Федеральное агентство научных организаций РФ

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

УДК 539.1; 539.12; 539.123 № госрегистрации 01201050398 Инв.№



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 2015 год) 0031-2014-0066

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



Г.И.Рубцов 19 января 2016 года

Москва 2016

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 д.т.н.

Л.В.Кравчук

19 января 2016 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 2015 год) 0031-2014-0066

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

Г.И.Рубцов 19 января 2016 года

Москва 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы к.ф.-м.н.

Г.И.Рубцов (введение, заключение) 19.01.2016

Исполнители темы:

д.ф.-м-н. Домогацкий Г.В. (раздел 1) 19.01.2016

д.ф.-м-н. Куденко Ю.Г. (раздел 2) 19.01.2016

д.ф.-м-н. Ряжская О.Г. (раздел 3) 19.01.2016

д.ф.-м-н. Кузьминов В.В. (раздел 4) 19.01.2016

д.ф.-м-н. Ткачёв И.И. (раздел 5) 19.01.2016

к.ф.-м-н. Железных И.М. (раздел 6) 19.01.2016

ΡΕΦΕΡΑΤ

Отчёт содержит: 129 с., 49 рис., 2 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, ИСКУС-СТВЕННЫЙ 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 2015 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Запуск на оз.Байкал кластера глубоководного нейтринного телескопа НТ1000. Монтаж и запуск на оз.Байкал в режиме постоянного набора данных кластера из восьми гирлянд оптических модулей (по 24 OM на каждой), представляющего собой базовый структурный элемент создаваемого глубоководного нейтринного телескопа HT1000 (Baikal-GVD) кубокилометрового масштаба. При работе в автономном режиме эффективный объём кластера составляет 0.04 км3 для событий от нейтрино с энергией порядка 100 ТэВ, что позволяет рассматривать его как одного из трёх крупнейших в мире действующих нейтринных телескопов в области высоких и сверхвысоких энергий и событий астрофизических позволяет начать на нём поиск ОТ нейтрино, зарегистрированных впервые в эксперименте на детекторе IceCube. ИЯИ РАН в коллаборации BAIKAL.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	4
Введение	5
Основные результаты	7
1 Лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий.	7
2 Отдел физики высоких энергий	21
3 Отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики.	
3.1 ЛЭМДН	30
3.2 РХМДН	55
3.3 Лаборатория Лептонов высоких энергий ОЛВЭНА	74
4 Баксанская нейтринная обсерватория	80
5 Отдел экспериментальной физики	95
6 Лаборатория новых методов детектирования нейтрино	112
Заключение	127

Заключение

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 СРнарушения;

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 ΡΕΦΕΡΑΤ

В 2015 году основная задача работ по теме состояла в развертывании на оз. Байкал и запуске в режимах тестирования и набора данных первого варианта кластера гирлянд глубоководных регистрирующих модулей – базового структурного элемента создаваемого нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба HT1000 (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 темной материи.

В период зимней экспедиции 2015 года выполнены работы по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной аппаратуры и подводных линий кабельной связи комплекса БГНТ. Выполнены монтаж и запуск на оз.Байкал в режиме постоянного набора данных кластера из восьми гирлянд оптических модулей (по 24 ОМ на каждой), представляющего собой базовый структурный элемент создаваемого глубоководного нейтринного телескопа HT1000 (Baikal-GVD) кубокилометрового масштаба. При работе в автономном режиме эффективный объем кластера составляет ~0.04 KM³ для событий от нейтрино с энергией порядка 100 ТэВ, что позволяет рассматривать его как одного из трех крупнейших в мире действующих нейтринных телескопов в области высоких и сверхвысоких энергий и позволило начать на нем поиск событий от астрофизических нейтрино, зарегистрированных впервые в эксперименте на детекторе IceCube. В настоящее время близка к завершению подготовка аппаратуры кластера -2015 года в составе 12-ти дополнительных ОМ на каждой из восьми гирлянд действующего кластера и ведутся ее лабораторные испытания, что позволит в полтора раза увеличить чувствительный объем установки.. Подготовительные работы планируется завершить до конца января 2016 года.

В 2015 году выполнен анализ экспериментальных данных нейтринного телескопа HT200 и анализ чувствительности глубоководных нейтринных телескопов в озере Байкал (HT200, "Dubna" и проект "GVD") к нейтринному сигналу от аннигиляции темного вещества в центре Галактики и в темных карликовых галактиках Южной полусферы. Полученные ограничения на сечения процессов аннигиляции или распада относятся к

частицам темного вещества с массой до 10 ТэВ с рождением пары частица-античастица, включая нейтрино-антинейтрино в прямом канале.

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 еще находится лишь ANTARES, но и он планируется к разборке в 2016 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 трех 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 в Греции (по два блока в каждом). Каждый блок представляет из себя автономный глубоководный черенковский детектор с эффективным объемом порядка 0.5 км³, содержащий примерно 2000 фотодетекторов размещенных на 115 гирляндах. 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 3 км³.

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 объемом 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 проектом конфигурации привел к серьезному продвижению в задачах поиска нейтрино от астрофизических объектов, регистрации нейтринного потока сопровождающего гаммавсплески, 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 объеме телескопа размером 0.4 км ³. 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 ~E -2 и содержащего в равной доле нейтрино всех трех 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 (10¹³ – 10¹⁸) эВ, о локальных источниках нейтрино с энергией свыше 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 HT200, на детекторе AMANDA на Южном полюсе и (в последние годы, начиная с 2009-го) на детекторе ANTARES в Средиземном море. Ввод в строй в 2011 году детектора IceCube на Южном полюсе позволил, в ряде задач, поднять чувствительность экспериментальных исследований еще на один-два порядка величины. 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 HT1000 (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 2015 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 Байкальского нейтринного телескопа. Необходимо отметить, что период зимней экспедиции 2015 года был осложнён редкой погодной аномалией - штормовыми ветрами в период становления ледового покрова, что привело к отрыву ледяного поля и образованию восьмисотметровой полыньи значительной протяжённости (десятки километров) вдоль берега на удалении от него порядка двух километров. К моменту начала экспедиции толщина ледового покрова на месте бывшей полыньи составляла около 20 сантиметров при среднем уровне в других точках 35 - 40 сантиметров. Поскольку безопасной дороги к месту расположения детектора в объезд не существовало, выезд тяжёлой техники на лёд был задержан на две недели (фактическое начало работ — 10 марта вместо изначально запланированного 25 февраля). Время окончания работ на месте нахождения детектора тоже было перенесено на более ранний срок по аналогичным причинам. Всё вместе это привело к итоговому сокращению периода основных работ на льду до 21 дня вместо типичных 45-50 суток. Тем не менее, основной запланированный объём работ был проведён и все главные цели экспедиции были достигнуты.

Развернут и введен в эксплуатацию в режиме долговременного набора данных первый кластера нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба HT1000 (Baikal-GVD) на оз. Байкал.

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 НТ1000. 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 секций 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 размещенных светодиодов 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).

В течение 2015 года осуществлялась эксплуатация кластера в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. В общей сложности на установке было проведено 588 серии измерений (в том числе 152 в калибровочном и тестовом режимах работы) и зарегистрировано более чем 1.4 109 событий по триггерам, ориентированным на регистрацию физических событий. Живое время экспозиции составило 197 дней (74% астрономического времени). На основании полученной информации была осуществлена калибровка временных и амплитудных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и выделен банк событий от атмосферных мюонов, проведена проверка относительных временных сдвигов измерительных каналов из анализа событий от атмосферных мюонов. Исследованы вариации уровня собственного свечения водной среды и временное поведение параметров оптических модулей и других функциональных систем установки в течение 2015 года. Выполнен мониторинг интенсивности водных течений на глубине постановки регистрирующей аппаратуры по результатам обработки данных акустической системы позиционирования установки и акустических детекторов инструментальной гирлянды.

Одной из приоритетных задач, решенных за отчетный 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, синхронизованный с запуском светодиода. Этот импульс подается на выход усилителя сигналов ФЭУ. Разница времен между сигналом с ФЭУ, генерированным светодиодом, и тестовым импульсом дает задержку фотоэлектронного 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, способами, полученными двумя имеет среднеквадратичное отклонение менее 2 нс.

В течение 2015 года были продолжены работы разработке ПО И усовершенствованию программного обеспечения моделирования отклика и анализа данных кластера и нейтринного телескопа НТ1000 в задачах исследования природных потоков нейтрино, поиска нейтринного сигнала от аннигиляции темной материи в астрофизических объектах, поиска гипотетических частиц. Продолжена разработка и тестирование комплекса вычислительных и служебных программ BARS (Baikal analysis and reconstruction software), включающего в себя модули чтения и предварительного анализа и отбора экспериментальных данных, обработки калибровочных данных, модули выделения и восстановления событий от разных источников, модули МК- моделирования отклика установки. За отчетный период в рамках этого пакета для повышения эффективности процедуры восстановления энергии и траектории мюонов высоких энергий было сделано следующее :

В пакет был добавлен функционал, позволяющий обрабатывать и использовать данные с акустических модулей EvoLogics совместно с данными телескопа для более точного определения местоположения оптических модулей. До этого использовалась стационарная геометрия телескопа, рассматривающая телескоп как совокупность строго вертикальных гирлянд ОМ. Отличие в положении ОМ в первом и втором случае может достигать нескольких метров для самых высоко расположенных на гирлянде оптических модулей. Более точное знание положения ОМ приводит к меньшим систематическим ошибкам и более высокой эффективности процедур восстановления энергии и траектории мюонов.

Для повышения эффективности процедуры восстановления траектории мюонов необходимо как можно сильнее подавить шум как от свечения озера, так и от собственного темнового тока ФЭУ, и при этом оставить как можно больше полезного сигнала. Для этого был разработан новый метод подавления шумов, основанный на принципе причинности, который по данным Монте-Карло расчета на 39 % больше отбрасывает шума, чем до этого использовавшийся метод. При этом, процент теряемого сигнала остался на прежнем уровне.

Кроме того, был адаптирован к данным НТ1000 метод, разработанный для Байкальского телескопа НТ-200 предыдущего поколения. В основе этого метода лежит идея ограничения возможных зенитных углов траектории мюона, исходя из разности времен между сработавшими ОМ. Рассматривая все пары сработавших ОМ можно найти ОМ, диапазон разрешенных зенитных углов которых не пересекается с большинством других пар, и выбросить их из рассмотрения как шумовые. Совместное использование двух методов, основанных на принципиально разных идеях, позволяет довести

зашумленность событий до такого уровеня, когда можно с достаточно высокой эффективностью применять процедуры восстановления.

На данный момент для восстановления траектории мюонов в пакете используется метод, в котором в качестве ожидаемого времени прихода черенковского света, падающего на ОМ, рассматривается только свет, пришедший под черенковским углом относительно траектории мюона. Для низких энергий, много меньших 1 ТэВ, это практически всегда выполняется. Тогда как для высоких энергий, из-за появления все большего числа ливней, так называемого, сопровождения мюона, черенковский свет может излучаться не строго под черенковским углом относительно траектории мюона. Поэтому, для восстановления траектории мюонов с энергией в области 1 ТэВ и выше разработан новый метод, в основе которого лежит вероятностный характер углового распределения испущенных черенковских фотонов.

В течение 2015 года проводились работы по комплектации, сборке и испытаниям в лабораторных условиях регистрирующей аппаратуры для 4 полномасштабных гирлянд НТ1000 (8 секций оптических модулей). В состав аппаратуры для 8 секций ОМ входят 96 оптических модулей, 8 глубоководных модулей 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. Новые секции будут смонтированы на 8 гирляндах кластера НТ1000 в 2016 г., что позволит в полтора раза увеличить детектирующий объем установки.

Получены ограничения на сечения процессов аннигиляции и на время распада частиц темного вещества с массой до 10 ТэВ в центре Галактики и в 22-х темных сфероидальных галактиках Южной небесной полусферы как в проекте гигатонного объема детектора ("GVD"), так и для двухмегатонного ("Dubna") и стокилотонного ("NT200") действующих телескопов. Для Байкальского глубоководного телескопа NT200 получены ограничения на сечения их аннигиляции в пары лептон-антилептон, включая нейтрино- антинейтино, b-кварков и W-бозонов за пять лет наблюдений. Распространение

нейтрино высоких энергий (выше 10 ГэВ) от астрофизическоих 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. Показано, что статистическая значимость небольшого избытка измеренных нейтринных событий в направлении на центр Г алактики по сравнению с ожидаемым фоном от атмосферных нейтрино соответствует 2.5 сигма без учета систематики и на уровне 1.2 сигма с включением экспериментальных и теоретических неопределенностей. Показано, что для профиля плотности темной материи в модели с центральным пиком типа касп чувствительность телескопа на порядок лучше, чем для моделей с универсальным градиентом плотности (Navarro-Frenk-White) либо с плотным ядром. Для оценки чувствительности 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 с моделью NFW профиля плотности темного вещества, соответствующей стандартной космологической модели, для частиц темного вещества в диапазоне масс 30 ГэВ - 10 ТэВ, показали, что наиболее строгие ограничения в прямом нейтринном канале аннигиляции достигают значений 10-22 см3 сек-1 для наибольших масс.

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.

В исследовании сигнала от 22-х темных карликовых галактик в Южной полусфере по данным телескопа NT200 за пять лет наблюдений выделены 5 из них с наибольшими значениями астрофизического фактора и по ним получены верхние пределы на 90\% д.у. на сечения аннигиляции в комбинированном анализе максимальной вероятности сигнала. Такой подход позволил усилить верхние пределы на сечения аннигиляции относительно результатов по индивидуальным галактикам, хотя эти значения не лучше пределов, полученных для HT200 в направлении центра Галактики.

1.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи работ по теме, предусматривавшиеся планом НИР на 2015год, с чистой совестью можно считать выполненными полностью. Работу над проектом вела группа российских институтов – Институт ядерных исследований Российской академии наук

(головная организация), НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, Нижегородский государственный технический университет, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, НИИ ядерной физики Московского государственного университета, с участием специалистов международного центра ОИЯИ (г. Дубна) и EvoLogics (Германия).

1.1 ПУБЛИКАЦИИ

Статьи:

1. A.D. Avrorin et al., "Time and amplitude calibration of the Baikal-GVD neutrino telescope", Proc. of the 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015, Hague, Netherlands), http://pos.sissa.it/archive/conferences/236/1162/ICRC2015_1162.pdf

2. A.D. Avrorin et al., "The first construction phase of the Baikal-GVD neutrino telescope", Proc. of the 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015, Hague, Netherlands), http://pos.sissa.it/archive/conferences/236/1165/ICRC2015_1165.pdf

3. A.D. Avrorin et al., "The optical module of Baikal-GVD neutrino telescope", Proc. of the 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015, Hague, Netherlands), http://pos.sissa.it/archive/conferences/236/1163/ICRC2015_1163.pdf

4. A.D. Avrorin et al., "Search for neutrino emission from relic dark matter in the Sun with the Baikal NT200 detector", Astroparticle Physics v. 62 (2015), pp.12-20;

5. A.D. Avrorin et al., "Sensitivity of Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of Galactic dark matter halo", JETP Letters, v.101 (2015), issue 5, 289-294;

6. A.D. Avrorin et al, "Status and recent results of the BAIKAL-GVD project", Phys.Part.Nucl. 46 (2015) 2, 211-221;

7. A.D. Avrorin et al, "Baikal-GVD: first cluster Dubna", Proc. of European Physical Society Conference on High Energy Physics (PoS EPS-HEP 2015, Vienna, Austria), arXiv:1512.01198, http://pos.sissa.it/archive/conferences/234/418/EPS-HEP2015_418.pdf

8. A.D. Avrorin et al, "A search for neutrino signal from dark matter annihilation in the center of the Milky Way with Baikal NT200", arXiv:1512.01198.

9. A.D. Avrorin et al, "Status of the Baikal-GVD Project", Proc. of 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Particle Physics at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo : Moscow, Russia, August 22-28, 2013, (ed.) A.Studenikin, 2015, 98-101.

10. А.И. Панфилов и др., "Многопараметрический мониторинг гидрофизических процессов в рамках Байкальского нейтринного проекта", Труды XIV Международная научно-техническая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ», (МСОИ-2015) г. Москва, 19-21 мая 2015г., http://www.msoi.ocean.ru/sbornik-dokladov.html

Доклады:

1. И. А. Белолаптиков, "Status of GVD", MANTS meeting (ANTARES, Baikal, KM3NeT, IceCube), Amsterdam, Netherlands, 17 – 19 октября 2015, MANTS-2015: https://indico.cern.ch/event/395631/timetable/#20151017;

2. А. Д. Аврорин, "Baikal-GVD: status and plan", SAO-BNO, The International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Нижний Архыз-Терскол, Россия, 7 – 14 октября 2015. http://www.sao.ru/hq/grb/conf_2015/index.html

3. С. В. Демидов, "Baikal searches for neutrino signal from the Galactic Center and Dwarf Galaxies", SAO-BNO, The International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Нижний Архыз-Терскол, Россия, 7 – 14 октября 2015. http://www.sao.ru/hq/grb/conf_2015/index.html

4. Ж.-А. М. Джилкибаев, "Baikal-GVD: results, status and plans", VLVnT, Very Large Volume Neutrino Telescope, Rome, Italy, 14 – 16 сентября 2015. https://indico.cern.ch/event/378423/

5. В. М. Айнутдинов, "LED based calibration systems of the Baikal-GVD neutrino telescope", VLVnT, Very Large Volume Neutrino Telescope, Rome, Italy, 14 – 16 сентября 2015. https://indico.cern.ch/event/378423/

6. А. А. Шейфлер, "The optical module of Baikal-GVD", VLVnT, Very Large Volume Neutrino Telescope, Rome, Italy, 14 – 16 сентября 2015. https://indico.cern.ch/event/378423/

 7. О. В. Суворова, "Status of the Baikal-GVD project: firt cluster Dubna", XVII

 Международная Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, Москва,

 Россия,
 20
 –
 26
 августа
 2015.

 http://www.icas.ru/english/LomCon/17lomcon/17lomcon_programme.htm

 Ж.-А. М. Джилкибаев, "The first construction phase of the Baikal-GVD neutrino telescope", ICRC-2015, The 34th International Cosmic Ray Conference, Hague, Netherlands, 30 июля – 6 августа 2015. http://icrc2015.nl/

9. Б. А. Шойбонов, "Time and amplitude calibration of the Baikal-GVD neutrino telescope", ICRC-2015, The 34th International Cosmic Ray Conference, Hague, Netherlands, 30 июля – 6 августа 2015. http://icrc2015.nl/

10. А. А. Шейфлер, "The optical module of Baikal-GVD neutrino telescope", The 34th International Cosmic Ray Conference, Hague, Netherlands, 30 июля – 6 августа 2015. http://icrc2015.nl/

11. О. В. Суворова, "Baikal-GVD: firt cluster Dubna", European Physical Society, High Energy and Particle Physics conference, Vienna, Austria, 22 – 29 июля 2015. https://indico.cern.ch/event/356420/search

12. В. М. Айнутдинов, "Байкальский нейтринный эксперимент", Восьмые Черенковские чтения, Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике цастиц, Москва, Россия, 14 апреля 2015. http://x4u.lebedev.ru/che2015/program_ru-RU.html

13. А. А. Кулешов, "Data acquisition system for the Baikal-GVD neutrino telescope", The International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics", Валдай, Россия, 14 – 16 февраля 2015. http://www.inr.ac.ru/~school/program.php

14. С. В. Демидов, "Neutrino signal at Baikal from dark matter in the Galactic center", The International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics", Валдай, Россия, 7 – 14 февраля 2015. http://www.inr.ac.ru/~school/program.php

15. А.И. Панфилов, "Многопараметрический мониторинг гидрофизических процессов в рамках Байкальского нейтринного проекта", XIV Международная научнотехническая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ», (МСОИ-2015) г. Москва, 19-21 мая 2015 г., http://www.msoi.ocean.ru/sbornik-dokladov.html 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 PEΦEPAT

Отчёт по НИР за 2015 год по подтеме «Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной и космологические следствия их рождения» и по подтеме «Фотоядерные взаимодействия лептонов при сверхвысоких энергиях» содержит краткое описание содержания научных работ, опубликованных в 2015 году.

1.2 ВВЕДЕНИЕ

Научно-исследовательская работа в 2015 году велась, в соответствии с планом по НИР, по двум подтемам. Работы по первой подтеме имеют целью теоретическое исследование тех сценариев космологического расширения ранней Вселенной, которые предсказывают рождение достаточно больших концентраций первичных чёрных дыр (ПЧД). На характеристики таких сценариев можно получить существенные ограничения, на основе данных по поискам ПЧД, что и является главной целью исследования. Вторая подтема связана с физикой космических лучей: мюоны очень высоких энергий, рождающиеся во взаимодействиях космических лучей с ядрами атомов атмосферы и Земли, тратят часть энергии на так называемые фотоядерные взаимодействия, которые не описываются в рамках стандартных подходов квантовой хромодинамики (КХД). В исследованиях по этой подтеме используется двухкомпонентная схема (модель доминантности векторных мезонов плюс пертурбативная КХД), разработанная авторами (Э.В.Бугаевым и Б.В.Мангазеевым) ранее.

1.2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

По первой подтеме, в работах 2015 года было показано, что эффективное рождение ПЧД возможно в некоторых космологических сценариях «диссипативной инфляции», в которых инфлатон взаимодействует, в процессе расширения, с дополнительным скалярным полем. Вследствие этого взаимодействия может сформироваться характерный спектр мощности первичных флуктуаций кривизны и плотности, амплитуда которого относительно велика в области малых масштабов (т.е., в области, где отсутствуют ограничения, следующие из астрофизических наблюдательных данных). Такой первичный спектр флуктуаций приводит, как хорошо известно, к рождению ПЧД после окончания инфляции. Авторами (Э.В.Бугаевым и П.А.Климаем) получены ограничения на параметры

соответствующей модели инфляции. По второй подтеме, в работе 2015 года, авторами (Э.В.Бугаевым и Б.В.Мангазеевым) были произведены вычисления так называемого эффекта затенения, состоящего в том, что глубоко неупругое (фотоядерное) взаимодействие лептона (точнее, виртуального фотона) с ядром не складывается аддитивно из взаимодействий этого фотона с отдельными нуклонами ядра. Эта работа важна для приложений, поскольку на практике лептон (мюон) взаимодействует именно с ядрами атомов атмосферы или Земли, а не с нуклонами. Для расчётов затенения необходимо использовать конкретную модель фотоядерного взаимодействия на нуклоне, и в работе авторов естественным образом используется ранее разработанная ими двухкомпонентная модель такого взаимодействия. Произведено также сравнение результатов расчёта с имеющимися данными по затенению.

1.2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По первой подтеме, в работах 2015 года был исследован процесс рождения ПЧД в конкретной двухполевой инфляционной модели и получены ограничения на параметры этой модели. По второй подтеме, в 2015 году проведена и опубликована работа, в которой показано, что двухкомпонентная модель фотоядерного взаимодействия, разработанная авторами ранее, хорошо описывает данные по ядерному затенению, что существенно для приложений в физике мюонов космических лучей сверхвысокой энергии.

