земли, вследствие сейсмической активности.

С помощью нашей глобальной сети из эн-детекторов в 2016 г. были получены следующие новые данные по изучению вариаций нейтронных фоновых потоков в различных геофизических условиях:

На основе обнаруженного с помощью нашей глобальной сети из эн-детекторов в предыдущем году нового явления - спорадического существенного возрастания нейтронного потока в подземном помещении, связанного с продолжительным падением атмосферного давления, была подготовлена к печати журнальная статья. По данным установки ARGO-YBJ в Тибете обнаружен долговременный тренд роста природного нейтронного фона на уровне около 4% в год за последние 3 года, который связан, по-видимому, с очередным циклом солнечной активности.

По программе изучения Широких атмосферных ливней (ШАЛ): совместно с ЗАО «Люминофор» разработан новый светосостав ЛРБ-2 (сцинтиллятор) на основе натурального бора для регистрации тепловых нейтронов. Полученный светосостав по

свойствам не уступает применявшемуся ранее литиевому светосоставу с обогащением по литию-6 до 90%, а по цене в 5 раз ниже. Изготовлена пробная партия этого светосостава и на его основе изготовлены 2 эн-детектора, площадью по 0.36 кв.м. Китайской стороной принято решение о финансировании создания полноценного прототипа из 3-х кластеров по 16 эн-детекторов будущей установки PRISMA-LHAASO в Тибете на высоте 4400 м над уровнем моря. В октябре 2016 г. первый кластер был собран и включен в режим тестового набора данных в Хэбейском нормальном университете. На установках PRISMA-YBJ и PRISMA-32 проводился непрерывный набор и анализ данных, как по изучению ШАЛ, так и вариаций фоновых потоков тепловых нейтронов на двух существенно различных уровнях наблюдения: 4300 м и уровень Москвы. Расчёты показали, что спектр ШАЛ по числу нейтронов в ПэВной области первичных энергий имеет чисто степенной вид с интегральным показателем спектра близким к -1.95 .

Проведена модернизация установки и всего химико-технологического комплекса ГГНТ и выполнены тестовые извлечения. В целях подготовки условий для выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино в 2016 году часть измерений скорости захвата солнечных нейтрино была выполнена на модернизированной установке с двухзонной галлиевой мишенью. Получены предварительные результаты скорости захвата для каждой зоны, которые согласуются в пределах статистических ошибок с измерениями на ГГНТ.

В рамках выполнения НИР по теме «Эксперимент с искусственным источником нейтрино на основе радионуклида ^{51}Cr активностью 3 МКи» с целью повышения чистоты хромовой мишени в 2016 году была проведена экспериментальная проверка основных этапов процесса, включающие получение и механическое измельчение электролитического хрома и последующее компактирование порошка методом ГИП. Полученные результаты показали, что данные методики в основном обеспечивают необходимые физические и химические характеристики получаемого материала и минимизацию его потерь, однако требуются дополнительные разработки по повышению чистоты хромовых мишеней.

В части работ по разработке методик и изготовлению систем высокоточного измерения активности источника нейтрино выполнена метрологическая поверка средств измерений, входящих в состав калориметрической системы для измерения активности искусственного источника нейтрино. Показано, что в режиме постоянного тепловыделения при мощностях более 100 Вт тепловыделение может быть измерено с точностью лучше 0,2 %, которая относится к числу лучших в мире достигнутых в

калориметрических измерениях активностей высокоактивных источников ионизирующего излучения.

В низкофоновой установке в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории проводится поиск аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в М1-переходе ядер ^{83}Kr на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения. По предварительным результатам обработки данных за 2016г. получено ограничение сверху на массу аксиона на уровне 75 эВ (95 %у.д.).

В эксперименте по поиску 2К-захвата ^{124}Xe с использованием большого медного пропорционального счётчика, заполненного ксеноном, содержащим изотоп ^{124}Xe , набрана статистика за ~5500 часов. Искомого эффекта не обнаружено, что даёт предел на период полураспада на уровне $\sim T_{1/2} \geq 7 \cdot 10^{21}$ лет.

В Южной Корее основна коллаборация AMORE, которая проводит эксперимент по поиску безнейтринного двойного бета распада ^{100}Mo . В задачи сотрудников ИЯИ РАН в этой коллаборации входит измерение содержания радиоактивных примесей в сырье для производства кристаллов и готовых образцах, а также в различных конструкционных материалах.