1.2 СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

- Nuclear shadowing in deep inelastic scattering on nuclei at low and medium Q squared.
 E.V.Bugaev and B.V.Mangazeev, arXiv:1512.0465 [hep-ph].
- 2. Primordial black hole constraints on some models of dissipative inflation.
 - P.A.Klimai and E.V.Bugaev, Proceedings of 18th conference in the Quarks series.
- 3. Trapping effects in inflation: blue spectrum at small scales.

E.V.Bugaev and P.A.Klimai, arXiv: 1511.06175 [astro-ph.CO].

2 Отдел физики высоких энергий

Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных СР и Т симметрий

в распадах каонов

СОСТАВ УЧАСТНИКОВ

- 1. Куденко Юрий Григорьевич, профессор, заведующий отделом ИЯИ РАН
- 2. Ершов Николай Викторович, старший научный сотрудник ИЯИ РАН
- 3. Измайлов Александр Олегович, научный сотрудник ИЯИ РАН
- 4. Минеев Олег Викторович, старший научный сотрудник ИЯИ РАН
- 5. Хабибуллин Марат Марсович, старший научный сотрудник ИЯИ РАН
- 6. Хотянцев Алексей Николаевич, научный сотрудник ИЯИ РАН
- 7. Шайхиев Артур Тагирович, младший научный сотрудник ИЯИ РАН
- 8. Мефодьев Александр Владимирович, аспирант МФТИ
- 9. Овсянникова Татьяна Алексеевна, аспирантка МИФИ
- 10. Антонова Мария Максимовна, студентка МИФИ
- 11. Клейменова Алина Александровна, студентка МИФИ
- 12. Медведева Мария Валентиновна, студентка МФТИ
- 13. Суворов Сергей Борисович, студент МФТИ
- 14. Федотов Сергей Андреевич, студент МИФИ

2 ΡΕΦΕΡΑΤ

Анализ данных, накопленных в эксперименте E949, позволил получить в распадах положительных каонов новые ограничения на смешивание тяжелых и активных нейтрино. Установлен верхний предел (90% С.L.) на элемент матрицы смешивания $|U_{\mu H}|^2$ в диапазоне масс тяжелых нейтрино 175 — 300 МэВ. Этот результат на два порядка превосходит предыдущее ограничение, полученное в распадах каонов, и примерно на порядок улучшает текущее самое сильное ограничение из поиска распадов тяжелых нейтрино в эксперименте CERN PS191 в диапазоне масс 175 — 270 МэВ.

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 каона на мюон и три нейтрино в эксперименте E949.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и 2 нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, были проведены испытания счетчиков, усилителей и фотосенсоров для годоскопа частиц, монтаж годоскопа, а также проведены первые сеансы.

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 2010-2015 гг. В 2014-2015 гг. часть сеансов проводилась в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования СР-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 создан прототип ближнего нейтринного детектора, работающего в сильном магнитном поле и состоящего из 9000 сцинтилляционных сегментов на основе экструдированных пластиков, спектросмещающих волокон и лавинных фотодиодов. Все счетчики отправлены в ЦЕРН, где проводится подготовка к сеансам на пучке.

Кроме того, разрабатывается детектор мюонного пробега для эксперимента WAGASCI, который предназначен для измерения сечений взаимодействия нейтрино на ядрах воды и пластика, что 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 СР и Т симметрий в распадах каонов проводился анализ данных эксперимента Е949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску тяжелых стерильных нейтрино с массами 175-300 МэВ. В результате этого анализа получено новое ограничение на параметры смешивания этой гипотетической частицы с активными нейтрино. 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 каона на мюон и три нейтрино, запрещенного в первом порядке в Стандартной Модели.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и 2 нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, были проведены испытания счетчиков, усилителей и фотосенсоров для годоскопа частиц, монтаж годоскопа, а также проведены первые сеансы.

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 2010-2015 гг. В 2014-2015 гг. часть сеансов проводилась в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования СР-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 создан прототип ближнего нейтринного детектора, работающего в сильном магнитном поле и состоящего из 9000 сцинтилляционных сегментов на основе экструдированных пластиков, спектросмещающих волокон и лавинных фотодиодов. Все счетчики отправлены в ЦЕРН, где проводится подготовка к сеансам на пучке.

Кроме того, разрабатывается детектор мюонного пробега для эксперимента WAGASCI, который предназначен для измерения сечений взаимодействия нейтрино на ядрах воды и пластика, что позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC).

2 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1 Исследование нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах каонов

Анализ данных, накопленных в эксперименте E949, позволил получить в распадах положительных каонов новые ограничения на смешивание тяжелых и активных нейтрино. Установлен верхний предел (90% С.L.) на элемент матрицы смешивания $|U_{\mu H}|^2$ в диапазоне масс тяжелых нейтрино 175 — 300 МэВ. Этот результат на два порядка превосходит предыдущее ограничение, полученное в распадах каонов, и примерно на порядок улучшает текущее самое сильное ограничение из поиска распадов тяжелых нейтрино в эксперименте CERN PS191 в диапазоне масс 175 — 270 МэВ. По итогам этой работы участник научной группы А.Т. Шайхиев в июне 2015 года защитил кандидатскую диссертацию «Поиск тяжелых нейтрино в распадах положительных 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 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. Важная информация может быть получена о нейтрино-нейтринных взаимодействиях и шестифермионных взаимодействиях. В 2015 году был выполнен анализ с целью поиска

событий из этого распада на основе всех данных E949 ($1.7x10^{12}$ 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 тяжелых нейтрино, были распады К+ -> $\mu\nu\gamma$, когда фотон не регистрировался фотонными вето детекторами. В результате анализа получены новые предварительные ограничения на вероятность распада K->\mu\3\nu) на уровне 90% CL:

 $\Gamma(K \rightarrow \mu 3\nu)/\Gamma(K \rightarrow all)$ < 2.5x10⁻⁶ (в рамках Стандартной Модели); $\Gamma(K \rightarrow \mu 3\nu)/\Gamma(K \rightarrow all)$ < 1.8x10⁻⁶ (v-v взаимодействия); $\Gamma(K \rightarrow \mu 3\nu)/\Gamma(K \rightarrow all)$ < 2.0x10⁻⁶ (шести-фермионное взаимодействие). Полученные ограничения являются наилучшими и примерно в 3 раза улучшают существующие экспериментальные пределы.

Эксперимент NA62 (ЦЕРН) нацелен на поиск редкого распада положительно заряженного каона ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \ \overline{\nu}$), чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели. В рамках подготовки этого эксперимента были проведены испытания счетчиков, усилителей и фотосенсоров для годоскопа частиц (~500 каналов), монтаж годоскопа, а также проведены первые сеансы.

2.2 Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях КЕК 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 – 2015 гг. В этих *антинейтринных* сеансах набрана статистика 4.04 х 10²⁰ РОТ (протонов на мишени), сравнимая с данными в *нейтринной* моде, а всего в T2K за 2010 - 2015 гг. набрано ~11.04 х 10²⁰ РОТ.

Анализ данных на "исчезновение" в антинейтринной моде показал, что в дальнем детекторе Супер-Камиокандэ зарегистрировано 34 события (мюонные антинейтрино и нейтрино) при ожидаемых 104 событиях в отсутствие (анти)нейтринных осцилляций. Предварительный анализ также продемонстрировал, что значения угла смешивания (sin²θ₂₃= 0.46 ^{+0.14} _{-0.06}) и разности квадратов масс ($|\Delta m^2_{23}|$ = (2.5 ^{+0.3} _{- 0.2}) х 10⁻³ eV²), полученные для антинейтринной моды, близки к соответствующим значениям для нейтринной моды.

Проведен анализ и на «появление» электронных антинейтрино в *антинейтринной* моде. Зарегистрировано 3 кандидата в события на «появление» электронных (анти)нейтрино, что пока не позволяет делать определенные выводы об осцилляциях мюонных антинейтрино в электронные в виду малой статистики.

Получены результаты измерения инклюзивного сечения взаимодействия мюонных нейтрино на ядрах железа через заряженные токи для трех значений энергии нейтрино в диапазоне 1-3 ГэВ. Особенность этого анализа заключается в том, что использовались данные, полученные в

ближнем детекторе INGRID, отдельные модули которого расположены под разными углами по отношению к оси исходного пучка нейтрино. Результаты показали хорошее согласие полученных сечений с предсказаниями нейтринных моделей (генераторов NEUT и GENIE).

Впервые измерены сечения взаимодействия электронных нейтрино в области энергий более 1.5 ГэВ с водой. Эти данные важны для измерения осцилляций мюонных нейтрино в электронные в детекторе Супер-Камиокандэ и позволяют уменьшить систематическую ошибку измерения осцилляционных параметров.

Значительный прогресс был достигнут в исследовании систематических погрешностей в осцилляционном анализе, которые определяют чувствительность эксперимента к СР нечетной фазе. В результате исследований на протяжении 4-х лет удалось снизить систематическую ошибку с 18% до ~6%.

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 Х-Ү плоскостей. Все счетчики переправлены в ЦЕРН. Объем детектора 1x1x1 м³. Проводится тестирование электроники и ведется подготовка к сборке всего детектора для проведения тестов на пучке в ЦЕРНе.

Проводилась разработка сегментированнинго 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 х 21 см х 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 оп-ахіѕ нейтринном пучке и использовать в измерения совместно с детектором INGRID.

2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных, накопленных в эксперименте E949, позволил получить в распадах положительных каонов новые ограничения на смешивание тяжелых и активных нейтрино. Установлен верхний предел (90% С.L.) на элемент матрицы смешивания $|U_{\mu H}|^2$ в диапазоне масс тяжелых нейтрино 175 — 300 МэВ. Этот результат на два порядка превосходит предыдущее ограничение, полученное в распадах каонов, и примерно на порядок улучшает текущее самое сильное ограничение из поиска распадов тяжелых нейтрино в эксперименте CERN PS191 в диапазоне масс 175 — 270 МэВ.

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 каона на мюон и три нейтрино в эксперименте E949.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и 2 нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, были проведены испытания счетчиков, усилителей и фотосенсоров для годоскопа частиц, монтаж годоскопа, а также проведены первые сеансы.

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 2010-2015 гг. В 2014-2015 гг. часть сеансов проводилась в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования СР-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 создан прототип ближнего нейтринного детектора, работающего в сильном магнитном поле и состоящего из 9000 сцинтилляционных сегментов на основе экструдированных пластиков, спектросмещающих волокон и лавинных фотодиодов. Все счетчики отправлены в ЦЕРН, где проводится подготовка к сеансам на пучке.

Кроме того, разрабатывается детектор мюонного пробега для эксперимента WAGASCI, который предназначен для измерения сечений взаимодействия нейтрино на ядрах воды и пластика, что позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC).

2 ПУБЛИКАЦИИ

1 A.V. Artamonov,..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,..., A. Shaikhiev,..., et al. (E949 Collaboration) / Search for heavy neutrinos in K^+\to\mu^+\nu_H decays // Phys.Rev. D91 (2015) 052001, WOS:000350998700004.

2 K. Abe, ..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Neutrino oscillation physics potential of the T2K experiment // PTEP 2015 (2015) 043C01, WOS:000355312800005.

3 K. Abe, ..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Search for short baseline nu_e disappearance with the T2K near detector // Phys.Rev. D91 (2015) 051102, WOS:000351040800001.

4 K. Abe,..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with $6.6 \times 10^{4}{20}$ protons on target // Phys.Rev. D91 (2015) 7, 072010, WOS:000353636500001.

5 K. Abe,..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Physics potential of a longbaseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande // PTEP 2015 (2015) 053C02, WOS:000356183900009.

6 K. Abe,..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Measurement of the $\ln_{\rm wu}\$ charged current quasielastic cross section on carbon with the T2K on-axis neutrino beam // Phys.Rev. D91 (2015) 11, 112002, WOS:000355623000001.

7 K. Abe,..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Measurement of the electron neutrino charged-current interaction rate on water with the T2K ND280 π^0 detector // Phys.Rev. D91 (2015) 112010, WOS:000356483000001.

8 K. Abe,..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Measurement of the nu CCQE cross section on carbon with the ND280 detector at T2K // Phys.Rev. D92 (2015) 112003, WOS:000366169900001.

9 F. Hahn, Yu. Kudenko et al. / Prospects for K+ -> pi(+)nu(nu)over-bar observation at CERN in NA62 // Journal of Physics Conference Series, V.631 (2015) 012041.

10 K. Massri, ... Yu. Kudenko et al. / Precision tests of the Standard Model with Kaon decays at CERN // Journal of Physics Conference Series, V.631 (2015) 012040.

11 Y. Kudenko, V. Paolone / Neutrino physics: status and open questions // Nucl.Part.Phys.Proc. 260 (2015) 167-171.

12 A.T. Shaikhiev and Yu.G. Kudenko / NEW RESULTS ON STERILE NEUTRINOS SEARCHES // Physics of Atomic Nuclei № 13, 2015.

13 S. Fedotov, A. Kleymenova, O. Mineev et al. / 3X3 MM² SENSL SiPM CHARACTERIZA-TION FOR THE NEW CHOD DETECTOR OF THE NA62 EXPERIMENT, CERN // Poster at the Conference on New Photo-Detectors, PhotoDet 2015 International Conference on New Photo-detectors (PD15), July 6-9, 2015, Moscow, Troitsk, Russia.

14 A. Kleymenova / Experiment NA62 for measurement of K+->\pi\nu\nu decay // Talk at 58 MPTI Conference, November 2015 Moscow, Russia.

15 F. Hosomi,..., M. Khabibullin,...Yu. Kudenko et al. / Performance test of new MPPC for a new neutrino detector WAGASCI // Talk at PhotoDet 2015 International Conference on New Photo-detectors, July 6-9, 2015, Moscow, Troitsk, Russia.

16 A. Mefodiev,..., M. Khabibullin,... Yu. Kudenko et al. / The design, construction and testing of TASD (Totally Active Scintillator Detector) // Poster at PhotoDet 2015 International Conference on New Photo-detectors, July 6-9, 2015, Moscow, Troitsk, Russia.

17 Y. Kudenko, T. Kobayashi / Future LBL neutrino experiments in Japan // Invited talk at The 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, 20-26 August 2015.

18 T. Ovsyannikova / The new experiment WAGASCI for water to hydrocarbon neutrino cross section measurement using the J-PARC beam // Talk at the International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, 5-10 October 2015.

19 N. Chimuma, A. Izmaylov, M. Khabibullin et al. / A New Experiment at J-PARC to Measure the Neutrino Cross Section Ratio between Water and Plastic // Poster at the International Conference on Flavor Physics & CP Violation, FPCP 2015, Nagoya, Japan, 25-29 May 2015.

20 A. Blondel, Y. Kudenko / New results in neutrino oscillations // Invited talk at the International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, 5-10 October 2015.

21 Y. Kudenko / Overview of neutrino oscillations // Invited talk at 4th Gribov Memorial Workshop, Chernoglovka, Russia, 27 June 2015.

22 A. Izmaylov / T2K status and prospects // Talk at VII CPAN, Segovia, Spain, 12-15 December 2015.

23 Y. Kudenko, M. Yokoyama / Study of neutrino oscillations in the T2K experiment and development of new neutrino detectors // Invited talk at the Anniversary Scientific Session "Progress and Trends in Science and Technology" to commemorate 10 years of partnership between the RFBR and JSPS, 21-22 October 2015, Moscow, Russia.

Сотрудники лаборатории занимались организацией и проведением Международной Конференции "Новые фотонные детекторы" (International Conference on New Photo-Detectors, PD15), которая проводилась с 6 по 9 июля 2015 г. в Троицке, Москва. Число участников - 139 человек (в том числе боле 50 зарубежных ученых из Германии, Италии, Англии, США, Японии, Швейцарии, Испании, Канады и других стран). Сайт Конференции PD15: http://www.pd15.inr.ru/.

Научная программа конференции состояла из пленарных заседаний и постерных докладов. Всего на конференции было представлено 83 доклада (устных и постерных), в которых был отражен весь спектр исследований в области фотонных детекторов по следующим основным направлениям:

1. Последние достижения в разработке микропиксельных лавинных фотодиодов.

2. Вакуумные фотоприемники (фотоумножители, гибридные ФЭУ, микроканальные пластины).

3. Современная электроника для фотодетекторов и больших систем.

4. Применение фотодетекторов в физике элементарных частиц, физике высоких энергий, нейтринной и ядерной физике.

5. Ядерные технологии, ядерная медицина, медицинские приборы и промышленной применение фотоприемников.

Готовятся к изданию Труды Конференции, которые будут опубликованы в издательстве Proceedings of Science (PoS), Триест, Италия (http://pos.sissa.it).

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

3 СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, д. ф.-м. н., член-корр.РАН Ряжская О.Г. Исполнители темы: Агафонова Н.Ю. H.C. стажер-исслкдовать Ашихмин В.В. с.н.с., к. ф.-м. н. Дадыкин В.Л. (ЛНА) Добрынина Е.А. M.H.C. Еникеев Р.И. H.C. Мальгин А.С. с.н.с., к. ф.-м. н. Мануковский К.В. M.H.C. Очкас О.В. инженер Рясный В.Г. с.н.с., к. ф.-м. н. Шакирьянова И.Р. M.H.C. Юлин А.В. нс Якушев В.Ф. н.с.

3 ΡΕΦΕΡΑΤ

Отчет 28 с., 0 ч., 10 рисунок 3., 5 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 в течение 38 лет (с 1977 г по 2015 г) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.5 года на 90% уровне достоверности.

Целью эксперимента OPERA является поиск осцилляций v_{μ} в v_{τ} в пучке v_{μ} от ускорителя ЦЕРН'а посредством прямой регистрации τ -лептонов в ядерной эмульсии. В 2015 в детекторе найдено пятое события-кандидата на взаимодействие τ -лептона.

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_а «Поиск нейтринного излучения от коллапсов звезд и изучение космических лучей, продуктов их взаимодействия на подземных детекторах ИЯИ РАН и Лаборатории LNGS» 2015-2017, по выполнению проекта по международному соглашению о Научноисследовательской работе российских научных групп в Национальной лаборатории Гран Сассо (Италия). Направление - «Физика космических лучей и редких распадов».

В 2015 году опубликовано 15 статей в иностранных и Российских журналах, сделано 11 докладов на международных, Российских конференциях и семинарах. В марте 2015 года состоялась защита диссертации Агафоновой Н.Ю. на соискание степени кандидата физико-математических наук «Изучение мюонов космических лучей и нейтронов, генерированных ими под землей в детекторе LVD» по специальности физика атомного ядра и элементарных частиц.

3 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 темной 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 звездного вещества. Получение этой информации и ее правильная интерпретация – задача экспериментаторов, занимающихся нейтринной астрофизикой.

3.1 ПОИСК НЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ КОЛЛАПСОВ ЗВЁЗД В ГАЛАКТИКЕ НА ДЕТЕКТОРАХ АСД И LVD

Теория предсказывает, что эволюция массивных звезд 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 1000 тонн даже, водородосодержащего вещества в качестве мишени для реакции v_ep→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 звезд 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 KII 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 керна звезды. Эта модель была сконструирована В.С. Имшенником, чтобы получить механизм сброса оболочки на заключительном этапе эволюции массивных звезд главной последовательности и названа автором моделью вращающегося коллапсара (MBK). 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 «Артемовский 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:

$$v_e + p \rightarrow e + n, \ E_{\rho^+} = E_{\tilde{v}_e} - 1.3 \text{ M}\Im B$$
 (1)

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

$$n + p \rightarrow d + \gamma, E_{\gamma} = 2.2 \text{ M}_{\Im}B.$$
 (2)

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

$$^{35}\text{Cl} + n \rightarrow ^{36}\text{Cl}^* + \Sigma\gamma, \ E_{\gamma} = 5 \div 7 \text{ M}\Im\text{B}.$$
 (3)

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

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

$$\nu_{i} + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}C^{*} + \nu_{i}, \qquad (4)$$

$${}^{12}C^* \rightarrow {}^{12}C + \gamma (15.11 \text{ M} \circ \text{B}) (96\%),$$
 (5)

$${}^{12}C^* \to {}^{12}C + \gamma (10.7 \text{ M} \Im \text{B}) + \gamma (4.4 \text{ M} \Im \text{B}), (4\%),$$
 (6)

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

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

Для углерода это реакции:

$$v_e + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}N + e^-, \Delta M = 16.83 \text{ M} \Rightarrow B$$

$$\label{eq:norm} \begin{split} ^{12}N & \to ^{12}C + e^+ + \nu_e \;, \; \tau = 15.9 \; \text{mc}, \; E_{max} \approx 16.4 \; \text{M} \ni \text{B} \\ \nu_e + ^{12}C & \to ^{12}\text{B} + e^+ \;, \; \Delta M = 13.88 \; \text{M} \ni \text{B} \\ ^{12}\text{B} & \to ^{12}C + e^- + \nu_e \;, \; \tau = 29.3 \; \text{mc} \end{split}$$

Электронные нейтрино 30-40 МэВ (МВК) вступают в реакцию с хлоридом натрия NaCl: $v_e + Na^{23} \rightarrow e^- + Mg^{23}$, порог примерно 4 МэВ $v_e + Cl^{35,37} \rightarrow e^- + Ar$, порог ~ 800 кэВ для $Cl^{37}(24.5\%)$ и ~ 5 МэВ для $Cl^{35}(75.5\%)$.

 $V_e + CI^{-3,c+} \rightarrow e^{-1} + Ar$, порог ~ 800 кэв для $CI^{-1}(24.5\%)$ и ~ 5 мэв для $CI^{-1}(75.5\%)$.

При взаимодействии электронов с солью высока вероятность рождения ядра Mg²³ в возбужденном состоянии с излучением γ-кванта с энергией примерно7.5 МэВ.

3.1.1 АСД - стотонный сцинтилляционный детектор Артемовской Научной

станции.

Детектор АСД (Рисунок 3.1.1) 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 vep в модели МСК и 44 veA в первой фазе MBK.

Методом поиска нейтрино в детекторе является регистрация всех событий, имеющих энерговыдеделение E > 5 МэВ, этот триггер открывает временные ворота $\Delta t = 1$ µсек 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 3.1.1 - Установка АСД АНС

3.1.2 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 3.1.3 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 3.1.2 - 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):

$\overline{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	(1.8 МэВ)	(88%)
$\nu_e + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}N + e^{-1}$	(17.3 МэВ)	(1.5%)
$\overline{\nu}_{e} + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}B + e^+$	(14.4 МэВ)	(1.0%)
$\nu_i + {}^{12}C \rightarrow \nu_i + {}^{12}C^* + \gamma$	(15.1 МэВ)	(2.0%)
$\nu_i + e^- \rightarrow \nu_i + e^-$	(-)	(3.0%)
$v_e + {}^{56}Fe \rightarrow {}^{56}Co^* + e^-$	(10. МэВ)	(3.0%)
$v_e^- + {}^{56}Fe \rightarrow {}^{56}Mn + e^+$	(12.5 МэВ)	(0.5%)
$\nu_i + {}^{56}Fe \rightarrow \nu_i + {}^{56}Fe^* + \gamma$	(15. МэВ)	(2.0%)

В модели стандартного коллапса (сферически-симметричная, невращающаяся, немагнитная звезда, MCK) 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: $v_e + p \rightarrow e + n$, $E_{e^+} = E_{v_e}$ -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:

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

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

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

 $v + {}^{12}C \rightarrow v + {}^{12}C^*.$

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 MBK ($E_v = 20 \div 40$ 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 $\bar{v}_e p$ в модели MCK и 410 $v_e A$ в первой фазе MBK.



Рисунок 3.1.3 - Активная масса M(t) установки LVD. 1992 год – запуск первой башни T1, 1996 г – запуск T2, 2002 г. – работа всех трех башен установки.

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 2015 (23 года) предел на частоту вспышек сверхновых составляет 1/ 9.99 года⁻¹.

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

По данным установок LVD и БПСТ проводился поиск совпадений временных кластеров, зарегистрированных в детекторах с 2010 по 2013 г.

Длительность каждого кластера не превышает 20 с. В LVD более высокая масса мишени и более низкий порог срабатывания счетчиков (620 т и 5 МэВ), чем в БПСТ (130 т и 8 МэВ). Вследствие приведенной разницы в параметрах установок при их одновременной регистрации вспышки нейтринного излучения множественность временного кластера в LVD будет в среднем в 5–6 раз выше, чем в БПСТ. Использовался следующий алгоритм поиска: для каждого кластера в БПСТ с фиксированной множественностью ищется кластер с наибольшей множественностью в LVD, начало которого раньше не более чем на 10 с. В результате были получены распределения кластеров LVD по множественности при фиксированном числе событий в кластерах БПСТ. Параметры указанных распределений представлены в таблице 3.1

BU	JST	LVD						
k _{BUST}	N _{BUST}	k _{LVD}	k _{peak}					
3	31885	16.5	15					
4	4647	16.5	15					
5	494	16.6	14					
6	30	17.9						
7	4	15.0						

Таблица 3.1

Как видно из представленных экспериментальных результатов, среднее и наиболее вероятное число событий в кластерах LVD практически не изменяются с ростом множественности кластеров БПСТ. Это означает, что события (в кластерах) являются фоновыми, а не откликами детекторов на вспышки нейтринного излучения. На рисунке 3.1.4 представлено распределение по множественности кластеров LVD, совпадающих с кластерами БПСТ, в которых зарегистрировано по шесть событий. В случае реальной регистрации вспышки нейтринного излучения, в соответствующем кластере LVD было бы 30–35 событий. Как видно из представленного распределения, оно резко обрывается при значении множественности 26 (два события), что указывает на отсутствие откликов на вспышку нейтринного излучения.



Рисунок 3.1.4. Распределение по множественности кластеров LVD, совпадающих по времени с кластерами из 6 событий в БПСТ.

Также проводился поиск кластеров в БПСТ, начало которых запаздывало не более чем на 10 с относительно кластеров LVD с заданными значениями множественности. Поиск таких совпадений был проведен для трех диапазонов значений множественности кластеров LVD: 11–15, 21–25 и 41–50 событий в кластере соответственно. Полученные распределения множественности кластеров БПСТ представлены в таблице 3.2. Как видно, при увеличении множественности кластеров LVD среднее значение множественности кластеров БПСТ остается практически неизменным, что также указывает на то, что события (в кластерах) являются фоновыми.

klvd kbust	3	4	5	6	7	k
11–15	43637	6137	638	34	6	3.15
21–25	14026	2111	230	22	5	3.16
41-50	316	35	8	0	0	3.14

Таблица 3.2

Помимо поиска совпадений кластеров событий в LVD и БПСТ также проводился поиск совпадений одиночных импульсов в детекторах. Методика анализа предельно проста: время между одиночными событиями на разных установках должно быть менее одной секунды. В результате была получена средняя величина темпа счета совпадений, равная четырем событиям в сутки. Для сравнения, 23 февраля 1987 г. вблизи времени 2:52 UT в течение 2 ч было зарегистрировано 13 совпадений одиночных импульсов в детекторах LSD и БПСТ. Время между одиночными сигналами в детекторах не превышает одну секунду. Столь значительное превышение уровня фона может быть следствием регистрации взаимодействия нейтрино в детекторах.

В ходе поиска совпадений временных кластеров одиночных событий были построены распределения множественности кластеров, зарегистрированных одной установкой, при фиксированном значении величины множественности кластеров, зарегистрированных на другой экспериментальной установке. Параметры полученных распределений позволяют заключить, что зарегистрированные кластеры являются фоном, а не следствием регистрации нейтринного излучения детекторами LVD и БПСТ.

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

Для широкого круга низкофоновых подземных экспериментов по поиску редких событий, таких как регистрация нейтринного излучения от коллапсов звезд, поиск частиц темной материи, детектирования нейтрино низких энергий и пр., одной из важнейших задач является исследование источников фона, связанных с естественной радиоактивностью материалов и мюонами космических лучей. Высокоэнергичные мюоны космических лучей легко проникают через толщу грунта и достигают места размещения подземных экспериментальных установок, генерируя нейтроны при непосредственном взаимодействии с ядрами, а начиная с глубин ~100м в основном в адронных, а также в электромагнитных ливнях внутри конструкций детектора, элементах защиты И окружающего грунта. Эти нейтроны представляют собой самую нежелательную компоненту фона, поскольку они способны полностью имитировать искомые редкие процессы.

3.2.1 Измерение числа нейтронов генерируемых мюонами в железе и свинце

LVD – многоцелевой эксперимент, основная задача которого – поиски нейтринного излучения от гравитационного коллапса звездных ядер. Детектор LVD является хорошим прибором для исследования мюонов космических лучей под землей. Мюоны проходя через грунт и вещество детекторов теряют свою энергию на ионизацию атомов среды, на излучение тормозных γ -квантов, образование электрон-позитронных пар и глубоконеупругое взаимодействие. Среди продуктов взаимодействия мюонов с веществом (электроны, гамма-кванты, пионы, протоны, радиоактивные изотопы, нейтроны), которые могут создавать фоновые события в детекторах, нейтроны занимают особое место. Основными характеристиками нейтронов, производимых мюонами в веществе, является величина генерации нейтронов мюоном в 1 г/см² (выход нейтронов Y_n).

Эксперимент по измерению числа нейтронов, генерированных мюонами, проводится при помещении исследуемого вещества на специальной конструкции между счетчиками детектора LVD (Рисунок 3.1.5). Мюон со средней энергией 280 ГэВ, проходя через два счетчика и дополнительное вещество по вертикали, генерирует дополнительное количество нейтронов (delta N). Величину delta_N мы приводим на один мюон и относим к длине трека мюона (в г/см²) в дополнительном веществе. Прямой метод измерения позволяет определить генерацию нейтронов в различных веществах без расчета доли нейтронов, рожденных в сложном веществе. Данным методом наиболее просто измерять выход нейтронов в веществах с большим атомным номером, таких как Fe, Pb, Cu, Ca. С

43

мая 2015 года начат эксперимент с железом, с октября 2014 измеряется выход нейтронов в свинце. Полная масса доп. железа на 4-х счетчиках составила 4 х 470 кг = 1880 кг, масса свинца также на 4-х счетчиках - 4 х 510 = 2040 кг.



Рисунок 3.1.5 Схема эксперимента по измерению выхода нейтронов от мюонов в железе или свинце.

Регистрация нейтронов производится по гамма-квантам, испускаемым в результате радиационного захвата тепловых нейтронов протонами сцинтиллятора и ядрами железа в структуре LVD. Число нейтронов определяется по временному распределению низкоэнергетичных импульсов (1–12 МэВ) во временном окне 50– 550 мкс после прохождения мюона.

Число нейтронов, зарегистрированных при геометрии из 2 счетчиков, мы определяли с высокой точностью. Для аппроксимации временного распределения использован закон Nn(t) = N0· $\exp(-t/tay)$ + B, где tay = 145 мкс – экспонента захвата термализованного нейтрона в сцинтилляторе, B = const, которая зависит от фоновых условий (Рисунок 3.1.6). Были проанализированы данные с 2005 по 2013 год. Полученное удельное число нейтронов на один мюон составило 0.036 n/muon.



Рисунок 3.1.6 Временные распределения нейтронных импульсов до (слева) и после (справа) установки железной пластины.

После установления дополнительного железа (Рисунок 3. 1.4), регистрация проводилась в течение 22 месяцев с 06.2013 по 04.2015. Получено удельное число нейтронов 0.049 n/muon.



Рисунок 3.1.7 - Фотография конструкции с дополнительным железом между двумя счетчиками LVD.

При измерении выхода со свинцом использовалось интегральное временное распределение. При статистике за 7 месяцев с 11.2014 по 04.2015 было получено 0.096 n/muon (Рисунок 3.1.8).

Учитывая средние длины пробега мюона 35.6 г/см² в дополнительном железе и 38.7 г/см² в свинце, а также эффективности регистрации нейтронов (24.4 %и 28.0 %), были получены величины генерации нейтронов мюонами в железе – Yn_fe =(15 ± 2) x 10⁻⁴ n/muon/(g/cm²) и в свинце Yn_pb =(55 ± 20) x 10⁻⁴ n/muon/(g/cm²). В таблице 1.3 приведены полученные результаты.



Рисунок 3.1.8 Временные распределения нейтронных импульсов до (слева) и после (справа) установки свинцовой пластины.

Таблица 3.3 Измеренные и вычисленные величины для выхода нейтронов.

	Nn/Nµ	Nn/Nm	$\Delta Nn/N\mu$	length,	Эффектив-	$(\Delta Nn/N\mu)/\rho l/\eta$,
вещество	с доп.	без		ρl,	ность	
	пластиной	пластины		г/см ²	η	n/ мюон / ($\Gamma \cdot cm^{-2}$)
Fe	0.049	0.036	0.013	35.6	0.244	$(15 \pm 2) \times 10^{-4}$
Pb	0.096	0.037	0.059	38.7	0.280	$(55 \pm 20) \times 10^{-4}$

Увеличение статистического материала, позволит получить величину генерации нейтронов в свинце с большей точностью.

3.1.3 РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ ПО ЦЕЛЕВОЙ ПРОГРАММЕ ПРЕЗИДИУМА РАН «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИИ И АСТРОФИЗИКА»

3.1 Описание эксперимента OPERA

Целью эксперимента OPERA (Рисунок 3.3.1) является наблюдение осцилляций v_{μ} в v_{τ} в пучке v_{μ} от ускорителя ЦЕРН посредством прямой регистрации τ -лептонов в ядерной эмульсии в подземной национальной лаборатории Гран Сассо национального института Ядерной физики (Италия). Пучок мюонных нейтрино от ускорителя SPS в ЦЕРНе направляется на детектор, находящийся в 732 км, который он достигает за $2.7 \cdot 10^{-3}$ секунды. Главный элемент детектора - эмульсионные пластины, в которых будут исследоваться события взаимодействия нейтрино, в том числе V_{τ} , появление которых связано с эффектом осцилляции.



Рисунок 3.3.1 Эксперимент ОПЕРА в зале С подземной лаборатории Гран Сассо

Для набора статистики необходима большая масса детектора, а для наблюдения короткоживущего тау-лептона требуется высокое пространственное разрешение. Детектор массой 1.25 кт состоит из двух независимых супермодулей, включающих в себя блоки мишени, трековую систему целеуказания (ТСЦ) и мюонные спектрометры. Основной элемент детектора – эмульсионный кирпич, состоящий из 56 свинцовых пластин толщиной в 1 мм и 57 эмульсионных пластин. Поперечные размеры эмульсионного кирпича 12.8×10.2 см², толщина 7.9 см (около 10 радиационных длин) За каждой стенкой из мишенных блоков находятся ТСЦ, указывающие на эмульсионный кирпич, в котором имело место взаимодействие.

В эксперименте OPERA повышение эффективности обработки накопленного материала в настоящей момент является чрезвычайно актуальной задачей.

В 2012 году набор данных был закончен, детектор зарегистрировал около 17 000 взаимодействий нейтрино, для них были определены блоки мишени, содержащие вершину события, в процессе набора данных специальный робот извлекал блоки из детектора, они разбирались, ядерная фотоэмульсия была проявлена и отправлена в институты-участники эксперимента для анализа. Анализ данных будет полностью завершен к концу 2016г, детектор разобран. Однако накопленный за годы проведения эксперимента опыт будет использован в новых проектах по нейтринной физике. Части детектора OPERA уже ждут в экспериментах JUNO (Китай) и SHIP (ЦЕРН). В последнем проекте ожидается беспрецедентно интенсивный поток тау-нейтрино, и опыт эксперимента OPERA будет чрезвычайно полезен для исследования взаимодействий этой частицы.

К настоящему времени обнаружено 5 событий-кандидатов на взаимодействие v_т в эмульсионном детекторе.

Использование ядерной эмульсии в трековых детекторах физики высоких энергий и астрофизики позволяет выделять частицы с высокой точностью (400 до 1000 нм) при очень большой плотности треков и с высокой точностью определять координаты первичного взаимодействия частиц.

Эксперимент OPERA является крупнейшим эмульсионным экспериментом. Его осуществление стало возможным благодаря созданию сканирующих систем для анализа изображений эмульсии современного поколения.

3.2 Пятое событие-кандидат найденное в эксперименте OPERA

В сентябре 2015 года коллаборацией OPERA объявлено об открытии осцилляций нейтрино в канале $v_{\mu} \rightarrow v_{\tau,}$. В работе N. Agafonova et al., Phys. Rev. Lett. 115, 121802 приводятся результаты анализа 5408 событий (что на 15% больше выборки, использованной при наблюдении 4-х кандидатов) и характеристики 5-го кандидата. На рисунок 3. 2.2 приведена его топология. Кроме того, была проведена новая оценка фона. В результате, статистическая значимость, соответствующая гипотезе только фона,

48

составила 5.1 σ. Получены ограничения на модели смешивания активных нейтрино со стерильными. Поставлены ограничения на отклонение скорости нейтрино пучка CNGS от скорости света в вакууме, важные, в частности, для моделей с дополнительными измерениями.



Рисунок 3.2.2 Изображение 5-го события-кандидата в горизонтальной проекции, соответствующей направлению движения нейтрино. V₀ и V₂ первичная и вторичная вершины взаимодействия. Черными отрезками обозначены сегменты треков, измеренных в эмульсиях.

Характеристики всех 5 событий-кандидатов не противоречат ожидаемым для взаимодействий v_{τ} (табл. 3.1). Тем самым, в эксперименте OPERA совершено открытие осцилляций нейтрино в канале $v_{\mu} \rightarrow v_{\tau}$.

Канал	Чарм	Повторные вз. адронов	Рассеяние µ на большой угол	Всего	Ожидаемо е число	Наблюдаем ое
τ—>1 h	0.017±0.003	0.022±0.006		0.04±0.01	0.52±0.10	3
τ—> 3 h	0.17±0.03	0.003 ± 0.001		0.17±0.03	0.73±0.14	1
τ—> μ	0.004± 0.001		0.0002± 0.0001	0.004±0.001	0.61±0.12	1
τ —> e	0.03±0.01			0.03±0.01	0.78±0.16	0
Всего	0.22 ± 0.04	0.02 ± 0.01	0.0002±0.0001	0.25±0.05	2.64 ± 0.53	5

Таблица 3.1. Сопоставление числа ожидаемых событий в различных каналах и наблюдаемых в эксперименте OPERA

Российские участники эксперимента OPERA внесли существенный вклад в проведение и анализ эксперимента, в том числе, принимали участие в сборке и разборке детектора в лаборатории Гран Сассо, в обработке экспериментальных данных на различных этапах, начиная с уровня процедур проявки эмульсий и до физического анализа данных.

В 2015 году была продолжена обработка эмульсионного материала эксперимента OPERA. Сотрудники ИЯИ РАН осуществляли разборку детектора. В соответствии с расписанием дежурств на установке OPERA, российскими учеными выполнено 325 (чел./ д.) дежурств (Табл. 3.2).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
junuary												2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2	
february		2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2				
march		2	2	2	2	2			2	2	2	2	1			1	1	1	1	1			1	2	1	1	1			1	1
april	1	1	1			1	1	1	1	1			1	1	1	1	1			1	1	1	1	1			1	1	2	1	
may	1			1	1	1	1	1			1	1	1	1	1			1	1	1	1	1			1	1	1	1	1		
june	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1			1	1	1	1	1			1	1	2	2	2			2	2	
july	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			1	1	1	1	1
august			1	1	1	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2										
september							1	1	1	1	1			1	1	1	1	1			2	2	2	2	2			2	2	2	
october	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2	
november		2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	
december	2	2	2	2			2		2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2						

Таблица 3.2 График выполненных дежурств по разборке OPERA.

3.4 Результаты работы по международному соглашению о Научноисследовательской работе российских научных групп в Национальной лаборатории Гран Сассо (Италия) направление: «Физика космических лучей и редких распадов»

Российские сотрудники экспериментов Лаборатории Гран Сассо принимают активное участие в работе Международных Коллабораций. Российские ученые осуществляют дежурства на детекторах, занимаются обработкой результатов работающих экспериментов (LVD, OPERA, BOREXINO); изготавливают и налаживают оборудование (GERDA) и занимаются теоретическими исследованиями.

Лаборатория Гран Сассо Национально института ядерной физики Италии расположена под горным массивом в 10-километровом туннеле между городами Терамо и Л'Аквила в 120 км от Рима. Ее подземная структура включает в себя три больших экспериментальных зала 100 м в длину, 20 м в ширину и 18 м в высоту каждый, общим объемом 180 тыс. м³.

Сотрудники подразделения принимали участие в научных исследованиях на экспериментах LVD и OPERA в соответствии с их научно-техническими программами.

Работы по международному сотрудничеству на эксперименте LVD предусматривают: проведение экспериментов по генерации нейтронов мюонами в железе и свинце (подготовка пластин, резка, установки, монтаж конструкции), замена фотоэлектронных умножителей, круглосуточные дежурства на установке. С 1 января по 31 декабря 2015 года сотрудники ИЯИ дежурили в течение 17 недель (17 × 7 дней × 1 человек) = 119 человекодней.

В течение 2015 года с 15 января по 20 декабря сотрудники ИЯИ РАН дежурили на установке OPERA 49 недель, в том числе 33 недели работали 1 человекодень и 16 недель – 2 человекодня. Полная активность группы OPERA ИЯИ РАН составляет 165 день × 1 + 80 день × 2 = 325 человекодней.

Super-K, LVD, IceCube, Borexino, KamLAND, HALO, Daya Bay образуют глобальную сеть SNEWS (SuperNova Early Warning System) для поиска нейтринных всплесков от Сверхновых, которая работает уже в течение 14 лет. С детекторов посылается информация о кандидатах на нейтринное событие на сервер SNEWS в Брукхэйвенскую Национальную лабораторию, США. Цель SNEWS – предоставить астрономическому сообществу раннее предупреждение о вспышке Сверхновой в нашей Галактике с тем, чтобы эксперименты, которые не могут самостоятельно зарегистрировать сигнал от Сверхновой, могли бы наблюдать явление сверхновой. Более того, SNEWS увеличивает достоверность событий, детектируемых одновременно несколькими детекторами на пороге их чувствительности.

3.1 ПУБЛИКАЦИИ И ДОКЛАДЫ В 2015 ГОДУ

Оригинальные статьи за 2015

1. N.Y. Agafonova et al. (LVD Collaboration) "Implication for the core-collapse supernova rate from 21 years of data of the Large Volume Detector" The Astrophysical Journal, 802:47 (9pp), 2015 March 20 (WOS:000351834700047)

2. N.Y. Agafonova et al. (OPERA Collaboration) "Limits on muon-neutrino to tauneutrino oscillations induced by a sterile neutrino state obtained by OPERA at the CNGS beam" arXiv:1503.01876, Journal of High Energy Physics, June 2015, 2015:69

3. N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration) Discovery of tau neutrino appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment, arXiv:1507.01417, Phys. Rev. Lett. 115, 121802 (Published 17 September 2015) (WOS:000361320400002).

 Malgin, A. S. "Seasonal Modulations of the Underground Cosmic-Ray Muon Energy" JOURNAL OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL PHYSICS Volume: 121 Issue:
 Pages: 212-216, 2015 (WOS:000361441400005)

Опубликованные Труды конференций

 Н.Ю. Агафонова и др. (Коллаборация LVD) "Измерение числа нейтронов, генерированных мюонами космических лучей, с помощью детектора LVD", Известия РАН, Сер. физ. 2015, Том 79, N3, с. 436–438; N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, V. L. Dadykin, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, A. S. Malgin, V. V. Manukovsky, O. G. Ryazhskaya, V. G. Ryasny, I. R. Shakiryanova, A. V. Yudin, V. F. Yakushev, and the LVD Collaboration, "Measurement of Neutron Number Generated by CosmicRay Muons in Iron Using the LVD", Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol. 79, No. 3, pp. 401–403.

 Н.Ю. Агафонова и др. (Коллаборация LVD) "Генерация нейтронов горизонтальными мюонами от нейтринного пучка из ЦЕРНа", Известия РАН, Сер. физ.
 Том 79, N3, с. 439–441; N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, V. L. Dadykin, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, A. S. Malgin, V. V. Manukovsky, O. G. Ryazhskaya, V. G. Ryasny, I. R. Shakiryanova, A. V. Yudin, V. F. Yakushev, and the LVD Collaboration, "Generation of Neutrons Produced by Muons from CERN Neutrino Beam", Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol. 79, No. 3, pp. 404–406.

3. Н.Ю. Агафонова и др. "Совместный анализ экспериментальных данных по поиску нейтрино от звездных коллапсов на детекторах LVD и БПСТ", Известия РАН, Сер. физ. 2015, Том 79, N3, с. 442–445; N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, M. M. Boliev, V. V. Volchenko, G. 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 LVD Collaboration, "Joint Analysis of Experimental Data to Search for Neutrinos from Collapsing Stars Using the LVD and BUST Apparata", Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol. 79, No. 3, pp. 407–409.

4. К.В. Мануковский, О.Г. Ряжская, Н.М. Соболевский, А.В. Юдин "Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных материалах", Известия РАН, Сер. физ. 2015, Том 79, N3, с. 432–435; К.V. Manukovskiy, O.G. Ryazhskaya, N.M. Sobolevskiy, A.V. Yudin "Generation of Neutrons by Cosmic-Ray Mions in Various Materials", Bull. of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol.79, No.3, pp. 397-400.