Для исследования вариаций потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900 собрана установка, состоящая из четырёх детекторов тепловых нейтронов. Набрана статистика за ~4.2 года измерений. Сезонная вариация потока тепловых нейтронов составляет не менее 5% от среднегодового значения.

Одним из основных источников фонового излучения во всех низкофоновых экспериментах является изотоп ^{222}Rn , присутствующий в воздухе лабораторных помещений, и его дочерние продукты распада. Для прямого метода контроля содержания радона в воздухе была создана цилиндрическая воздушная импульсная ионная ионизационная камера (ЦВИК) с рабочим объёмом ~3 л, обеспечивающая при давлении 620 мм рт. ст. энергетическое разрешение 1.7 % при регистрации α -частиц с энергией 5.49 МэВ от распада ^{222}Rn . Изготовлены 3 камеры. Разработана схема и конструкция мобильного Rn-монитора с ЦВИК. Завершены комплектация и изготовление трёх приборов. Проводятся испытания и выпускная наладка первого экземпляра.

В исследовании вариации периода полураспада ядра ^{214}Po обнаружены годовая вариация с амплитудой $A=(9.8\pm0.6)\cdot10^{-4}$ и суточные вариации в солнечном, лунном и звёздном времени с амплитудами солнечно-суточная вариация с амплитудой $A_{\text{с}}=(5.3\pm0.3)\cdot10^{-4}$, лунно-суточная вариация с амплитудой $A_{\text{л}}=(6.9\pm2.0)\cdot10^{-4}$ и звёздно-суточная вариация с амплитудой $A_{\text{з}}=(7.2\pm1.2)\cdot10^{-4}$. Показано, что вариации

микроклиматических параметров не могут быть причиной вариаций периода полураспада.

В течение 2016 г полностью введена в строй вторая фаза эксперимента Герда. В результате использования анализа формы сигнала детекторов и антисовпадений с сцинтилляционным сигналом от окружающего жидкого аргона индекс фона понижен в 10 раз по сравнению с фазой 1 и достигнут величины 10^{-3} /кэВ.кг.год, что является уникальным достижением. К настоящему моменту на основе экспозиции 10,8 кг.год для периода двойного безнейтринного бета распада изотопа Ge-76 получен верхний предел $T_{1/2} > 4 \cdot 10^{25}$ лет, что является наилучшим мировым достижением.

Создана установка по измерению содержания радиоуглерода ^{14}C в образцах жидкого сцинтиллятора. Проведены первые измерения со сцинтиллятором на основе отечественного ЛАБа. Значение фона в диапазоне 200-300 кэВ составляет 1.5–2 события в час, значение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = (3.3 \pm 1.1) \times 10^{-17}$.

Разработан метод измерения собственной радиоактивности сцинтиллятора по коррелированным распадам ^{212}Bi - ^{212}Po от цепочки тория с характерным временем между событиями до 1000 нс и ^{214}Bi - ^{214}Po от цепочки урана во временном окне до 15 мкс. Полученная методика комплексного исследования образцов сцинтиллятора позволяет выбрать растворитель для полномасштабного детектора объёмом 10^4 м³ с пониженным содержанием ^{14}C .

Завершён монтаж гравитационного детектора ОГРАН на пикете ПК-14 - месте постоянной подземной дислокации данной установки. Главным достижением отчётного периода явился монтаж зеркал высокой технологии с рекордной отражательной способностью (резкость 30 тыс.) и малыми потерями. Измерена спектральная плотность шума детектора и проведён тест силовой калибровки, с использованием модельного сигнала, имитирующего гравитационное волновое воздействие. Данные демонстрируют достижение чувствительности близкой к проектной. Введение активной термостабилизации детектора на уровне сотых долей градуса позволит перейти в режим долговременного мониторинга гравитационного фона.

Совместно с ПРАО ФИАН и ЛАЯ ИЯИ составлен проект использования высокочувствительного радиотелескопа БСА ФИАН в качестве пилотной установки для разработки метода детектирования импульсов радиоизлучения метровых длин волн от каскадов, возникающих при взаимодействии космических лучей (протонов, нейтрино) предельно высоких энергий с веществом лунного реголита. Для выполнения подобной работы будет также использована антенная система широкоугольного радиотелескопа метровых волн, создаваемого в ПРАО ФИАН.

Проведена реконструкция и тестирование электронного блока аналогового тракта для 4-х канальной гидроакустической антенны глубоководного автономного измерительного модуля для измерения коэффициента Грюнайзена.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных исследованиях природных явлений.