5. K.V. Manukovskiy, O.G. Ryazhskaya, N.M. Sobolevskiy, A.V. Yudin "Muon-induced Neutron Background Study for Underground Experiments", (2015), p. 72 - 74, Proceedings, 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Particle Physics at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo : Moscow, Russia, August 22-28, 2013

6. N. Kitagawa on befalf of the OPERA Collaboration "The OPERA experiment, analysis status and recent results on muon-neutrino to electron-neutrino oscillations", (2015), 58-61 Proceedings, 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Particle Physics at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo : Moscow, Russia, August 22-28, 2013

7. S. Dmitrievsky on befalf of the OPERA Collaboration "Status and updated result of the OPERA experiment search for muon-neutrino to tau-neutrino oscillations", (2015), p. 62-66, Proceedings, 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Particle Physics at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo : Moscow, Russia, August 22-28, 2013

8. I. Shakiryanova on behalf of the LVD Collaboration "Present status of LVD", (2015),
p. 102-104, Proceedings, 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Particle Physics at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo : Moscow, Russia, August 22-28, 2013

9. Longhin, A., OPERA Collaboration "Results from the OPERA experiment at the CNGS beam", Book Series: Journal of Physics Conference Series Volume: 631 Article Number: 012056, 2015 (WOS:000359478900056)

10. De Serio, M., OPERA Collaboration "Observation of nu(mu) -> nu(T) oscillations in
the CNGS beam with the OPERA experiment", Book Series: EPJ Web of Conferences Volume:
95 Article Number: 03005, 2015 (WOS:000358248400027)

11. Pastore, A., OPERA Collaboration "Search for charmed hadrons in the OPERA experiment" Book Series: EPJ Web of Conferences Volume: 95 Article Number: 03005, 2015 (WOS:000358248400027)

53

Выступление на конференциях и семинарах

1. О.Г. Ряжская (совместно с Агафоновой, Ашихминым, Шакирьяновой, Юдиным, Литвиновичем, Рогановой). Публичные слушания, освещающие деятельность российских ученых в ведущих зарубежных научных центрах "Подземная физика и эксперименты в Итальянской Национальной лаборатории Гран Сассо" 12 марта 2015 г.

2. О.Г. Ряжская. Вступительное слово. Зацепинские чтения 2015. 05 июня 2015 (ФИАН)

 В.В. Ашихмин (Сотрудничество LVD). "Совместный анализ экспериментальных данных с детекторов LVD и БПСТ по поиску нейтрино от звездных коллапсов",
 Зацепинские чтения 2015. 05 июня 2015 (ФИАН)

4. К.В. Мануковский "Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных веществах", Зацепинские чтения 2015. 05 июня 2015 (ФИАН)

5. Н.Ю. Агафонова (Сотрудничество LVD) "Измерение генерации нейтронов в железе и свинце с помощью детектора LVD", Зацепинские чтения 2015. 05 июня 2015 (ФИАН)

6. N. Agafonova et al. (LVD Collaboration) "Measurement of the muon-induced neutron yield in Fe and Pb using Large Volume Detector at LNGS", (poster) 17th Lomonosov
Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Moscow, 20-26 August, 2015

7. A. Ashikhmin et al. "Joint analysis of experimental data on the search for neutrinos from stellar collapses using the LVD and BUST detectors", (poster) 17th Lomonosov
Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Moscow, 20-26 August, 2015

 A. Yudin et al. "Generation of Neutrons by Cosmic-Ray Muons in Different Materials", (poster) 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Moscow, 20-26 August, 2015

9. O. Ryazhskaya "Some remarks on the Experiments for Dark Matter Search", 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, MSU, 26/08/2015

10. Olga Ryazhskaya "Study of the penetrating component of cosmic rays underground using large liquid scintillation detectors", TAUP 2015, 7-11 September 2015, Torino, Italy

11. V. Ashikhmin "The search for coincidences of rare events with LVD and BPST detectors", Talk presented on "The International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts", KChR, Nizhnij Arkhyz (SAO), KBR, Terskol (BNO), October, 7 - 14, 2015

3.1 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_а «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 2016 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. Определение коэффициента корреляции для одиночных импульсов и для кластеров фоновых событий, измеренных большими сцинтилляционными детекторами LVD, АСД, БПСТ.

На установке LVD планируется определение величин потоков атмосферных мюонов и нейтрино вблизи горизонта, и мюонных групп; характеристик потоков нейтронов, создаваемых мюонами космических лучей в горизонтальном направлении.

По целевой программе Президиума РАН планируется проведение исследований по генерации нейтронов мюонами космических лучей, определение числа остановок мюонов в детекторе LVD от взаимодействия нейтринного пучка из ЦЕРНа. С помощью установки OPERA планируется определение параметров и методики поиска редких событий астрофизического происхождения в детекторе.

Сотрудники подразделения подали заявку на *грант РНФ на 2016-2018 года*. В план на 2016 включены работы по установлению свинца в специальные конструкции между счетчиками установки LVD. Проведение измерений генерации нейтронов мюонами в железе (набор дополнительной статистики – 1 год) и в свинце (получение предварительных результатов).

- 3.2 Лаборатория галлий-германиевого нейтринного телескопа БНО. Лаборатория радиохимических методов детектирования нейтрино ОЛВЭНА
- 3.2.1 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.Веретенкин

Старший научный сотрудник, кфмн В.В.Горбачев Начальник установки Б.А. Комаров Научный сотрудник Т.В.Ибрагимова Научный сотрудник А.В.Калихов Научный сотрудник, кхн Т.В.Кнодель 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

$3.2.1 \text{ PE}\Phi\text{EPAT}$

Отчет 8 с., 1 ч., 1 рис.

СТАНДАРТНАЯ СОЛНЕЧНАЯ МОДЕЛЬ, СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП

Объектом исследования является нейтринное излучение Солнца.

Цель работы — снижение величины систематической неопределенности в солнечных измерениях на ГГНТ.

В ГГНТ используется радиохимический метод детектирования, основанный на реакции 71 Ga + nu_e \rightarrow 71 Ge + e-. Электронные нейтрино захватываются ядром изотопа 71 Ga галлиевой мишени с образованием радиоактивного изотопа 71 Ge с периодом полураспада 11.4 дня. Порог реакции составляет 0.233 МэВ и позволяет регистрировать нейтрино от всех нейтрино-образующих реакций, протекающих в Солнце согласно Стандартной Солнечной Модели (ССМ), в том числе рр-нейтрино. Поток нейтрино определяется по результатам измерений скорости захвата нейтрино на галлии с учетом эффективностей извлечения и регистрации.

В рамках выполнения НИР был разработан метод и создана программа для определения эффективностей извлечений с использованием результатов массспектрометрического анализа фракционного состава, чередующихся изотопнообогащенных германиевых носителей, для снижения величины неопределенности эффективности извлечения. Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: высокая эффективность извлечения единичных атомов германия-71 из ~50 тонн металлической галлиевой мишени, составляющая 97.8%, с неопределенностью величины эффективности извлечения 1.1%.

Использование нового метода позволило снизить неопределенность эффективности извлечений с 3.4% от измеренной скорости захвата до 2.2%.

С использованием новых значений эффективностей извлечений выполнен анализ данных за период измерений на ГГНТ с 1990 по 2014 год, получена величина скорости захвата солнечных нейтрино на металлическом галлии, 64.6 +3.1/-3.3 SNU

3.2.1 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 ⁷¹Ga 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 *рр*-нейтрино. Измерения, проводимые двумя независимыми методами и группами, значительно повышает достоверность получаемых результатов.

58

3.2.1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

ГГНТ предназначен для мониторинга нейтринного излучения Солнца во всем энергетическом диапазоне, включая область низких энергий. Поток нейтрино определяется по результатам измерений скорости захвата нейтрино на галлии, которая определяется по числу зарегистрированных распадов ⁷¹Ge с учетом эффективностей извлечения и регистрации.

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 германия, который равномерно распределяется в реакторах по всей массе галлия. С 2006 в качестве носителя стал использоваться изотопно-обогащенный германий. До февраля 2008 года использовался только один носитель, обогащенный по изотопу ⁷⁶Ge. С февраля 2008 года в солнечных измерениях стали применять чередование носителей, обогащенных по различным изотопам германия: ⁷⁶Ge, ⁷²Ge, ⁷⁰Ge.

В течение месяца происходит «облучение» галлиевой мишени солнечными нейтрино, по окончании экспозиции (около 30 дней) образовавшиеся атомы ⁷¹Ge химически извлекаются из галлиевой мишени вместе с добавленным германиевым носителем. Химические свойства изотопов германия одинаковы, поэтому полная эффективность извлечения атомов ⁷¹Ge равна эффективности извлечения германиевого носителя, которая определяется как отношение массы извлечения отбирается образец заключительного экстракционного раствора для анализа на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой с целью определения фракционного состава Ge изотопов.

Для снижения неопределенности эффективности извлечения был разработан метод и создана программа для определения эффективностей извлечений с использованием результатов масс-спектрометрического анализа фракционного состава, чередующихся изотопно-обогащенных германиевых носителей.

С использованием программы были вычислены эффективности извлечений с февраля 2008 по декабрь 2014 года, за этот период было выполнено 83 извлечения. Средняя эффективность для 83 извлечений составила 97.8% ± 1.2%.

Для оценки точности метода в целом из определения средней величины были исключены 3 извлечения (июль, август, сентябрь 2011, на Рисунке 1 они представлены красным цветом) по причине использования в них одного и того же изотопнообогащенного носителя, а также извлечение декабря 2014, поскольку оно последнее в анализируемом наборе данных и для него пока нет последующих данных для более

59

точного определения. Средняя эффективность для оставшихся 79 извлечений составила 97.8% ± 1.1%. Таким образом, метод определения эффективности извлечений, основанный на изотопных измерениях, имеет неопределенность 1.1%.

Неопределенность эффективности извлечений составляет 3.4% от измеренной скорости захвата, ее вклад в полную систематическую неопределенность солнечных измерений на ГГНТ более 75%. Применение программы вычисления эффективностей извлечения с использованием изотопного анализа позволило снизить эту величину до 2.2%.



Рисунок 3.2.1 - Эффективности извлечения Ge из Ga для 83 извлечений с февраля 2008 по декабрь 2014. Красные точки – извлечения с использованием подряд одного изотопнообогащенного носителя.

С использованием полученных эффективностей извлечений выполнен анализ данных за период измерений на ГГНТ с 1990 по 2014 год. С января 1990 по декабрь 2014 года проведено 244 измерения (462 набора данных). В энергетических диапазонах *L*- и *K*-пиков распада ⁷¹Ge отобрано 5320 события, из которых 1389 отнесено временным анализом к ⁷¹Ge. Из объединенного анализа данных получена величина скорости захвата нейтрино с энергий выше 233 кэB, $64.6 \pm 2.4(\text{стат}) + 2.0/-2.2(\text{сист})$ или 64.6 + 3.1/-3.3 SNU.

3.2.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План НИР по теме «Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории» на 2015 год выполнен в полном объеме.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

SNU – (Solar Neutrino Unit) Солнечная Нейтринная Единица, обозначает один захват нейтрино в день в мишени, содержащей 10³⁶ атомов нейтрино-абсорбирующего изотопа.

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

SAGE – Российско-Американский галлиевый эксперимент.

3.2.1 ПУБЛИКАЦИИ

- B.T. Cleveland, V.N. Gavrin, V.V. Gorbachev, T.V. Ibragimova, T.V. Knodel, Y. Malyshkin, I.N. Mirmov, E.P. Veretenkin. Use of enriched isotopes to measure efficiency of chemical extraction in the SAGE solar neutrino experiment. International Journal of Mass Spectrometry. 2015. Volume 392, Pages 1-172.
- D. Frekers, T. Adachi, H. Akimune, M. Alassari, B.A. Brown, B.T. Cleveland, H. Ejiri, H. Fijita, Y. Fuyita, M. Fuyiwara, V.N. Gavrin, et.al. Precision evaluation of the ⁷¹Ga(v_e, e⁻) solar neutrino capture rate from the (³He, t) charge-exchange reaction. Phys. Rev. C 91. 2015. № 3. 034608.

Число публикаций, индексируемых в базе данных WoS: 2

3.2.2 Эксперимент с искусственным источником нейтрино на основе радионуклида ⁵¹Cr активностью 3 МКи

УДК 539.1.074

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель, с.н.с. Е.П. Веретенкин Исполнители: Старший научный сотрудник, кфмн В.В.Горбачев 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 Отчет 14 с., 2 ч., 3 рис., 6 табл.

СТАНДАРТНАЯ СОЛНЕЧНАЯ МОДЕЛЬ, СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО, ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ИСКУССТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО,

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 ⁵¹Cr активностью 3 МКи для выполнения эксперимента по исследованию нестандартных свойств нейтрино.

В рамках выполнения НИР разработана технология изготовления облучательной мишени из обогащенного хрома для создания искусственного источника нейтрино хром-51, разработана технология электролитического восстановления обогащенного хрома, разработана методика изготовления хромовых мишеней из остатков обогащенного хрома, полученных на предыдущих технологических стадиях, разработана конструкция компактного источника нейтрино.

3.2.2 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.

Метод ICP-AES - метод атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

 S_d – standard deviation – стандартное отклонение.

МЭД - минимальная эффективная доза.

ПО – предел обнаружения.

п.и.с. – природный изотопный состав.

3.2.2 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 настояниях 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).

3.2.2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

3.2.2.1. Разработка технологии изготовления облучательной мишени из обогащенного хрома

Разработка технологии электролитического восстановления обогащенного хрома.

Одним из основных этапов изготовления источника нейтрино на основе ⁵¹Сг является электролитическое восстановление металлического хрома из раствора трехокиси хрома CrO₃. В 2015 г. разработана технология восстановления хрома, изготовлен электролизер и проведен пробный процесс электролиза с получением 1,5 кг металлического хрома.

Схема электролизера представлена на Рисунке 1. Электролитическая ячейка коаксиальной конструкции наполнялась водным раствором хромовой и серной кислот в определенной пропорции. Катод из медной фольги располагался на внутренней поверхности полиэтиленовой емкости. Свинцовый анод, представляющий собой полый цилиндр, центрировался в корпусе с помощью фторопластовых вставок. Ячейка помещалась в заполненную водой емкость из нержавеющей стали. Охлаждение электролита до температуры ~20°С осуществлялось водопроводной водой, которая омывала внешнюю поверхность полиэтиленовой емкости и внутреннюю поверхность анода. Электролиз проводился при токе 200 А, что соответствовало плотности тока ~30 А/дм².



Схема электролизера для получения хрома.

- 1. корпус электролизёра;
- 2. медный катод в виде фольги;
- 3. свинцовый анод;
- 4. фторопластовые вставки;
- 5. термостат с водяным охлаждением;
- 6. электролит.

Рисунок 3.2.2.1

Для увеличения выхода металлического хрома была разработана методика регенерации электролита. Выход металлического хрома после электролиза составил 91.3%. Очистка полученного хрома от металлических примесей проводилась обработкой хрома в азотной кислоте в течение 3-х суток. Результаты анализа металлических примесей, проведенного методом ICP-AES, представлены в Таблице 3.2.2.1.

Эле- мент	ПО, мкг/г	ПО, мкг/г Хром	Эле- мент	ПО, мкг/г	ПО, мкг/г Хром	Эле- мент	ПО, мкг/г	ПО, мкг/г Хром	Эле- мент	ПО, мкг/г	ПО, мкг/г Хром
Li	0,04	< 110	Ga	1	<ПО	Sb	0,07	<ПО	Yb	0,006	< 110
Be	0,01	< 110	As	0,3	< 110	Te	0,06	< NO	Lu	0,006	< 110
В	1	<ПО	Se	1	<ПО	Ba	0,4	<ПО	Hf	0,006	<ПО
Na	6	<ПО	Rb	1	<ПО	La	0,009	<ПО	Та	0,003	<ПО
Mg	5	< 110	Sr	0,1	< 110	Ce	0,03	< NO	W	0,2	< 110
Al	3	<ПО	Y	0,3	<ПО	Pr	0,002	<ПО	Re	0,006	<ПО
Sc	0,1	<ПО	Zr	0,1	<ПО	Nd	0,01	<ПО	Ir	0,003	<ПО
Ti	6	<ПО	Nb	0,3	<ПО	Sm	0,003	<ПО	Pt	0,003	<ПО
Cr		Основа	Mo	0,1	<ПО	Eu	0,005	<ПО	Au	0,008	<ПО
Mn	0,6	< 110	Rh	0,1	< 110	Gd	0,006	< NO	Hg	0,01	< 110
Fe	6	<ПО	Pd	0,1	<ПО	Tb	0,003	<ПО	Tl	0,003	<ПО
Co	0,1	< 110	Ag	0,1	<ПО	Dy	0,006	<ПО	Pb	0,08	2,6
Ni	1	< 110	Cd	0,02	<ПО	Но	0,003	<ПО	Bi	0,008	<ПО
Cu	13	< 110	In	0,03	< 100 × 100	Er	0,005	< 100 × 100	Th	0,04	< 110
Zn	17	< 110	Sn	0,5	< 100 × 100	Tm	0,009	<ПО	U	0,002	< ΠΟ

Таблица 3.2.2.1 - Результаты анализа электролитического хрома методом ICP-AES.

Концентрации примесных элементов удовлетворяют предъявляемым требованиям по чистоте.

Разработка методики изготовления хромовых мишеней из остатков обогащенного хрома, полученных на предыдущих технологических стадиях.

Высокая стоимость обогащенного по ⁵⁰Cr материала определяет требование его минимальных потерь на каждой технологической стадии изготовления мишени. В 2014 г. были протестированы стадии газоизостатического прессования коммерчески доступного металлического хромового порошка и электроэрозионной вырезки металлических стержней требуемой формы и размеров. В результате предварительных экспериментов были определены оптимальные с точки зрения минимизации потерь материала размеры капсулы, количество компактируемого порошка, минимально возможные размеры хромовых заготовок, подвергаемых электроэрозионной обработке.

В 2015 г. была разработана методика вторичного использования оставшейся после электроэрозионной вырезки части хромовый заготовки (Рисунок 3.2.2.2). Методика включает предварительное измельчение хрома твердосплавным резцом. Результаты измельчения хромовой заготовки на токарном станке приведены ниже:

67

Начальный вес заготовки Р _{нач} , г	572,25
Конечный вес заготовки Ркон, г	258,83
$P_{\text{нач}}$ - $P_{\text{кон}}$, г	313,42
Вес Сг в стакане, г	789,23
Вес стакана, г.	476,84
Вес молотого хрома, г	312,39
Потери Cr, г	1,03
Потери Сг, %	0,33



Рисунок 3.2.2.2 - Заготовка из металлического хрома после электроэрозионной вырезки шестигранных стержней.

Размельчённый хром был разделен по фракциям (Таблица 2), и был выполнен химический анализ каждой фракции (Таблица 3.2.2.3).

Таблица 3.2.2.2 - Фракционный состав хромового порошка после просеивания ч	ерез 3
сита.	

Размер частиц, мм	т _{полная} , г	V _{Cr} ,мл	m _{Cr} , г	Насыпная плотность, г/см ³
> 1	81.56	25	46.41	1.86
0.315 - 1.00	135.37	35	72.61	2.07
0.056 - 0.315	88.23	35	87.82	2.51
< 0.056	6.21			
Итого	311,37			
Потери Cr, г	1.02			
Потери Cr, %	0.33			

Таблица 3.2.2.3 - Резу	льтаты анализа	размолотого	хрома методом	ICP-AES

Элемент	ПО, мкг/г	> 1.0	0,056-0,315	< 0.056	Элемент	ПО, мкг/г	> 1.0	0,056-0,315	< 0.056
Li	0,08	< 110	< 110	< 110	Te	0,1	< 110	< 110	< 110
Be	0,04	< 110	< 110	< 110	Cs	0,05	<ПО	< 110	< 110
В	0,4	< 110	< 110	< 110	Ba	0,3	<ПО	< 110	< 110
Na	5	10,5	< 110	< 110	La	0,07	<ПО	< 110	< 110
Mg	4	< 110	11,8	10,8	Ce	0,03	<ПО	< 110	< 110
Al	5	< 110	19,6	19,7	Pr	0,01	< 110	< 110	< 110

Κ	6	< 110	< 110	< 110	Nd	0,01	< 110	< 110	$< \Pi O$
Sc	0,03	< 110	< 110	< 110	Sm	0,01	< 110	< 110	< 110
Ti	1	< 110	< 110	< 110	Eu	0,01	< 110	< 110	< 110
Cr		Основа	Основа	Основа	Gd	0,05	< 110	< 110	< 110
Mn	1	< 110	< 110	< 110	Tb	0,003	< 110	< 110	< 110
Fe	8	45,5	47,8	99,7	Dy	0,01	< 110	< 110	< 110
Co	0,5	< 110	1,0	7,0	Но	0,01	< 110	< 110	< 110
Ni	2	< 110	< 110	< 110	Er	0,003	< 110	< 110	< 110
Cu	5	< 110	$< \Pi O$	20,9	Tm	0,01	< 110	< 110	< 110
Zn	16	< 110	$< \Pi O$	< 110	Yb	0,01	< 110	< 110	< 110
Ga	0,4	< 110	$< \Pi O$	< 110	Lu	0,003	< 110	< 110	< 110
As	9	< 110	$< \Pi O$	< 110	Hf	0,02	< 110	< 110	< 110
Se	2	< 110	< 110	< 110	Та	0,01	< 110	< 110	< 110
Rb	0,6	< 110	$< \Pi O$	< 110	W	0,02	1,1	1,3	7,5
Sr	0,5	< 110	2,3	1,7	Re	0,003	< 110	< 110	< 110
Y	0,1	< 110	$< \Pi O$	< 110	Ir	0,009	< 110	< 110	< 110
Zr	0,2	< 110	$< \Pi O$	< 110	Pt	0,005	< 110	< 110	< 110
Nb	0,4	< 110	$< \Pi O$	< 110	Au	0,032	< 110	< 110	< 110
Mo	0,1	0,72	2,1	1,3	Hg	0,03	< 110	< 110	< 110
Rh	0,1	< 110	$< \Pi O$	< 110	T1	0,006	< 110	< 110	< 110
Pd	0,04	< 110	$< \Pi O$	< 110	Pb	0,2	0,28	0,43	1,4
Ag	0,1	< 110	$< \Pi O$	< 110	Bi	0,03	< 110	< 110	< 110
Cd	0,05	< 110	$< \Pi O$	< 110	Th	0,004	< 110	< 110	< 110
Sn	0,1	0,22	< 110	0,30	U	0,008	< 110	< 110	< 110
Sb	0,1	< 110	< 110	< 110					

Результаты определения неметаллических примесей в размолотом хроме представлены в Таблице 3.2.2.4.

Средства измерений:

1) анализатор углерода и серы фирмы "Leco", модель CS-600

2) анализатор кислорода и азота фирмы "Leco", модель ТС-600

Методика выполнения измерений:

окислительное плавление в керамическом тигле в индукционной печи с плавнем.
 Детектирование углерода и серы по количеству выделившихся газообразных CO₂ и SO₂
 методом инфракрасной абсорбции соответственно.

2) восстановительное плавление в графитовом тигле в импульсной печи сопротивления в токе инертного газа (гелий). Детектирование кислорода по количеству выделившегося газообразного CO₂ методом инфракрасной абсорбции, детектирование азота по теплопроводности.

Таблица 3.2.2.4 - Результаты анализа образцов, массовая доля, %

№ образца	Углерод	S _d	Cepa	S _d	Кислород	S _d	Азот	S _d
менее 0,056 мм	0,048	0,006	0,0004	0,0001	0,818; 0,895	5; 1,21	менее (),01
0,056-0,315 мм	менее 0,001		менее 0,0001		0,311; 0,415	; 0,583	менее 0	,001
0,315-1 мм	менее 0	,001	менее 0,0001		0,387	0,010	менее 0	,001
более 1 мм менее 0,001		менее 0,001		0,228	0,038	менее 0	,001	

 S_d – standard deviation – стандартное отклонение

Результаты анализов показали неудовлетворительное качество хрома после измельчения твердосплавным резцом. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть другие варианты переработки остатков обогащенного хрома, полученных на предыдущих технологических стадиях, например, путем полного растворения и последующего электролитического восстановления.

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

Выполнен эскизный проект источника нейтрино с хромовой мишенью шестигранной конструкции (Рисунок 3).

M1:2



Рисунок 3.2.2.3 - Конструкция источника нейтрино с хромовой мишенью шестигранной конструкции (слева); сотовый сепаратор (справа).

Расчет активации критических с точки зрения радионуклидной чистоты элементов были выполнены в НИИАР по программе MCNR [A General Monte Carlo N-Particle Code. Version 4B / Editor Judith F. Briesmeister. Report LA-12625-M. Los Alamos, 1997]. Для расчетов была использована модель реактора CM-3, максимально приближенная к реальной геометрии реактора. Для источника была применена следующая модель: цилиндр h=95мм, ø=93мм гомогенно заполненный хромом массой m = 3кг, с содержанием

50Сг 100%, окружен следующими слоями (по направлению к внешней границе): сталь толщиной 2 мм, вольфрамовый сплав ВНД-МП (W-95%, Ni-3%, Cu-2% плотностью 17.6 г/см³) и толщиной 28 мм, сталь толщиной 2 мм. В Таблице 3.2.2.5 приведены результаты выполненных расчетов.

	Период полураспада	Стартовый		А, Ки	МЭД, Зв/ч		
Излучатель		масса, г	состав	(конец облучения)	поверхность	1м от поверхности	
Cr-51	27.7 сут	3015	97% Cr-50	3.20E+06	1.8E-02	4.3E-04	
Fe-59	44.5 сут	1	железо п.и.с	0.22	9.7E-03	5.2E-05	
Co-60	5.27 лет	1	Co-59	83	8.9	4.7E-02	
Cu-64	12.7 часа	1	Си п.и.с	260	0.11	6.1E-04	
Zn-65	244 сут	1	Zn п.и.c	6.4	0.11	6.4E-04	
Mo-99	2.7 сут	1	Мо п.и.с	27	0.10	5.9E-04	
Sc-46	83.8 сут	1	Sc-45	1100	55	0.31	
Sb-122	2.7238 сут	1	Sb п.и.с	1450	2.2	1.2E-02	
Sb-124	60.2 сут	1	Sb п.и.с	330	23	1.3E-01	
Ag - 110m	249.76 сут	1	Ад п.и.с	60	3.3	1.8E-02	
As-76	1.0778 сут	1	As-75	1400	9.3	4.9E-02	
W-187	23.72 часа	1	W п.и.с	980	1.8	9.8E-03	
La-140	1.6781 сут	1	La п.и.c	380	39	2.1E-01	

Таблица 3.2.2.5 - Расчётные активности компонентов хромовой мишени

Расчет проводился в предположении, что в стартовом составе мишени, содержащей 3015 г 97% Сг-50, присутствуют «критические» элементы-излучатели в количестве 1 г каждый. В Таблице 5 представлены периоды полураспада радиоактивных изотопов, их стартовый состав, рассчитанная активность после облучения в течение 59 эффективных суток в центральной нейтронной ловушке реактора (плотность нейтронного потока - 5.0×10^{14} нейтронов/см² с), а также минимальная эффективная доза (МЭД) на поверхности и на расстоянии 1 м от источника после облучения.

Для определения максимально допустимой концентрации критичных примесей предполагалось, что допустимая доза на расстоянии 1 м от источника составляет 10 мкЗв/час.

В Таблице 6 представлены значения МЭД на расстоянии 1 м от поверхности при содержании в мишени 1 грамма излучателя, а также количество излучателя, содержащегося в мишени, при котором на расстоянии 1 м от поверхности МЭД будет составлять 10 мкЗв/час и соответствующая этому значению концентрация примесей.

Излучатель	МЭД, Зв/ч 1м от поверхности	Содержание, г	Концентрация, ррт	
Fe-59	5,20E-05	1,92E-02	63,8	
Co-60	4,70E-02	2,13E-05	0,071	
Cu-64	6,10E-04	1,64E-03	5,44	
Zn-65	6,40E-04	1,56E-03	5,18	
Mo-99	5,90E-04	1,69E-03	5,62	
Sc-46	3,10E-01	3,23E-06	0,011	
Sb-122	1,20E-02	8,33E-05	0,276	
Sb-124	1,30E-01	7,69E-06	0,026	
Ag-110m	1,81E-02	5,52E-05	0,183	
As-76	4,90E-02	2,04E-05	0,068	
W-187	9,80E-03	1,02E-04	0,338	
La-140	2,10E-01	4,76E-06	0,016	

Таблица 3.2.2.6 - Максимально допустимая концентрация критичных примесей в хромовой мишени.

3.2.2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения НИР по теме «Эксперимент с искусственным источником нейтрино на основе радионуклида ⁵¹Cr активностью 3 МКи» разработана методика и создана технология изготовления компактного источника нейтрино на основе радионуклида ⁵¹Cr активностью 3 МКи для выполнения эксперимента по исследованию нестандартных свойств нейтрино.

Разработана технология изготовления облучательной мишени из обогащенного хрома для создания искусственного источника нейтрино хром-51, разработана технология электролитического восстановления обогащенного хрома, разработана методика изготовления хромовых мишеней из остатков обогащенного хрома, полученных на предыдущих технологических стадиях, разработана конструкция компактного источника нейтрино с хромовой мишенью оптимальной конструкции.
3.2.2 ПУБЛИКАЦИИ

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

2. V.N. Gavrin, Yu.P. Kozlova, E.P. Veretenkin, A.V. Logachev, A.I. Logacheva, I.S. Lednev, A.A. Okun'kova. Reactor target from metal chromium for "pure" high-intensive artificial neutrino source, *to be published* in Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei. N<u>o</u>2. (2016).

3. Yury Malyshkin, Bruce Cleveland, Sergei Danshin, Vladimir Gavrin, Valery Gorbachev, Tatiana Ibragimova, Anatoly Kalikhov, Jeff Nico, Alexander Shikhin, Evgeny Veretenkin, Steven Elliott, Hamish Robertson, David Sinclair, and John Wilkerson. Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST). NuFact15, Rio de Janeiro, Brazil. August, 2015. https://indico.fnal.gov/contributionListDisplay.py?confId=8903

Число публикаций, индексируемых в базе данных WoS: 1

3.2.2 ПРИЛОЖЕНИЕ

Библиография

- 1. Abazajian K.N., Acero M.A., Agarwalla S.R, et al., Light Sterile Neutrinos: A White Paper, arXiv:1204.5379v1[hep-ph]
- V. Gavrin, B. Cleveland, S. Danshin, S. Elliott, V. Gorbachev, T. Ibragimova, A. Kalikhov, T. Knodel, Yu. Kozlova, Yu. Malyshkin, V. Matveev, I. Mirmov, J. Nico, R.G.H. Robertson, A. Shikhin, D. Sinclair, E. Veretenkin, and J. Wilkerson, Physics of Particles and Nuclei 2015 Vol. 46 No. 2 pp.131-137
- J.N. Abdurashitov, V.N. Gavrin, S.V. Girin, V.V. Gorbachev, T.V. Ibragimova, et.al. (SAGE Collaboration), Phys. Rev. C 1999 v. 59 p. 2246
- Abdurashitov J. N., Gavrin V. N., Girin S. V., et. al. (SAGE Collaboration), Phys. Rev. C 2006 v.73 p. 045805
- 5. Hampel W., Heusser G., Kiko J., et. al., Phys. Lett. B 1998 v. 420 pp.114-126

3.3 Лаборатория Лептонов высоких энергий ОЛВЭНА
3.3.1 Исследование анизотропии и вариаций космических лучей 10¹¹ – 10²⁰ эВ
Научный руководитель темы А.С. Лидванский
Исполнители: Н.С. Хаердинов (БНО),
Т.И. Тулупова (ЛЛВЭ),
М.Н. Хаердинов (ЛЛВЭ),

В.И. Бубенникова (ЛЛВЭ).

3.3.1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проводились дальнейшие исследования вариаций космических лучей во время гроз и сопутствующих эффектов, ранее обнаруженных во время этих исследований на Баксанской нейтринной обсерватории.

 а) За период 2015 проводилась работа по обеспечению регулярного функционирования внешних удалённых наблюдательных пунктов. Вёлся непрерывный визуальный просмотр видеоматериала в сжатом режиме.

б) Развитие экспериментальной базы: 1) Установлены дополнительные видео камеры в удалённых пунктах наблюдения, настроенные на регистрацию в цвете. 2) На установке «Ковёр» организована систематическая регистрация интенсивности мюонов в трёх диапазонах зенитных углов.

в) Развитие в теоретической части: 1) Сформулированы основные принципы существования медленного пробоя атмосферы под действием убегающих электронов. 2) Подтверждена эффективность математического метода выделения слабого свечения области ночного неба в период гроз, развитая в прошлом году.

г) По результатам работ проведено 4 доклада на российской и Международной конференциях. Опубликовано 3 статьи.

Научные результаты:

1. Подтверждено наличие непрерывного свечения ночного неба над грозовыми образованиями, коррелирующее с возмущениями интенсивности энергичных частиц, регистрируемых наземной установкой. Подтверждён так же факт ограничения яркости этого непрерывного свечения высотными разрядами. Цветовая гамма свечения – широкополосная. Амплитуда вариаций максимальна в зелёном цвете.

Результат доложен на Второй Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» (Борок, 5 – 9 октября 2015 г).

2 Зарегистрированы аномальные возмущения мюонной интенсивности с энергией более 100 МэВ, в грозовой период, для разных областей зенитных углов. Наблюдаемый

результат показывает существенную разницу в вариациях, предсказанную ранее теоретически. Оценено влияние окружающих установку гор на формирование возмущений интенсивности мюонов во время гроз.

Результат доложен на конференции "Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA-2015)", October 5-9, 2015.

3.3.1 ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ЗА 2015 ГОД

1. А.С.Лидванский, М.Н.Хаердинов, Н.С.Хаердинов, Характерное электрическое состояние грозовой атмосферы из данных по вариациям космических лучей, Известия РАН, сер. физ., 2015, т. 79, № 5, стр. 736.

2. К.Х. Канониди, А.С.Лидванский, М.Н.Хаердинов, Н.С.Хаердинов, Вариации космических лучей во время гроз и новые геофизические эффекты, Изв. РАН, сер. физ., 2015, т. 79, № 5, стр. 733.

3. К.Х. Канониди, А.Н.Куреня, А.С.Лидванский, М.Н.Хаердинов, Н.С.Хаердинов, Комплексное исследование энергичных процессов в грозовых облаках, Изв. РАН, сер. физ., 2015, , т. 79, № 5, стр. 730.

Доклады на конференциях:

1. A.S. Lidvansky, The Baksan Experiment on Thunderstorm CR Variations: History, Results and Prospects, Intern. Symposium Thunderstorm Elementary Particle Acceleration (TEPA 2015), Nor Amberd, Armenia, October 5-9, 2015, Приглашенный доклад.

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,

3. Н.С. Хаердинов, А. С. Лидванский, М.Н. Хаердинов, Модель медленного пробоя на убегающих электронах в атмосфере и связанные с ним эффекты, Глобальная электрическая цепь, Всероссийская конференция, Борок, 5 – 9 октября 2015 г.

Н.С. Хаердинов, Непрерывное оптическое излучение в атмосфере во время гроз.
 Метод и результаты наблюдений 2013-2015 гг. Глобальная электрическая цепь, Всероссийская конференция, Борок, 5 – 9 октября 2015 г.

3.3.2 Тепловые нейтроны в широких атмосферных ливнях и окружающей среде. Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO

Научный руководитель темы Ю.В. Стенькин Исполнители: Алексеенко В.В. (БНО) Волченко В.И. (БНО) Джаппуев Д.Д. (БНО) Куджаев А.У. (БНО) Михайлова О.И. (БНО) Степанов В.И. (ЛЛВЭ) Лахонин А.А. (студент МИФИ)

3.3.2 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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

В 2015 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 были получены следующие новые данные по изучению вариаций нейтронных фоновых потоков в различных геофизических условиях:

Обнаружено новое явление: спорадические существенные возрастания нейтронного потока в подземном помещении, связанные с продолжительным падением атмосферного давления. Это явление известно в геофизике для подземных газов по англоязычным названием "barometric pumping effect". Этот результат был доложен на Международной конференции TAUP-2015 и подготовлена журнальная статья.

В результате измерения атмосферных нейтронных потоков во время гроз, с целью проверки сообщений о возможной генерации нейтронов молниями, был получен отрицательный результат: ни в одной из гроз как в Москве, так и в горах, за 2011-2015 гг. не было зафиксировано превышения потока тепловых нейтронов над фоновым потоком. Более того, во время самой мощной грозы 20.07.2012 в Москве, когда молния попала в здание, где проводятся измерения, было зафиксировано понижение потока тепловых нейтронов на несколько часов, связанное, как мы полагаем, с большим количеством выпавших осадков. Такое же понижение наблюдалось и на других наших установках, если

гроза сопровождалась обильными осадками после продолжительного сухого периода. По этим результатам опубликованы 2 статьи в журнале Phys. Rev. Letters.

На установке в Тибете на высоте 4300 м были обнаружены сезонные (на уровне 10%) и лунно-месячные вариации (на уровне 2%) природных нейтронных потоков. Показано, что сезонные вариации связаны с сезонным периодом осадков в Тибете: максимум нейтронов наблюдается в сухой период. Подготовленная публикация послана в журнал.

Там же обнаружен отклик нейтронных детекторов на непальское землетрясение (26.04.15). Продолжается анализ этого события и поиск новых.

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

Совместно с ЗАО «Люминофор» разработан новый светосостав ЛРБ-1 (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 4 эн-детектора, площадью по 0.36 кв. м.

Были протестированы фотоумножители Hamamatsu CR-165, с диаметром фотокатода 10 см, китайского производства. Подтверждена их пригодность для использования в эн-детекторах для будущей установки.

Китайской стороной принято решение о финансировании создания полноценного прототипа кластера из 16 эн-детекторов будущей установки PRISMA-LHAASO в Янгбаджинге на высоте 4300 м над уровнем моря. Уже размещены заказы на поставку оборудования и комплектующих. В конце 2016 г. кластер должен быть включен в режим набора данных, не дожидаясь ввода в строй других установок.

Кроме того было принято решение о создании двух компактных установок по 2 эндетектора для изучения фоновых потоков тепловых нейтронов: в Янгбаджинге (в ангаре эксперимента ARGO-YBJ) и в Лхасе (Тибетский университет). Начато их создание. Обе установки должны также заработать в 2016 г.

На установке PRISMA-YBJ проводился непрерывный набор и анализ данных, как но изучению ШАЛ, так и вариаций фоновых потоков тепловых нейтронов. Проведенные монте-карловские расчеты показали хорошее согласие с экспериментом. Показано, что

спектр ШАЛ по числу нейтронов в ПэВной области первичных энергий имеет чисто степенной вид с интегральным показателем спектра близким к –1.95. По этим результатам были подготовлены и посланы в журналы 3 статьи. Были также представлены 4 доклада на международных конференциях: 2 на TAUP-2015 в Турине и 2 на 34й ICRC в Гааге.

Проведен 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 послана в высоко рейтинговый журнал.

В 2015 г. было опубликовано 5 статей в журналах, 2 подготовлены и приняты в печать, 3 статьи посланы в журналы. Подготовлено 4 доклада на Международные конференции и 1 приглашенный доклад на Международный семинар WASDHA-6, организуемый коллаборацией LHAASO.

3.3.2 ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ В 2015 Г.:

1. V. Alekseenko, F. Arneodo, G. Bruno, et al. Decrease of Atmospheric Neutron Counts Observed during Thunderstorms. // Phys. Rev. Lett. 114, 125003 (2015).

ALEKSEENKO, V., ARNEODO, F., BRUNO, G., DI GIOVANNI, A., FULGIONE,
 W., GROMUSHKIN, D., SHCHEGOLEV, O., STENKIN, Y., STEPANOV, V., SULAKOV,
 V. and YASHIN, I., Alekseenko et al. Reply. Physical Review Letters, 115(17), (2015), 179502.

3. Д. М. Громушкин, В. И. Волченко, А. А. Петрухин, Ю. В. Стенькин, В. И. Степанов, О. Б. Щеголев, И. И. Яшин. Новый метод регистрации адронной компоненты ШАЛ. ЯФ, том 78, (2015), 379-382.

4. Д.М. Громушкин, В.И.Волченко и др. Спектр энерговыделений в установке ПРИЗМА-32. Известия РАН, серия Физическая, 2015, Vol. 79, No. 3, pp. 414–416.

5. В.В. Алексеенко, Д.М. Громушкин и др. Вариации нейтронного потока во время гроз. Известия РАН, серия Физическая, (2015), Vol. 79, No. 5, pp. 739–741.

Доклады на конференциях:

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. TAUP-2015, JoP, in press

2. 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. TAUP-2015, JoP, in press.

3. Yuri Stenkin. The PRISMA project and related questions. 6th WASDHA, Chengdu, 2015. Invited talk. http://indico.ihep.ac.cn/event/5179/material/slides/27.pdf

4. Yu.V. Stenkin, V.V. Alekseenko, Z.Y. Cai, Z. Cao, C. Cattaneo, E. Giroletti, S.W. Cui, X.W. Guo, D.M. Gromushkin, H.H. He, Y. Liu, X.H. Ma, O.B. Shchegolev, V.I. Stepanov, A.L. Tsyabuk, P. Vallania, C. Vigorito and J. Zhao. Seasonal thermal neutron flux variations at high altitude. Proc. 34th ICRC, Hague, 2015, PoS(ICRC2015) 343.

5. A.A. Petrukhin, D.M. Gromushkin, O.B. Shchegolev, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, I.I. Yashin. EAS spectrum in thermal neutrons measured with PRISMA-32. Proc. 34th ICRC, Hague, 2015, PoS(ICRC2015) 427.

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 PEΦEPAT

В отчёте приведены результаты научных исследований по теме "Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ" за 2015 год. В 2015 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 в работоспособном состоянии; продолжение непрерывного "Андырчи" 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

Исследования в области фундаментальных исследований, получившей название "космомикрофизика" (в англоязычной литературе – "Astroparticle Physics") проводятся в течение многих лет 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"). Для выполнения исследований необходимо обеспечить режим непрерывного набора информации на комплексе установок, для чего, в свою очередь, необходимо постоянно поддерживать работоспособность установок и проводить их модернизацию.

В течение 2015 года установки комплекса поддерживались в работоспособном состоянии, проводились работы по их модернизации. Поддерживался режим непрерывного набора информации на установках комплекса и проводился мониторинг потоков частиц космического излучения. На БПСТ проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, получено новое ограничение на частоту вспышек с коллапсом ядра в Галактике. Поскольку совместный анализ данных установок, работающих в режиме поиска нейтринных всплесков, позволит проводить поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд с большей чувствительностью и повысить достоверность зарегистрированных нейтринных сигналов, была продолжена работа по совместному анализу данных установок БПСТ и LVD по программе поиска нейтринных всплесков.

4.1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. Полное время работы установки в 2015 году составило 7366 часа (84.1% календарного времени). За отчетный период были отремонтированы делители напряжения и/или формирователи импульсного сигнала на 143 сцинтилляционных счетчиках, произведена замена 166 переменных потенциометров на делителях напряжения. Произведена подстройка коэффициентов усиления и порогов формирователя импульсного сигнала на 352 счетчиках, замена одного ФЭУ и одного контейнера для сцинтиллятора. Проведены контрольные измерения и настройка коэффициентов усиления на 1776 счетчиках (все 4-е горизонтальные плоскости БПСТ). В качестве примера на рисунке 4.1.1 приведено распределение детекторов одной из внутренних плоскостей телескопа по числу срабатываний за один месяц работы (октябрь 2015), стандартное отклонение распределения 3%.



Рисунок 4.1.1 - Распределение детекторов одной из внутренних плоскостей телескопа по числу срабатываний за 1 месяц (октябрь 2015).

Проводились работы по поддержанию работоспособности системы сбора информации БПСТ, в том числе ремонт формирователя триггера годоскопа амплитудных каналов (ГАК) и ремонт входных кассет ГАК, ремонт источника питания КАМАК, поиск и устранение помех в цепи формирования сигналов «Start» многоканальной измерительной системы.

Наглядной иллюстрацией состояния измерительных систем БПСТ является распределение зарегистрированных телескопом мюонов по их измеренной скорости. На рисунок 4.1.2 приведено такое распределение, где по горизонтальной оси отложено отношение скорости света к измеренной скорости мюона, для полного числа событий 182 202 027. Распределение демонстрирует высокое качество временных характеристик счетчиков и систем регистрации БПСТ.



Рисунок 4.1.2 - Распределение числа зарегистрированных БПСТ мюонов по отношение скорости света к измеренной скорости мюона.

Продолжался набор экспериментальных данных по программе регистрации мюоннных нейтрино из нижней полусферы. В 2015 году чистое время регистрации по нейтринной программе составило 7366 часа (84.1% календарного времени). За 2015 год выделено 42 кандидата в нейтринные события.

2. По информации БПСТ за 2015 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд. БПСТ состоит из 8 плоскостей, на которых расположены 3184 сцинтилляционных счетчика. Каждый счетчик имеет размеры 0.7*0.7*0.3 м3 и заполнен жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита (CnH2n+2, n \approx 9), порог срабатывания счётчика 8 МэВ. В качестве мишени используются 3 нижние горизонтальные плоскости БПСТ, которые содержат 1200 счетчиков (по 400 на каждой плоскости) общей массой 130 тонн. Фоновый темп счета событий, когда срабатывает только один счетчик на установке

("1 из 3200"), на этих плоскостях равен 0.02 с-1. Метод регистрации нейтринного излучения основан на регистрации антинейтрино в реакции обратного бета-распада:

$$\overline{V}_e + p \to n + e^+ \tag{1}$$

Т.к. средняя энергия позитрона ≈ 15 МэВ, то реакция (1), как правило, будет приводить к срабатыванию только одного счетчика 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 2015 год составляет 286.12 суток (78.4 % календарного времени). Претендентов на кластер нейтринных сигналов от коллапсирующих звёзд не обнаружено. Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2015 года составляет 30.37 года. Верхняя граница на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике равна 0.076 в год на 90% доверительном уровне.

3. По программе поиска нейтринных всплесков проведён совместный анализ данных БПСТ и LVD по информации за 2012 – 2014 годы. Анализ полученных распределений по кратности кластера на БПСТ и LVD указывает на то, что зарегистрированные кластеры событий являются фоновыми. Представленный анализ данных двух и более установок может быть особенно полезным в случаях, когда оптическая вспышка Сверхновой по каким-либо причинам не видна.

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 проводилась настройка и ремонт детекторов и регистрирующей электроники. Чистое время набора информации составляет 96.9 % календарного времени для задачи регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ; 95%– для задачи регистрации мюонной компоненты ШАЛ на мюонном детекторе (МД); 98% для регистрации вторичной нейтронной компоненты на нейтронном мониторе (НМ). На рисунок 4.1.3 приведена зависимость от времени среднесуточного значения числа ливней, зарегистрированных установкой в течение 20 минут.



Рисунок 4.1.3 - Среднесуточные значения числа ШАЛ (за 20-минутный интервал) в 2015 году.

5. В 2015 году продолжались работы по созданию установки "Ковер-3", предназначенной для изучения спектра и состава ПКИ в области первичных энергий 50 ТэВ – 10⁴ ТэВ. Разрабатывались и изготавливались электронные блоки системы сбора данных мюонного детектора, проводилась настройка электронных узлов сцинтилляционных счетчиков МД.

1) Разработана конструкция узлов приемного блока число-импульсных сигналов логарифмических преобразователей LCN-1 для мюонного детектора на основе стандарта «Вишня». Изготовлено два крейта, содержащих 205 приемных каналов для каждого тоннеля мюонного детектора. Общее число каналов – 410.

2) Разработана принципиальная электрическая схема приемных каналов для числоимпульсных сигналов логарифмических преобразователей LCN-1. Разработана печатная плата для приемного блока этих сигналов. Печатные платы в количестве 14 шт., рассчитанные на 410 приемных каналов, изготовлены в производственных условиях и находятся на стадии распайки компонентов. На рисунок 4.1.4 приведен упрощенный фрагмент принципиальной схемы приемных каналов.



Рисунок 4.1.4 - Фрагмент принципиальной схемы приемных каналов сигналов логарифмических преобразователей LCN-1.

В данном устройстве сигналы, поступающие в стандарте NIM от логарифмических преобразователей, преобразуются в TTL стандарт, и передаются в многоканальные счетчики импульсов после прохождения схем совпадений. Схемы совпадений открываются одновременно во всех каналах по приходу импульса ливневого «мастера» ≥ 10 из 205 на время ~ 75 мкс, необходимое для прохождения сигналов максимальной длительности от преобразователя LCN-1.

3) Для каждого крейта, состоящего из 205 приемных каналов, регистрирующих сигналы преобразователей LCN-1, разработана схема отладочного устройства. Разработана и изготовлена в двух экземплярах печатная плата отладочного устройства. Отладочное устройство предназначено для спектрометрических измерений, настройки порогов формирователей SKF-1 и LCN-1, а также для формирования временных ворот при прохождении сигналов LCN-преобразователей через соответствующую схему совпадений в приемном блоке.

Функциональная схема отладочного устройства приведена на рисунок 4.1.5. Отладочное устройство содержит усилитель-интегратор анодных сигналов ФЭУ, аналоговую линию задержки импульсов на 1.0 мкс, необходимую для нормальной работы в режиме настройки SKF-1 и в режиме настройки LCN-1, линейный пропускатель, который обеспечивает формирование временных ворот с устройством самоблокировки на время действия пакета импульсов от LCN-1. Устройство формирует также временные ворота длительностью 75 мкс для одновременного открывания схем совпадения всех 205 каналов (в каждом тоннеле отдельно) по сигналу ливневого мастера ≥ 10 из 205.



Рисунок 4.1.5 - Функциональная схема отладочного устройства.

4) Разработано и изготовлено 2 экз. формирователя мастера "≥ 10 из 205", отдельно для каждого тоннеля МД. В настоящее время с помощью отладочного устройства проводятся работы по проверке работоспособности сцинтилляционных счетчиков совместно с электронными узлами LCN-1 и SKF-1.

6. Продолжалась работа по модернизации системы регистрации ливневой установки "Андырчи". Разработана и изготовлена плата согласования анодных сигналов детекторов установки, рассчитанных на нагрузку 50 Ом, с адаптерами А992 входного разъема QDC V792AC, рассчитанных на нагрузку 100 Ом.

4.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В течение 2015 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. Был продолжен совместный анализ данных двух установок ИЯИ РАН – БПСТ и LVD – по программе поиска нейтринных всплесков.

4.1 ПУБЛИКАЦИИ.

1. Джаппуев Д.Д., Петков В.Б., Куджаев А.У., Балабин Ю.В., Волченко В.И., Волченко Г.В., Вашенюк Э.В., Дзапарова И.М., Янин А.Ф., Гвоздевский Б.Б., Гришкан В.Ю., Клименко Н.Ф., Куреня А.Н., Лидванский А.С., Михайлова О.И., Хаджиев М.М. Установка "КОВЕР-3" для изучения области излома в спектре ПКЛ. Известия РАН, сер. физ., т. 79, № 3, стр. 395, 2015.

2. 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. Search for Low-Energy Neutrinos from Gamma-Ray Bursts at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Physics of Particles and Nuclei, Vol. 46, No. 2, pp. 197, 2015.

3. V.B. Petkov, M.M. Boliev, I.A. Alikhanov, A.V. Butkevich, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, R.V. Novoseltseva, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, and A. F. Yanin. The Search for High Energy Muon Neutrinos from Southern Hemisphere Gamma-Ray Bursts with BUST. Physics of Particles and Nuclei, Vol. 46, No. 2, pp. 201, 2015.

4. V.B. Petkov. Experimental Search for Evaporating Primordial Black Holes. Physics of Particles and Nuclei, Vol. 46, No. 2, pp. 205, 2015.

5. Г.М. Верешков, В.Б. Петков. Поиск сверхкоротких всплесков гамма-излучения от испаряющихся первичных черных дыр. Письма в ЖЭТФ, том 101, вып. 3, с. 160, 2015.

6. Агафонова Н.Ю., Ашихмин В.В., Болиев М.М., Волченко В.В., Волченко Г.В., Дадыкин В.Л., Дзапарова И.М., Добрынина Е.А., Еникеев Р.И., Кочкаров М.М., Новосельцев Ю.Ф., Новосельцева Р.В., Мальгин А.С., Петков В.Б., Ряжская О.Г., Шакирьянова И.Р., Якушев В.Ф., Янин А.Ф. Совместный анализ экспериментальных данных по поиску нейтрино от звездных коллапсов на детекторах LVD и БПСТ. Известия РАН, сер. физ., т. 79, № 3, стр. 442, 2015.

7. А.Ф. Янин, И.М. Дзапарова, М.М. Болиев, Р. В. Новосельцева. Статистический измеритель порогов дискриминаторов-формирователей сцинтилляционных детекторов. ПТЭ, № 2, с. 67, 2015.

8. V.B. Petkov. Prospects of the search for neutrino bursts from Supernovae with Baksan Large Volume Scintillation Detector. arXiv:1508.01389.

9. 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. arXiv:1511.09397.

10. I.M. Dzaparova, A.M. Gangapshev, Yu.M. Gavrilyuk, 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. arXiv:1512.05939.

4.2 Лаборатория низкофоновых исследований

Заведующий ЛНФИ кфмн А.М. Гангапшев

4.2.1 Участие в международном эксперименте GERDA по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа ⁷⁶Ge (головной исполнитель Безруков Л.Б.): Идет подготовка второй фазы эксперимента.

4.2.1 ПУБЛИКАЦИИ

 M. Agostini, M. Allardt, E. Andreotti et al., "LArGe – Active background suppression using argon scintillation for the GERDA 0vββ-experiment", arXiv:1501.05762v1 [physics.ins-det].

• M. Agostini, M. Allardt, A.M. Bakalyarov et al., "Results on ββ-decay with emission of two neutrinos or Majorons in Ge-76 from GERDA Phase I", arXiv:1501.02345v1 [nucl-ex].

• M. Agostini, M. Allardt, E. Andreotti et al., "Production, characterization and operation of Ge-76 enriched BEGe detectors in GERDA", Eur. Phys. J. C (2015) 75:39

• M. Agostini, M. Allardt, A.M. Bakalyarov et al., "Improvement of the Energy Resolution via an Optimized Digital Signal Processing in GERDA Phase I", Eur. Phys. J. C (2015) 75:255

• M. Agostini, M. Allardt, A.M. Bakalyarov et al., "2νββ decay of Ge-76 into excited states with GERDA Phase I", arXiv:submit/1275980 [hep-ex].

M. Agostini, B. Bernabe-Heider, D. Budjas et al., «LArGe: active background suppression using argon scintillation for the Gerda 0vββ-experiment», Eur. Phys. J. C (2015) 75:506,

• M. Agostini, M. Allardt, A.M. Bakalyarov et al., "Results on ββ decay with emission of two neutrinos or Majorons in 76Ge from GERDA Phase I: GERDA collaboration", Eur. Phys. J. C (2015) 75:416

• M. Agostini, M. Allardt, A.M. Bakalyarov et al., " $2\nu\beta\beta$ decay of Ge-76 into excited states with GERDA phase I", Journal of Physics G (2015) v. 42, No 11:115201

4.2.2 Новый этап эксперимента по поиску 2К-захвата в ⁷⁸Кг и ¹²⁴Хе с помощью пропорциональных счетчиков

Была произведена модернизация экспериментальной установки в части электроники. В результате уменьшен уровень шумов в сигналах от детектора, что улучшает качество отьбора полезных событий из общей статистики. Улучшено энергетическое разрешение детектора в ~2раза в области интереса. Начат новый этап

измерений. По результатам измерений предыдущего этапа за 3220 часов получен предел на период полураспада Xe-124 относительно 2K-захвата на уровне T_{1/2}≥ 2.0*10²¹лет.

4.2.2 ПУБЛИКАЦИИ

1. Yu. M. Gavrilyuk et al., «First Result of the Experimental Search for the 2K-Capture of Xe-124 with the Copper Proportional Counter», Physics of Particles and Nuclei (2015) 46 (2), p. 147. DOI: 10.1134/S1063779615020082

2. Y.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov et al., «First result of the experimental search for the 2K-capture of 124Xe with the copper proportional counter», Physics of Particles and Nuclei, 2015, v. 46, No 2, 147-151pp

3. Y.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov et al., «The origin of the background radioactive isotope Xe-127 in the sample of Xe enriched in Xe-124», arXiv:1507.04181v1 [nucl-ex]

4. Y.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov et al., «Search for 2K(2v)capture of Xe-124», arXiv:1507.04520v1 [nucl-ex].

Доклады:

1. «First results of the experimental search for the 2K-capture of 124Xe with the copper proportional counter» на конференции "The International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics", February 1 - Ferbuary 8, 2015, Valday, Russia.

2. Текуева Д.А. и др. (БНО ИЯИ РАН) "Методика поиска 2К-захвата Хе-124 с помощью медного пропорционального счетчика", Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" г. Москва, 17-21 ноября 2014г., http://www.icssnp.mephi.ru/

3. V. Kazalov et al., "The origin of the background radioactive isotope Xe-127 in the enriched Xe-124", The International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics" February 1 - Ferbuary 8, 2015, Valday, Russia, http://www.inr.ac.ru/~school/program.php

4.2.3 Создание воздушной ионной камеры высокого давления (ИКВД) для измерения содержания ²²²Rn в подземных условиях Продолжается доукомплектация радоновых мониторов:

Микроконтроллеры-компьютеры для управления оборудованием и узлами мониторов, блоки питания электроники, экраны, клавиатуры и т.д.). Был выполнен тестовый запуск одного монитора с использованием лабораторного оборудования. По результатам измерений получено, что энергетическое разрешение ионной камеры существенно лучше чем у обычнвх ионизационных камер и пропорциональных счетчиков. Для альфа-частиц с энергией 4.2.49МэВ (Rn-222) было достигнуто разрешение на уровне 1.6%. Это позволило качественно разделить альфа-пики 4.2.3МэВ (Po-210), 4.2.49МэВ (Rn-222), 6.00МэВ (Po-218) и 7.69МэВ (Po-214).

4.2.3 ПУБЛИКАЦИЯ

Y.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev et al., «High-resolution ion pulse ionization chamber with air filling for the Rn-222 decays detection», arXiv:1508.04295v1 [physics.ins-ex]

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

Измерений продолжается, набрана статистика за ~3,5 года измерений. Измерена годовая модуляция потока тепловых нейтронов в лаборатории НЛГЗ-4900. С учетом собственного фона детекторов, относительная амплитуда модуляции превышает уровень в 5%. Получена строгая корреляция между темпом счета детекторов и влажностью воздуха в подземной лаборатории. При быстром изменении вланости в помещении, темп счета детекторов выходит на соответствующий уровень постепенно в течение ~1 недели. Это можно объяснить постепенным увлажнением (высыханием) приповерхностного слоя горной породы окружающей помещение (влага проникает внутрь через щели и трещины). Вода в этом случае может работать как модератор нейтронов, более эффективный чем порода, увеличивая таким образом долю тепловых нейтронов в общем потоке.

4.2.4 ПУБЛИКАЦИИ

- V.V. Alexeenko, Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, et al., «The study of the thermal neutron flux in the deep underground laboratory DULB-4900», arXiv:1507.05488v1 [nucl-ex].
- V.V. Alexeenko, I.R. Barabanov, R.A. Etezov et al., «Results of measurements of an environment neutron background at BNO INR RAS objects with the helium proportional counter», arXiv:1510.05109v1 [physics.ins-ex].
- V.V. Alexeenko, I.R. Barabanov, R.A. Etezov et al., «Characteristics of a thermal neutrons scintillation detector with the [ZnS(Ag)+⁶LiF] at different conditions of measurements», arXiv:1510.09002v1 [physics.ins-ex].

Доклад:

«The study of the thermal neutron flux in the deep underground laboratory DULB-4900» на конференции "The International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics", February 1 - Ferbuary 8, 2015, Valday, Russia.

4.2.5 Участие в международном эксперименте AMORE по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа ¹⁰⁰Мо

Проведены измерения радиационной чистоты семи различных образцов сырья для поизводства кристаллов CaMoO4 и конструкционных материалов. Среди них: карбонат кальция, оксид молибдена, шихта (CaMoO4), гигель для выращивания кристаллов, оксид обогащенного по изотопу Mo-100 до 95% молибдена.

4.2.5 ПУБЛИКАЦИЯ

V. Alenkov, P. Aryal, J. Beyer et al., «Technical Design Report for the AMoRE 0vββ Decay Search Experiment», arXiv:1512.05957v1 [physics.ins-ex]

4.2.6 Экспериментальная проверка стабильности периода полураспада альфа-активного ядра ²¹⁴Ро:

Продолжаются измерения на установка ТАУ1 и ТАУ2. Обработаны результаты непрерывных измерений периода полураспада ²¹⁴Ро (τ) на установках ТАУ-1 и ТАУ-2 за 590 дней. В ряду значений τ обнаружены годовая вариация с амплитудой A=(8.9±2.3)·10⁻⁴, солнечно-суточная вариация с амплитудой A_C=(7.5±1.2)·10⁻⁴, лунно-суточная вариация с амплитудой A_T=(6.9±2.0)·10⁻⁴ и звёздно-суточная вариация с амплитудой A₃=(7.2±1.2)·10⁻⁴. Максимумы амплитуды наблюдаются в моменты достижения максимального значения проекцией вектора скорости точки поверхности Земли с установкой на направление к исследуемому источнику возможных вариаций. Усреднённое за 590 дней значение периода полураспада ²¹⁴Ро составило величину $\tau = 163.46\pm0.04$ мкс.

Изготовлен источник Th-229 активностью 40Бк (Bi-213, Po-213) для установки TAV3, для измерения стабильности периода полураспада изотопа Po-213 (т=4.2µs).

В третьем квартале завершена подготовка установки ТАУ-3, состоящей из сцинтилляционного детектора Д1, склеенного из двух дисков пластмассового сцинтиллятора d=18 мм, h=1 мм. Между дисками размещён источник Th-229, осаждённый из раствора на поверхность лавсановой плёнки h=2.5 мкм и накрытый такой же плёнкой, наклеенной с помощью эпоксидной смолы. Детектор размещён в защите 15 см Pb в зазоре 1 см между двумя сцинтилляционными детекторами NaI(Tl) 150·150 мм (Д2) в низкофоновом боксе подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900. Скомпонована

тестовая регистрирующая установка в составе цифрового осциллографа ЛА-н10-12 РСІ, встроенного в ПК. ПК в "on-line" режиме регистрирует полную форму импульсов с Д1 и Д2. В результате обработки записанных осциллограмм определяются задержки между импульсами и за выбранный временной интервал выстраивается распадная кривая дочернего изотопа Ро-213 (Т1/2=4.2 мкс). По этой кривой определяется константа распада. Строится последовательный временной ряд значений этой величины. Начаты непрерывные измерения на установке ТАУ-3. Набрана и обработана статистика за 60 дней. В результате обработки временного ряда за июль-август 2015 года обнаружена солнечная суточная вариация константы распада с усреднённой амплитудой $A_{C} = (1.6 \pm 0.9) \cdot 10^{-3}$.

4.2.6 ПУБЛИКАЦИИ

1. Yu. M. Gavrilyuk et al., «Sources of the Systematic Errors in Measurements of 214Po Decay HalfLife Time Variations at the Baksan Deep Underground Experiments», Physics of Particles and Nuclei (2015) 46 (2), p. 157. DOI: 10.1134/S1063779615020021

2. E.N. Alexeyev, Yu. M. Gavrilyuk, A. M. Gangapshev, et al., "Sources of the systematic errors in measurements of Po-214 decay half-life time variations at the Baksan deep underground experiments", Physics of Particles and Nuclei, 2015, v. 46, No 2, 157-162pp.

3. E.N. Alexeyev, Yu. M. Gavrilyuk, A. M. Gangapshev, et al., "Results of a search for daily and annual variations of the Po-214 half-life at the two year observation period", arXiv:1504.2.01752v1 [nucl-ex]

Доклад:

«Sources of the Systematic Errors in Measurements of 214Po Decay HalfLife Time Variations at the Baksan Deep Underground Experiments» на конференции "The International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics", February 1 - Ferbuary 8, 2015, Valday, Russia.

4.2.7 Исследование содержания изотопа ¹⁴С в жидких органических сцинтилляторах (головной исполнитель Безруков Л.Б.)

4.2.7 ПУБЛИКАЦИЯ

И.Р.Барабанов, Л.Б.Безруков, А.В.Вересникова, Ю.М.Гаврилюк, А.М.Гангапшев, В.И.Гуренцов, В,Ю.Гришина, В.П.Заварзина, В.В.Казалов, С.Д.Крохалёва, В.В.Кузьминов, А.С.Курлович, Б.К.Лубсандоржиев, С.Б.Лубсандоржиев, В.П.Моргалюк, Г.Я.Новикова, А.М.Пшуков, В.В.Синёв, Ш.И.Умеров, Е.А.Янович, Т.Энквист, П.Куусиниеми, Й.Ютсенвара, А.Виркайари. Измерение содержания¹⁴С в жидких сцинтилляторах с помощью детектора малого объёма в низкофоновой камере в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Препринт ИЯИ РАН 1414/2014.2. Ноябрь 2014.2. 15с.

4.2.8 Поиск солнечных адронных аксионов:

Измерения с природным образцом криптона завершены. Получен лучший в мире предел на массу адронного аксиона на уровне 100эВ. Сформирован образец криптона обогащенного по изотопу Kr-83 до 99.9% объемом ~20л. Начаты измерения с обогащенным образцом. По предварительным данным фон от K-захвата Kr-81 в образце снижен более чем в 1000 раз по сравнению с природным. Ожидаемая чувствиетльность установки оценена на уровне 75эВ по массе адронного аксиона за один год измерений.

4.2.8 ПУБЛИКАЦИИ

1. A.V. Derbin, Yu. M. Gavrilyuk, A. M. Gangapshev et al., "New limit on the mass of 9.4-keV solar axions emitted in an M1 transition in Kr-83 nuclei", arXiv:1501.02944v1 [hep-ex].

2. Yu. M. Gavrilyuk, A. M. Gangapshev, A. V. Derbin et al., "First result of the experimental search for the 9.4 keV solar axion reactions with Kr-83 in the copper proportional counter", Physics of Particles and Nuclei, 2015, v. 46, No 2, 152-156pp.

3. Yu. M. Gavrilyuk, A. M. Gangapshev, A. V. Derbin et al., "New Experiment on Search for the Resonance Absorption of Solar Axion Emitted in the M1 Transition of Kr-83 Nuclei", JETP LETTERS V. 101, NO. 10 (2015), 664-669PP.

5 Отдел экспериментальной физики. Проблема геофизических нейтрино. Обоснование создания большого сцинтилляционного детектора в БНО 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

Обсуждается возможность создания многоцелевого сцинтилляционного детектора большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Важнейшей компонентой такого детектора является жидкий сцинтиллятор, заполняющий мишень.

В низкофоновой лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, расположенной на глубине 4900 м.в.э., создана установка для измерения ультранизких концентраций изотопа ¹⁴C в образцах жидкого органического сцинтиллятора. Проведены измерения концентрации радиоуглерода ¹⁴C в образце сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола. Двумя методами анализа были получены результаты, совпадающие в пределах экспериментальной погрешности, усредненный результат (3.3 ± 1.1) × 10⁻¹⁷ (¹⁴C/¹²C).

5 ВВЕДЕНИЕ

В последнее время активно обсуждается ряд проектов по созданию больших сцинтилляционных жидкостных детекторов для регистрации крайне редких событий, в нейтринных различных природных источников частности потоков ОТ [1-4]. Фундаментальной задачей является измерение потоков антинейтрино от распадов ²³⁸U, ²³²Th и ⁴⁰K, 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, в работе [4] рассматривается возможность регистрации нейтрино от Солнца, образующихся в реакциях захвата протонов ядрами С, 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.

В настоящее время в ИЯИ РАН ведутся исследования, связанные с разработкой проекта по созданию большого сцинтилляционного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) [3]. Предполагаемая масса детектора ~10-30 кт. Географические особенности расположения обсерватории позволят существенно подавить фон, связанный

с потоками антинейтрино от работающих реакторов АЭС и в то же время зарегистрировать потоки антинейтрино, несущие информацию о строении земной коры в данном регионе.

Регистрация редких событий сцинтилляционным детектором предъявляет исключительно высокие требования как к внешнему, так и внутреннему фону установки. Внутренний фон детектора главным образом определяется содержанием примесей радиоактивных элементов в жидком органическом сцинтилляторе (ЖОС). Так, в эксперименте Borexino (лаборатория Гран-Сассо, Италия), благодаря достигнутому очень низкому радиоактивному фону удалось впервые зарегистрировать потоки солнечных ⁷Ве, рер нейтрино [5], а в последнее время при использовании детального анализа спектра фона был получен поток солнечных *рр*-нейтрино. Трудность в измерении потока *рр*нейтрино и его спектра с помощью детектора на основе жидкого органического сцинтиллятора во многом связана с радиоактивностью изотопа ¹⁴С, присутствующего в молекулах углеводородов нефтяного происхождения. Максимальная энергия электрона отдачи от рассеяния *pp*-нейтрино ($E_{\text{max}} = 420$ кэВ) в сцинтилляторе составляет 264 кэВ. Максимальная энергия β -распада ¹⁴C – 156.48 кэB, но с учетом конечного энергетического разрешения (~ 10% в области 200 кэВ) и эффекта наложения импульсов от этого источника возможно появление событий с энергией более 200 кэВ. При этом надо отметить, что сцинтиллятор детектора Borexino имеет минимальное содержание изотопа ¹⁴С, по сравнению с измерениями в других сцинтилляторах. Эта величина для него составляет (2.69±0.06)×10⁻¹⁸ (¹⁴C/¹²C) [5]. Расчеты, основанные на возрасте нефти, из которой был приготовлен сцинтиллятор (псевдокумол), с учетом глубины залегания и содержания радиоактивных элементов в окружающих породах, дают для основных ядерных реакций, приводящих к образованию 14 С, предел на уровне 14 С/ 12 С < 10⁻²¹ [6]. Наблюдаемое расхождение измеренных концентраций изотопа ¹⁴С в сцинтилляторах (Borexino, KamLAND) и расчетных значений может быть вызвано, как технологическими факторами переработки нефти, так и более фундаментальной проблемой, связанной с условиями образования нефтяных месторождений. В статье [7], где отмечается высокое требование к радиоактивной чистоте метана для использования в TPC (Time Projection Chamber), рассматриваются различные факторы и механизмы, влияющие на колебания концентраций ¹⁴С в нефтяных и газовых подземных источниках.

В работе [8] была измерена концентрация ¹⁴С в органическом сцинтилляторе на основе РХЕ с помощью детектора объемом 1.5 литра. Разработка и создание низкофонового детектора небольшого объема открывает возможности для систематических исследований изотопа ¹⁴С в различных образцах жидкого органического

сцинтиллятора, позволяет провести анализ широкого круга факторов, определяющих его содержание, и в перспективе создать сцинтиллятор с пониженным содержанием ¹⁴C.

Измерить радиогенную составляющую теплового потока можно, определив количество радиоактивных изотопов во всех слоях Земли. Радиоактивные элементы распадаются, испуская альфа-частицы и бета-частицы с антинейтрино. Электроны (бета-частицы) вместе с альфа-частицами нагревают Землю, а антинейтрино проходят сквозь Землю и улетают в окружающий космос.

Нейтринное излучение может быть зарегистрировано сцинтилляционным детектором вблизи поверхности Земли. Таким образом, можно измерить суммарный нейтринный поток, исходящий из земных недр от всех радиоактивных ядер и рассчитать суммарный тепловой поток. Кроме того такой детектор позволит определить соотношение содержания урана и тория во всей Земле и сравнить его с аналогичным отношением этих изотопов в коре и метеоритах. Такое измерение может прояснить ситуацию с теорией образования Земли.

5.1 Спектры антинейтрино ²³⁸U, ²³²Th и ⁴⁰К

Антинейтрино от 238 U и 232 Th происходят из нескольких распадов в цепочке, 4 у 232 Th и 6 у 238 U. Энергетический спектр антинейтрино 238 U достигает 3.26 MэB, а 232 Th – 2.25 MэB, причем ниже 2.25 МэB форма спектра урана и тория примерно одинакова (см. рисунок 5.1).

 40 К имеет как антинейтрино в своем распаде, так и нейтрино. Антинейтрино образуется в 89.28% случаев при распаде 40 К в 40 Са, образуя спектр с граничной энергией 1.311 МэВ. Нейтрино же образуется в результате К-захвата и переходе 40 К в 40 Аг. С вероятностью 10.67% излучается моноэнергетическое нейтрино 44 кэВ, а с вероятностью 0.05% - моноэнергетическое нейтрино с энергией 1.504 МэВ.



Рисунок 5.1 - Спектры антинейтрино, производимые радиоактивными элементами. Вертикальная красная линия показывает порог регистрации реакции (1).

Для регистрации антинейтринного излучения можно использовать реакцию обратного бета-распада на протоне

$$\overline{V}_e + p \to n + e^+ , \qquad (1)$$

у которой порог регистрации 1.806 МэВ. Таким образом, этим способом можно зарегистрировать только антинейтрино от 232 Th и 238 U. Для регистрации антинейтрино от 40 K необходимо использовать реакцию рассеяния нейтрино на электроне

$$\overline{\nu_e} + e^- \to \overline{\nu'_e} + e^{-\prime}.$$
 (2)

у которой нет порога регистрации, точнее он определяется уровнем фонов детектора.

Сечение реакции (2) дается выражением

$$\frac{d\sigma^{w}}{dT} = \frac{g_F^2}{\pi} m \left[(1+2x^2)^2 (1-\frac{T}{E})^2 + 4x^2 - 2x^2 (1+2x^2) \frac{mT}{E^2} \right]$$
(3),

где Е и Т – энергия антинейтрино и кинетическая энергия электронов отдачи, $g_F^2 \frac{m}{\pi} = 4.308 \times 10^{-45} \text{ cm}^2, \ x^2 = \sin^2 \theta_W = 0.232.$

5.2 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. Рассчитанная скорость счета геонейтрино для различных мест расположения детектора показана в табл. 1. Расчет проводился для модели расположения радиоактивных элементов в коре и мантии.

Таблица 5.1 - Ожидаемые скорости счета N_{geo} реакции $\overline{v}_e + p \rightarrow e + + n$ в разных точках Земли в суммарном потоке \overline{v}_e от распадов U и Th (с учетом осцилляций) в единицах TNU (1 TNU = 1 событие в год в мишени, содержащей 1032 протонов). Отношение R скорости счета фона реакторных антинейтрино Nreactor к скорости счета событий геонейтрино Ngeo в диапазоне энергий геонейтрино. Приведена глубина расположения детектора.

Местоположение	Глубина м в.э.	Скорость счета <i>N_{geo}</i> , TNU			N _{reactor}
		Enomoto, 2005	Fogli, 2005	Manto- vani, 2004	N _{geo}
Hawaii (CIIIA)	~ 4000	13.4	13.4	12.5	0.1
Kamioka (Япония)	2700	36.5	31.6	34.8	6.7
Gran Sasso (Италия)	3700	43.1	40.5	40.5	0.9
Sudbury (Канада)	6000	50.4	47.9	49.6	1.1
Pyhäsalmy (Финляндия)	4000	52.4	49.9	52.4	0.5
Baksan (Россия)	4800	55.0	50.7	51.9	0.2

Из таблицы 5.1 видно, что при скорости счета примерно 50 соб./год на килотонну сцинтиллятора, необходимо иметь массу детектора не менее 10 кт для уверенной регистрации геонейтрино от урана и тория. Для того, чтобы определить соотношение Th/U с точностью 20% в среднем по планете необходимая масса детектора увеличивается до 50 кт, но с учетом эксплуатации минимум в 10 лет масса может быть уменьшена до 25 кт.

Поток геонейтрино от 238U и 232Th был недавно зарегистрирован двумя сцинтилляционными детекторами большого объема KamLAND (1000 т) [9] и BOREXINO (300 т) [10]. Полученный поток не противоречит минимальному содержанию этих изотопов в Земле, следующему из Bulk Silicate Earth, но и не закрывает окончательно другие гипотезы с гораздо большим содержанием 238U и 232Th [3, 4]. Погрешность измерения составляет около 25%. Мощность геореактора из этих измерений ограничивается 4.5 ТВт.

Новый детектор, как было показано в [5], для определения с достаточной точностью соотношения Th/U в Земле необходимо 25 кт лет. То есть это может быть детектор 5 кт, который будет активен в течении 5-10 лет или 10 кт со временем измерения от 2.5 лет до пяти и т.д.

5.3 Проблема ¹⁴С 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 ¹⁴С (граничная энергия бета-спектра 156.48 кэВ, а граничная энергия нейтринного спектра от *pp*-цикла 423 кэВ). Измеренное содержание ¹⁴С 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 ¹⁴С в жидком сцинтилляторе, так как, согласно современной теории происхождения нефти, она хранится без контакта с атмосферой сотни миллионов лет. За это время весь ¹⁴С должен был распасться, так как его период полураспада 5730 лет. Есть одна гипотеза [10], которая объясняет происхождение ¹⁴С в нефти, но она требует тщательной проверки. Если удастся подтвердить эту гипотезу, то появляется возможность значительно уменьшить его содержание в сцинтилляторе или убрать вовсе.

5.4 Спектр 14С

Для анализа экспериментальных данных на наличие в сцинтилляторе изотопа 14С требуется знание формы спектра электронов при бета-распаде 14С.

Мы будем использовать спектр, измеренный в работе [9]. В этой работе по результатам высокоточных измерений бесстеночным пропорциональным счетчиком была получена и проанализирована форма бета-спектра радиоуглерода. Стандартное выражение для спектра электронов из бета распада было получено еще Ферми [10] и мало изменилось с тех пор:

$$\frac{dN(W)}{dW} = Const \cdot pW(W_0 - W)^2 \cdot F(Z, W)C(W), \tag{1}$$

где р и W – импульс и энергия электрона, W0 – граничная энергия распада, F(Z, W) – функция Ферми, описывающая электромагнитное взаимодействие дочернего ядра с электроном, C(W) – фактор формы бета-спектра. Const – нормировочный фактор, включающий все независимые от энергии множители. Обычно спектр нормируется на «1», поэтому константа часто есть просто величина, обратная интегралу спектра.

В работе [9] получена функция C(W) = $1 + \beta(W0 - W)$, где $\beta = (1.24 \pm 0.04) \times 10-3$ кэВ-1 и W0 = 156.27 ± 0.03 (стат.) ± 0.14 (сист.) кэВ. В наших расчетах мы использовали значение W0 = 156.457 из [11]. Для вычисления функции F(Z, W) мы будем использовать формулу Ферми [10] с добавленным множителем из работы [12]: F0(Z, W). Формула для F0(Z, W) приведена в книге [13] за номером (2.10). Отметим, что Ферми получил простую формулу, отбросив малые члены. Учет более высокого приближения показывает, что точность формулы Ферми для Z = 15 и W = 200 кэВ составляет 0.003 [13].

Мы приняли в качестве эталонного спектра для анализа экспериментальных данных спектр, рассчитанный по (1) с фактором формы из [9], как наиболее точный на сегодняшний день.

На рисунок 5.1 показаны спектры 14С, рассчитанные по формуле (1) без учета фактора формы (линия 1), с учетом фактора формы [12] (линия 2) и наблюдаемый спектр, размытый энергетическим разрешением детектора (линия 3).



Рисунок 5.1 - Спектры электронов при бета распаде ¹⁴С: 1 – расчет по формуле (2.10) для *F*₀(*Z*, *W*) из книги [13] и *C*(*W*) = 1, 2 – то же с поправкой фактора формы. 3 – Спектр, наблюдаемый в детекторе с учетом энергетического разрешения при использовании формулы (3) для σ.

5.5 Низкофоновый детектор

Создаваемый детектор расположен в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН [14] и предназначен для измерений ультранизких концентраций изотопа 14С в образцах жидкого органического сцинтиллятора (ЖОС). Лаборатория находится внутри

горы (3700 м от входа в тоннель), на глубине 4900 м.в.э., где поток мюонов составляет \sim 0.1 м-2 час-1. Для подавления фона от нейтронов и гамма-квантов окружающих горных пород стены, пол и потолок комнаты, где установлен сцинтилляционный детектор, выполнены последовательно из слоев полиэтилена (25 см), кадмия (1 мм) и свинца (15 см). Сам детектор размещен в коробе из оргстекла 14.5×14.5×120 см3 и окружен со всех сторон защитой из особо чистой меди толщиной 15 см и свинца толщиной 10 см. Принципиальная схема детектора изображена на рисунок 5.2. Детектор включает в себя кварцевую ячейку диаметром 100 мм и длиной 200 мм из кварцевого стекла толщиной 3 мм (полный объем около 1.5 л), заполненную образцом жидкого органического сцинтиллятора, двух световодов из органического стекла (ПММА) размером 100×100×300 ммЗ и двух низкофоновых фотоумножителей (ФЭУ) ЕТ9302В (3"). Для увеличения светосбора кварцевая ячейка и световоды обернуты зеркальной отражающей пленкой VM2000. Для лучшего оптического контакта между кварцевой ячейкой, световодами и ФЭУ использовалась силиконовая смазка. Герметичный чехол из полиэтилена, окружающий детектор снаружи, служил для защиты от радона. Из внутреннего объема радон удалялся продувкой газообразным азотом. В качестве источника газообразного азота использовался сосуд Дьюара с жидким азотом, в котором переход в газ осуществляется за счет подогрева при помощи тока от помещаемого внутрь сопротивления.



Рисунок 5.2 - Схема экспериментальной сцинтилляционной ячейки. 1 – ячейка с исследуемым сцинтиллятором, 2 – световоды, 3 – ФЭУ.

Условия измерения ультранизких концентраций радиоуглерода делает необходимым использование в конструкции детектора элементов с низким содержанием радиоактивных примесей. С помощью низкофонового полупроводникового детектора из высокочистого германия HPGe были проведены измерения интенсивности гамма-квантов кварцевой ячейки с образцом жидкого сцинтиллятора и фотоумножителя ET9302B. По данным измерений были выполнены расчеты содержания радиоактивных примесей (Бк/кг) в ячейке с ЖОС и в фотоумножителе, представленные в таблице 5.1.

Для дальнейшего улучшения фоновых характеристик сцинтилляционного детектора планируется использование более низкофоновых фотоумножителей и оптимизация защиты ячейки от излучения делителей напряжения ФЭУ.

иолици 5.1	содержание радноактивных пр	$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} = \frac{1}$
Изотоп	Кварцевая ячейка с ЖОС	ФЭУ ЕТ9302В
	Активность в Бк/кг	Активность в Бк/кг [Бк/ФЭУ]
⁴⁰ K	$\leq 1.0 \cdot 10^{-2}$	1.71 ± 0.09 [0.26 ± 0.01]
²⁰⁸ Tl	$\leq 9.4 \cdot 10^{-4}$	$(3.6\pm0.6)\cdot10^{-2}$ [(5.4±0.8)·10 ⁻³]
²¹⁴ Bi	(3.5±1.7)·10 ⁻³	1.21±0.03 [0.180±0.004]
²²⁸ Ac	$\leq 2.3 \cdot 10^{-3}$	0.10 ± 0.01 [(1.5±0.2)·10 ⁻²]

Таблица 5.1 - Содержание радиоактивных примесей в ячейке с ЖОС и ФЭУ.

5.6 Исследуемый сцинтиллятор

Измерения были проведены с жидким органическим сцинтиллятором на основе линейного алкилбензола (ЛАБ) с содержанием 2 г/л сцинтилляционной добавки 2-(4-Biphenyl)-5-phenyloxazole (BPO). Выбор ЛАБа для анализа был частично связан с тем, что в новых крупномасштабных сцинтилляционных детекторах планируется использовать сцинтиллятор на основе этого растворителя [3].

ЛАБ представляет собой смесь углеводородов с общей формулой C_nH_{2n-6} , плотностью 0.856 г/л и температурой вспышки 143°C [15, 16]. Исследованный в работе ЛАБ (КИНЕФ, Кириши, Россия) имеет усредненную формулу $C_{17,73}H_{29,46}$ и состоит в основном из четырех групп алкилбензолов: $C_{16}H_{26} - 0.125$, $C_{17}H_{28} - 0.293$, $C_{18}H_{30} - 0.315$, $C_{19}H_{32} - 0.267$, каждая из которых присутствует в виде смеси изомеров.

Для жидкого сцинтиллятора на основе ЛАБа были проведены измерения световыхода и прозрачности (ослабление потока в *e* раз), которые дали значения ~ 8000 фотонов/МэВ и 15 м при длине волны света 420 нм. Полученные значения позволяют проводить измерения в низкоэнергетической (< 50 кэВ) области спектра от распада радиоуглерода.

Содержание ядер водорода Н, углерода С и электронов в 1000 т ЛАБ и псевдокумола приведено в таблице 5.2.

Для исследования был использован образец сцинтиллятора объемом 1360 мл, который полностью помещался в ячейку объемом 1.5 л. Сверху оставлялся небольшой объем, который заполнялся азотом по мере продувания сцинтиллятора азотом.

Таблица 5.2 - Содержание ядер водорода углерода и электронов в 1000 т линейного алкилбензола (ЛАБ) и псевдокумола (РС).

1000 т	LAB	PC

Формула	C _{17,73} H _{29,46}	C9H12
Н	7.33×10^{31}	6.01×10^{31}
С	4.41×10^{31}	4.51×10^{31}
Электроны	3.44×10^{32}	3.31×10^{32}

5.7 Калибровка энергетической шкалы сцинтилляционной ячейки

Для энергетической калибровки детектора использовались три источника гаммаквантов: 241Am, 133Ba и 137Cs. Энергии гамма-квантов представлены в таблице 3. Здесь же приведены энергии электронов отдачи при рассеянии гамма-кванта назад и энергии в пике полного поглощения (ППП) для квантов малых энергий. Приведена энергия для максимумов в экспериментальных распределениях, которая использовалась для калибровки.

В спектре 137Сs пик полного поглощения не наблюдается из-за малых размеров детектора, зато хорошо выделен максимум в распределении энергий от обратного комптоновского рассеяния. Этот максимум образован рассеянием гамма-квантов назад в некотором диапазоне углов и его энергия составляет 428 кэВ, что следует из моделирования Монте Карло. Смоделированный спектр 137Сs при его регистрации в ячейке приведен на рисунок 5.3 вместе с описанием Гауссовой функцией.



Рисунок 5.3. Смоделированный Монте Карло спектр ¹³⁷Cs. Подгонка показывает, что энергия в максимуме спектра составляет 428 кэВ.

¹³³Ва имеет несколько гамма-линий (см. табл. 3), которые сливаются в один широкий пик в наблюдаемом спектре. Монте Карло моделирование показало, что энергетическое распределение в ячейке представляет из себя плато с небольшим пиком от сливающихся линий 79.6 и 81.0 (среднее 80.9 кэВ), который плохо заметен на фоне плато от рассеянных гамма-квантов, а гамма-кванты больших энергий сливаются в широкое распределение со средней энергией около 150 кэВ. Это распределение неплохо описывается гауссовым

распределением с большой дисперсией. Оказалось возможным выделить пик 81 кэВ подгонкой измеренного спектра не одной, а двумя гауссовыми функциями. При этом значение функции χ^2 оказывается меньше, чем при подгонке одним гауссовым распределением.

Источник	Энергия	Энергия	Энергия в	Номер
	излучаемых	электрона	наблюдаемом	канала
	гамма-квантов,	отдачи	пике, кэВ	пика
	кэВ	при		
		рассеянии		
		назад, кэВ		
¹³⁷ Cs	661.66	477.334	428	5860
¹³³ Ba	383.85 (9.6%)	230.46		
	356.02 (45%)	207.27	150	1815
	302.85 (13.4%)	164.27		
	276.4 (5.2%)	143.63		
	81.0 (25%)		80.9 (ППП)	703
	79.61 (1.9%)			
²⁴¹ Am	59.54 (93%)		59.5 (ППП)	509
	26.34 (6%)			Не виден

Таблица 5.3 - Калибровочные источники и их положение на шкале.

Спектры всех калибровочных источников показаны на рисунке 5.4, где спектр от ¹³⁷Cs приведен в подавлении с фактором 5, чтобы уложиться в этот же энергетический диапазон.

По четырем энергетическим точкам строилась калибровочная кривая, пример которой приведен на рисунок 5.5. В области малых энергий шкала оказывается нелинейной из-за эффекта Биркса [17] или так называемого сцинтилляционного дефекта, поэтому для аппроксимации кривой использовалась парабола

$$E = p0 + p1 \cdot N_{ch} + p2 \cdot N_{ch}^2 .$$
 (2)

Параметры p0, p1 и p2 параболы показаны на рисунок 5.5 для одной из калибровок.

Энергетическое разрешение сцинтиллятора было определено по пику полного поглощения 241Am с энергией 59.5 кэВ. Пик хорошо описывается гауссианой со средним каналом A(59.5) = 512.2 и дисперсией \Box (59.5) = 162.2 канала. Дисперсия для ФЭУ ЕТ9302В, используемого в наших измерениях, может быть представлена в следующем виде:

$$\sigma = \varepsilon \sqrt{\mathbf{a} \cdot \mathbf{N}_{\text{pe}}} \quad , \tag{3}$$

где Npe – число фотоэлектронов, выбитых из фотокатода, попавших на первый динод динод и вызвавших вторичную эмиссию. Коэффициент а = 1.4 был нами измерен для ФЭУ, использованных в установке. ε – коэффициент пересчёта из числа фотоэлектронов в номер канала.

Средний канал связан с числом фотоэлектронов следующим образом: $A = \varepsilon N_{pe}$. Тогда Npe = 1.4 (A/ \Box)2. Соответственно, в нашем сцинтилляторе для энергии 59.5 кэВ образуется 14 фотоэлектронов, а для 1 МэВ 235 фотоэлектронов, что соответствует значению световыхода, приведенному выше (~8000 фотонов/МэВ), если учесть светосбор (0.15) и квантовый выход фотокатода (0.25).

Приведенный анализ показывает, что в области порога регистрации 50 кэВ эффективность регистрации событий остается достаточно высокой.



Рисунок 5.4 - Экспериментальные спектры калибровочных гамма-источников. Спектр ¹³⁷Сs приведен при ослаблении сигнала в 5 раз, чтобы уложиться в диапазон входных импульсов анализатора.

5.8 Определение вклада изотопа 14С в число событий сцинтилляционной ячейки

Измерение содержания ¹⁴С в объеме сцинтиллятора проводилось по данным, полученным в результате 295.2 часов полного времени измерения числа событий ячейки в низкофоновой установке. Измерения велись сериями, каждая из которых сопровождалась двумя калибровками: одна до и другая после. Амплитудный спектр каждой серии переводился в энергетический с использованием своей средней калибровки. Затем спектры складывались с весом равным времени измерения.

Расчеты Монте Карло показали, что фон, определяемый наличием естественной радиоактивности, формируется из рассеянных гамма-квантов. Фон состоит из постоянной величины при больших энергиях и начинает экспоненциально нарастать с уменьшением энергии, от примерно 200 кэВ. Таким образом, для определения ¹⁴С измеренный спектр описывался суммой трех компонент: константы, экспоненты и собственно спектра ¹⁴С

$$\frac{dN(E)}{dE} = C_0 + C_1 e^{-C_2/E} + C_3 F_{beta}(E).$$
(4)



Рисунок 5.5 - Калибровочная кривая, проведенная по экспериментальным данным. Показаны параметры параболы, описывающей кривую.

Для минимизации отклонения приведенной функции (4) с измеренными данными использовался стандартный пакет для обработки экспериментальных данных ROOT версия 5.30/02 [18].

На рисунок 5.6 показан результат минимизации суммарного спектра. В качестве $F_{beta}(E)$ использовался спектр, описанный выше. Результат незначительно отличался от того, который был получен при использовании обычного разрешенного бета-спектра без учета фактора формы.

Коэффициент C_3 определяет нормировку бета-спектра, то есть количество распадов ¹⁴С в объеме сцинтиллятора за время измерения.

Интеграл бета-спектра ¹⁴С за время измерения 295.2 часов составил 8173 события. С учетом объема сцинтиллятора (1360 мл) получено значение ${}^{14}C/{}^{12}C = (3.9 \pm 0.5) \times 10^{-17}$.

В таблице 5.4 показаны данные, полученные в отдельных сериях.
Параллельно был использован другой метод минимизации функции (4) в качестве независимой проверки. Использовался метод максимального правдоподобия со случайным выбором параметров функции (4) в широком интервале значений. Калибровка при этом производилась подбором параметров сцинтиллятора методом Монте Карло до совпадения с измеренными спектрами гамма-источников. Значение 14C/12C, полученное этим методом, совпало в пределах экспериментальной погрешности с первым методом $(2.8 \pm 0.7) \times 10-17$.



Рисунок 5.6 - Гистограмма экспериментальных данных по 5 кэВ в бине (черные точки с ошибкой). 1 – подгоночная кривая в виде суммы постоянной, экспоненты и бета-спектра¹⁴С. 2 – бета-спектр ¹⁴С. 3 – фон в виде суммы постоянной и экспоненты.

5 Заключение

Создана установка по измерению содержания радиоуглерода ¹⁴C в образцах жидкого сцинтиллятора. Проведены первые измерения со сцинтиллятором на основе отечественного ЛАБа. Значение фона в диапазоне 200-300 кэВ составляет 1.58 событий в час, Результат содержания ¹⁴C оказывается на порядок больше полученного в сцинтилляторе в детекторе Borexino [5]. Усредненное по двум методам измерение, дает значение ¹⁴C/¹²C = $(3.3 \pm 1.1) \times 10^{-17}$.

В работах коллаборации Borexino отмечалось, что используемый псевдокумол (PC), находящийся в детекторе в виде сцинтиллятора, отбирался из наиболее старых месторождений, чтобы добиться как можно более низкого содержания ¹⁴С.

Предполагается исследовать образцы сцинтиллятора с основой из растворителя, полученного из различного нефтяного сырья, чтобы определить влияние месторождения на содержание ¹⁴C. Также будут исследованы растворители, полученные из каменного угля.

Проводится анализ фонов детектора с целью возможности их дальнейшего подавления и снижения порога детектора для более уверенного выделения бета-спектра ¹⁴С.

Работа поддержана грантами РФФИ № 14-22-03059 и № 13-02-92440, а также Программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные свойства материи и астрофизика».

5 Литература

1. Michael Wurm, John F. Beacom, Leonid Bezrukov *et al.* The next-generation liquidscintillator neutrino observatory LENA. White Paper ArXive: 1104.5620 [astro-ph.IM].

2. John G. Learned, Stephen T. Dye and Sandip Pakvasa, Hano-Hano. A deep ocean antineutrino detector for unique neutrino physics geophysics studies. arXiv: 0810.4975 [hep-ex].

3. И. Р. Барабанов, Г. Я. Новикова, В. В. Синев, Е. А. Янович, Исследование природных потоков нейтрино при помощи сцинтилляционного детектора большого объема на Баксане. Препринт ИЯИ РАН 1228/2009. I. R. Barabanov, G. Ya. Novikova, V. V. Sinev and E. A. Yanovich, Research of the natural neutrino fluxes by use of large volume scintillation detector at Baksan. arXiv: 0908.1466 [hep-ph].

4. F.L. Villante CNO solar neutrinos: a challenge for gigantic ultra-pure liquid scintillator detectors. arXiv:1410.2796 [hep-ph], 2014.

5. D. D. Angelo, G. Bellini, J. Benziger *et al.*, Recent Borexino results and prospects for near future. arXiv: 1405.1779 [hep-ex].

6. I. Barabanov, L. Bezrukov, E. Resconi, S. Schonert, The 14C abundance in liquid organic scintillators and oil. Препринт ИЯИ-1316/2012.

7. G. Bonvicini, N. Harris, V. Paolone, The chemical history of C14 in deep oilfields. arXiv:hep- ex/0308025, 2003.

8. C. Buck *at al.*, ПТЭ, № 1, c. 40, 2012; Instruments and Experimental Techniques, 55, 34, 2012.

9. V. V. Kuzminov and N. Ya. Osetrova, Precise measurement of ¹⁴C beta spectrum with the use of walless proportional counter, Ядерная физика, 63 (7), 1365, 2000.

10. E. Fermi, Zeits. f. Phys., 88, 161, 1934; The Development of Weak Interaction Theory, ed. P.R. Kabir, Gordon and Breach, New York, 1963.

11. Сайт http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp

12. E. J. Konopinski, G. Uhlenbeck, Phys. Rev., 60, 308, 1941.

13. Б. С. Джелепов, Л. Н. Зырянова, Влияние электромагнитного поля атома на бета-распад. Изд. АН СССР. 1956. с 312.

14. Ю. М. Гаврилюк, А. М. Гангапшев, А.М. Гежаев, В. В. Казалов, В. В. Кузьминов, С. И. Панасенко, С. П. Якименко. «Рабочие характеристики низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900». Москва, Препринт ИЯИ РАН 1301/2011; Ju.M. Gavriljuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev et al. "Working characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900, Baksan Neutrino Observatory) arXiv: 1204.6424 [physics.ins-det].

15. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, Н. А. Данилов и др., Физико-химическое исследование линейного алкилбензола как базового компонента для создания сцинтилляционных нейтринных детекторов. Журнал прикладной химии, т. 84, вып. 3, с. 385, 2011.

16. Л. Б. Безруков, Н. И. Бакулина, Н. С. Иконников, В. П. Моргалюк, Г. Я. Новикова и А. С. Чепурнов, Исследование прозрачности отечественного ЛАБа как растворителя сцинтилляторов большого объема. Препринт ИЯИ-1382/2014.

17. J. B. Birks, The Theory and Practice of Scintillation Counting. London: Pergamon, 1964.

18. <u>http://root.cern.ch</u>.

5 Публикации по теме за 2015 г.

1. В.В. Синев, Потоки антинейтринного излучения от ядерных реакторов в предполагаемых местах постройки детектора для регистрации геонейтрино, Препринт ИЯИ РАН-1396/2015.

2. L.B. Bezrukov, E.A. Litvinovich, I.N. Machulin, V.V. Sinev, M.D. Skorokhvatov, S.V. Sukhotin, "Looking for antineutrino flux from 40K with large liquid scintillator detector", Proceedings of the International Workshop on Prospects of Particle Physics: «Neutrino Physics and Astrophysics», Valday, January 27 - February 2, Письма в ЭЧАЯ, № [46], issue 2, p.339-345, 2015; arXiv:1405.3140 [hep-ex].

3. L.B. Bezrukov, V.V. Sinev, Geoneutrinos and Hydridic Earth (or primordially Hydrogen-Rich Planet, Письма в ЭЧАЯ, № [46]], issue 2, p.331-338, 2015; arXiv:1405.3161 [astro-ph.EP].

4. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А.В. Вересникова и др., Измерение содержания 14С в жидких сцинтилляторах с помощью детектора малого объема в низкофоновой камере в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, препринт ИЯИ-1414/2015. 6 Лаборатория новых методов детектирования нейтрино и других элементарных частиц. Разработка альтернативных методов детектирования космических нейтрино сверхвысоких и экстремально высоких энергий. Разработка полупроводниковых детекторов ядерных частиц на основе новых микропиксельных лавинных фотодиодов.

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 ΡΕΦΕΡΑΤ

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРИНО

Объект исследования.

Методы регистрации космических нейтрино и других частиц сверхвысоких и экстремально высоких энергий (альтернативных оптическому методу), которые дадут возможность создать крупномасштабные детекторы космических нейтрино с регистрирующими объемами вещества мишеней (морской воды, антарктического льда или лунного грунта) в десятки кубических километров.

Детекторы элементарных частиц с использованием новейших лавинных фотодиодов.

Цели работы.

1. Проведение разработок:

- гидроакустического метода детектирования космических нейтрино сверхвысоких энергий;

радиоволнового метода регистрации космических нейтрино сверхвысоких энергий,
взаимодействующих с массивами антарктического льда;

- радиоастрономического метода регистрации космических лучей экстремально высоких энергий (нейтрино, протонов и др.), взаимодействующих с поверхностными слоями Луны.

2. Разработка полупроводниковых детекторов частиц на основе микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД).

Методы выполнения работы.

Разработка метода быстрого моделирования «трехмерных» электронно-адронных каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий в воде, во льду, в лунном реголите с учетом эффекта Ландау - Померанчука – Мигдала и главных флуктуаций с

целью дальнейших расчетов производимых каскадами акустических сигналов в воде и радио сигналов во льду и в лунном грунте.

Исследование механизма генерации звука в воде электронно-фотонными каскадами, производимыми импульсным твердотельным лазером с использованием лабораторного гидроакустического стенда. 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 гамма квантов, заряженных частиц и нейтронов на основе МЛФД.

Разработка полистирольного сцинтиллятора для регистрации нейтронов.

6 Введение

Как известно для регистрации взаимодействий астрофизических нейтрино с энергиями 6x1013 - 2x1015 эВ с массивом прозрачного антарктического льда потребовался объем детектора IceCube порядка 1 кубического километра. Для детектирования космических нейтрино с энергиями 1016-1019 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 [1] и радиоастрономический [2,3] методы с использованием антарктического льда и Луны как нейтринных мишеней. Еще раньше в 70-х годах в ФИАНе (Г.А. Аскарян и Б.А. Долгошеин) был предложен гидроакустический метод детектирования нейтрино.

Разработка радиоволнового нейтринного телескопа РАМАНД в Антарктиде [4] и 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 **радио** детекторов нейтрино с регистрирующим объемом вплоть до 10³ куб. км (**ARA** - Askaryan Radio Array и **ARIANNA**) осуществляются американскими ученым. 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 координатночувствительных (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 2015 г.

6.1. Составление проекта: «Разработка и создание пилотной антенной системы метровых волн для лунного радио детектора космических лучей экстремально высоких энергий»

В 2015 г. *ИЯИ РАН совместно с ПРАО ФИАН* (головная организация) подготовлена заявка в РНФ на участие в конкурсе 2016 г. на получение грантов по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами».

Проект направлен на разработку метода детектирования наносекундных всплесков

радиоизлучения от каскадов, возникающих при взаимодействии космических лучей (протонов, нейтрино) предельно высоких энергий с веществом лунного реголита с использованием пилотной антенной системы широкоугольного радиотелескопа метровых волн, создаваемого в Пущинской радиоастрономической обсерватории, а также макетов будущего гигантского радиотелескопа SKA, создаваемых в ЮАР (SKA-mid) и в Австралии (SKA-low) [10, 11].

6.2. Разработка метода быстрого моделирования «трехмерных» электронадронных каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий (1015-1021 эВ и выше) в веществе с целью расчетов производимых ими акустических и радио сигналов.

В 2015 г. разработан предварительный вариант расчёта акустических импульсов в воде от каскадов, генерируемых высокоэнергетическими нейтрино. При этом каскады рассчитывались с помощью гибридного алгоритма LPM-G4-3D, разработанного для расчёта трёхмерного каскада сверхвысоких энергий в воде и других сплошных средах. Алгоритм LPM-G4-3D является развитием разработанного ранее варианта быстрого моделирования «одномерных» каскадов [12] с энергиями вплоть до 10¹¹ ГэВ.



Рисунок 6.1 - Двумерные каскады в воде 2πRdE/dV (как функции от Z и R), рассчитанные с помощью гибридного LPM-G4-3D алгоритма. Для энергий (a) – 10⁹ (усреднение по 100 частицам), (b) – 10¹⁰ (усреднение по 10 частицам), (c) – 10¹¹ ГэВ (каскад от одной частицы). Акустические импульсы на расстоянии 400 м от центра каскадов с энергиями 10⁹-10¹¹ ГэВ см. на Рисунке 6.2.



(с) Рисунок 6.2 - Акустические импульсы на расстоянии 400 м от центра каскадов с энергиями 10^9 - 10^{11} ГэВ. Расчёт для каскадов в воде $2\pi RdE/dV$ (как функции от Z и R) рассчитанных с помощью гибридного LPM-G4-3D алгоритма (см. Рисунок 6.1).

Усреднение каскадов по 10 частицам. Учёт выделения энергии в каскадах в радиальном направлении до 5 см.

6.3 Разработка глубоководного измерительного модуля для исследований на больших морских глубинах акустических шумов и коэффициента Грюнайзена

Для натурных исследований разработан проект глубоководного измерительного модуля.

Измерение коэффициента Грюнайзена в условиях работы реального акустического детектора нейтрино позволит уточнить его значения, необходимые для расчета основных параметров нейтринных каскадов.

Проведены лабораторные исследования по возбуждению в воде термоакустического импульса с помощью маломощного твердотельного импульсного лазера на алюмоиттриевом гранате, легированном эрбием, применяемого в медицинском лазерном перфораторе Эрмед-304 для двух длин волн 1 и 3 мкм.

Разработана схема (см. Рисунок 6.3) регистрации сигналов гидроакустической антенны, датчиков давления и температуры для автономного лазерного измерителя термоупругого коэффициента воды на основе цифрового контроллер VIA EPIA P720-10EL Pico-ITX. Разработана и изготовлена 4-канальная линейная неэквидистантная гидроакустичекая антенна, позволяющая оценить уровень акустического фона и его пространственное распределение.



Рисунок 6.3

6.4 Разработка МЛФД-матриц и лабораторных образцов детекторов элементарных частиц на основе лавинных фотодиодов.

6.4.1 Разработка технологии сборки и изготовления многоэлементных матричных корпусов для фотодетекторов на основе МЛФД

В 2015 г. совместно с ОИЯИ (Дубна) выполнены работы по созданию многоэлементных матричных корпусов для фотоприемных матричных детекторов на основе МЛФД, разработанных Садыговым З.Я. При изготовлении матриц используются одноэлементные фотодиоды с минимальными размерами корпуса для увеличения эффективности сбора фотонов с площади матрицы. Чертеж единичного элемента матричного корпуса см. на Рисунок 6.4.



Рисунок 6.4

Всего планировалось изготовить 1024 одиночных корпусов.

Для этого было достаточно изготовить четыре 16*16 элементных матричных PCB (Printed Circuit Board) корпуса (Рисунок 6.5).





Из 4-х таких матриц одну нужно разрезать на одиночные элементы /корпуса/, а 3 матрицы матрицы будут разрезаны после установки на них фотодиодов. Поэтому для проведения монтажных работ линии резки на матрице должны быть выполнены с высокой точностью.

В результате взаимодействия с рядом фирм (13 штук) стало понятно, что все эти фирмы в Москве являются посредниками и отправляют заказы в другие страны. Более того, некоторые операции они не могли выполнить с заданной точностью и по адекватной цене. Поэтому для выполнения таких работ была составлена технологическая карта по изготовлению плат.

Первоначальные чертежи, изготовленные в формате "TIF" файла, были переделаны в Gerber-формат (совместно с КОРЭ ИЯИ РАН), что значительно снизило стоимость изготовления.

Остальная работа была разделена на 2 этапа:

1. Изготовление печатной платы, с последующим напылением позолоченных контактных площадок.

2. Высокоточные фрезерные работы.

Такая технологическая цепочка позволила разместить заказ по разным фирмам и в итоге изготовить 16*16 элементные матричные PCB корпуса (Printed Circuit Board). На основе изготовленных плат в настоящее время производится сборка матриц детектора с помощью ультразвуковой сварки.

Кроме того была проведена работа по монтажу корпуса для матрицы 4*4 для элементов МЛФД с чувствительной площадкой 3мм *3мм (размер чипа 3,62мм х 3,62мм) из отдельных деталей (Рисунок 6.6).





Для выполнения этой работы была изготовлена оснастка (см. Рисунок 6.7),



Рисунок 6.7

которая позволяла точно фиксировать детали корпуса при склеивании их специальным эпоксидным клеем.

В дальнейшем предполагается продолжить работы по созданию на основе МЛД Φ

детекторы, которые могли бы быть использованы для Позитронно - Эмиссионной Томографии (ПЭТ).

6.4.2 Разработка лабораторных образцов детекторов элементарных частиц на основе МЛФД.

В рамках программы НИР по «Разработке полупроводниковых детекторов ядерных частиц...»:

- Разработан и изготовлен матричный сцинтилляционный детектор 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 (результаты этой работы представлены на международной конференции «NUCLEUS-2015» [13] и будут опубликованы [14]);

- Совместно с лабораторией нейтронных исследований ИЯИ РАН изготовлен прототип позиционно-чувствительного детектора тепловых нейтронов на основе сцинтиллятора ZnS/LiF, световодов прямоугольного сечения (20 кв. мм) и микропиксельных фотодиодов фирмы КЕТЕК. Проведены испытания детектора. Результаты работы были доложены на конференциях и опубликованы [15 - 17].

6.5 Работа по получению полистирольного сцинтиллятора для регистрации нейтронов

В течение 2015 года совместно с ИФВЭ (Протвино) продолжены работы по программе разработки и изготовления нейтронного полистирольного сцинтиллятора (НПС). Проведены работы по поиску оптимального активатора для НПС. Были опробованы в качестве активатора соединения класса оксадиазола (1,3,4 - ВВД) и пиразолина (1,5 дифенил - 3 мезитил пиразолин).

Измерены сцинтилляционные эффективности (СЭ) полученных образцов полистирольного сцинтиллятора разных составов (менялась концентрация активатора от 0,5-5%). Концентрация шифтера (РОРОР) 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 2-4% концентрации активатора в стироле и для ВВД на 15% выше максимума СЭ эталона (стирол + 2% РТ + 0,05% РОРОР), а для 1,5 дифенил – 3 метил пиразолин ниже на 10%.

Для создания детектора нейтронов с энергией от тепловых до 10 МэВ, необходимо изготовить макет чувствительной части детектора тепловых нейтронов (ДТН) в виде цилиндра из НПС размером: диаметр не менее 2,5 см и длиной более 16 см с двумя ФЭУ на торцах.

Для этого были изготовлены образцы НПС чувствительной части детектора тепловых нейтронов различной длины (10 – 18 см и диаметром 2,5 см) методом полимеризации в ампулах. Образцы длиной более 14 см на данном этапе работы не обладают необходимой однородностью и бывают с пузырьками. В дальнейшем следует продолжить отработку технологии полимеризации стирола в ампулах с увеличенной длиной для изготовления модуля ДТН.

Полистирольные детекторы нейтронов обладают сравнительно низкой стоимостью, возможностью изготовления сложных форм, коротким временем отклика. Возможно широкое применение этих детекторов в атомной энергетике, радиационной медицине, геологоразведке нефтегазовых месторождений, экологии, на таможне и в других областях техники и науки.

6 Заключение

В 2015 г. лабораторией ЛМДН и ЭЧ в ходе выполнения заданий

НИР по разработке новых (альтернативных) методов регистрации космических нейтрино сверхвысоких и экстремально высоких энергий, а также НИР по разработке полупроводниковых детекторов ядерных частиц на основе новых микропиксельных лавинных фотодиодов:

Совместно с ПРАО ФИАН подготовлен проект, направленный на разработку радиоастрономического метода детектирования наносекундных всплесков радиоизлучения от каскадов, возникающих при взаимодействии космических лучей (протонов, нейтрино) предельно высоких энергий с веществом лунного реголита с использованием пилотной антенной системы широкоугольного радиотелескопа метровых волн, создаваемого в Пущинской радиоастрономической обсерватории, а также макетов будущего гигантского радиотелескопа SKA, создаваемых в ЮАР (SKA-mid) и в Австралии (SKA-low) [10, 11].

Представлена заявка в РНФ на участие с данным проектом в конкурсе 2016 г. на получение грантов по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами».

Проведен предварительный расчет акустических импульсов от электроннофотонных каскадов с энергиями 10⁹-10¹¹ ГэВ в воде.

Разработан измерительный модуль для исследований на больших морских глубинах акустических шумов и коэффициента Грюнайзена.

В рамках программы НИР по разработке МЛФД-матриц и лабораторных образцов детекторов элементарных частиц на основе лавинных фотодиодов:

- совместно с ОИЯИ разработана технологии сборки и изготовления многоэлементных матричных корпусов для фотодетекторов на основе МЛФД,

 совместно с ЛАЯ ИЯИ РАН разработан и изготовлен матричный сцинтилляционный детектор на основе микропиксельных лавинных фотодиодов МАРD-3N и сцинтилляционных кристаллов LFS для использования в установке, предназначенной для изучения эффектов протон-протонной корреляции в реакциях взаимодействий дейтронов и гелия-3 с водородом,

- совместно с ЛНИ изготовлен прототип позиционно-чувствительного детектора тепловых нейтронов на основе лавинных фотодиодов.

5. Продолжена работа по отработке технологии получения нейтронного полистирольного сцинтиллятора.

Результаты НИР сотрудников ЛНМДН и ЭЧ опубликованы в 2015 г. в статьях [12 - 17].

6 Литература и список научных публикаций и докладов сотрудников ЛНМДН и ЭЧ в 2015 г.

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 (10¹⁵ eV to 10²⁰ 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.

12. I.M. Zheleznykh, L.G. Dedenko, G.L. Dedenko, A.A. Mironovich, "Simulation of one-dimensional cascades in dense media generated by extremely energetic neutrinos", arXiv:1512.07300 (2015).

13. E.S. Konobeevski, <u>M.V. Mordovskoy</u>, S.V. Zuyev, I.M. Zheleznykh, A.G. Gassanov "SETUP FOR STUDYING pp - CORRELATION EFECTS IN $d + {}^{2}H \rightarrow (nn)+(pp)$ AND ${}^{3}He+{}^{2}H \rightarrow {}^{3}H+(pp)$ REACTIONS", 65th INTERNATIONAL CONFERENCE NUCLEUS - 2015 June 29 – July 3, 2015, Peterhof, Sankt-Petersburg.

14. С.В. Зуев, А.А. Каспаров, **Е26**. Конобеевский, М.В. Мордовской, А.Г. Гасанов, И.М. Железных/ «Установка для изучения NN-корреляций в реакции $d + {}^{2}H \rightarrow n + n + p + p$ »// ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2016, том 80, № 3, с. 255–260.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведён монтаж и запуск на оз.Байкал в режиме постоянного набора данных кластер из восьми гирлянд оптических модулей (по 24 ОМ на каждой), представляющий собой базовый структурный элемент создаваемого глубоководного нейтринного телескопа HT1000 (Baikal-GVD) кубокилометрового масштаба. При работе в автономном режиме эффективный объём кластера составляет 0.04 км3 для событий от нейтрино с энергией порядка 100 ТэВ, что позволяет рассматривать его как одного из трёх крупнейших в мире действующих нейтринных телескопов в области высоких и сверхвысоких энергий и позволяет начать на нём поиск событий от астрофизических нейтрино, зарегистрированных впервые в эксперименте на детекторе IceCube.

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 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 СРнарушения;

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:

Произведён монтаж и запуск на оз.Байкал в режиме постоянного набора данных кластер из восьми гирлянд оптических модулей (по 24 ОМ на каждой), представляющий собой базовый структурный элемент создаваемого глубоководного нейтринного телескопа HT1000 (Baikal-GVD) кубокилометрового масштаба. При работе в автономном режиме эффективный объём кластера составляет 0.04 км3 для событий от нейтрино с энергией порядка 100 ТэВ, что позволяет рассматривать его как одного из трёх крупнейших в мире действующих нейтринных телескопов в области высоких и сверхвысоких энергий и позволяет начать на нём поиск событий от астрофизических нейтрино, зарегистрированных впервые в эксперименте на детекторе IceCube.

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