Федеральное агентство научных организаций

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УТВЕРЖДАЮ

директор член-корр. РАН

Л.В.Кравчук 22 января 2018

УДК 539.1, 539.12, 539.123 № государственной регистрации АААА-А16-116022510109-4 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 2017 год)

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

Рубцов Г.И. 22 января 2018

Москва 2018

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы

Исполнители:

д.ф.-м.н. Рубцов Г.И. (введение, заключение) 22 января 2018

д.ф.-м.н. Ряжская О.Г. (раздел 1,10,11) 22 января 2018

д.ф.-м.н. Домогацкий Г.В. (раздел 2-9)22 января 2018

д.ф.-м.н. Ткачёв И.И. (раздел 2-9) 22 января 2018

д.ф.-м.н. Куденко Ю.Г. (раздел 3) 22 января 2018

д.ф.-м.н. Кузьминов В.В. (раздел 3) 22 января 2018 Отчёт содержит: 121 с., 40 рис., 3 табл.

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

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2017 год.

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

Основные усилия были направлены на решение перечисленных ниже задач.

Задача «Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал». В 2017 году были выполнены работы по развертыванию на оз. Байкал и запуску в режиме регистрации и набора данных второго полномасштабного кластера глубоководных регистрирующих модулей и проведение экспериментальных исследований по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких (E>10 TэB) энергий, по поиску проявлений массивных частиц - кандидатов на роль холодной темной материи. Также в течение года проведены работы по комплектации и производству следующих 2 кластеров, которые планируется установить в состав телескопа в 2018-2019 годах. Всего на первом этапе планируется установить 8 аналогичных кластеров нейтринного телескопа Baikal-GVD с эффективным объемом 0,4-0,5 км³.

Введенная в режим регистрации и накопления данных установка 2017 года из 2 кластеров содержит в общей сложности 576 оптических модулей, размещенных на 16 вертикальных гирляндах (по 8 гирлянд в каждом кластере) в интервале глубин от 750 до 1275 метров. Нейтринный телескоп Baikal-GVD в конфигурации 2017 г., является глубоководным детектором с эффективным объемом порядка 0.1 км3 для регистрации каскадов заряженных частиц, вызываемых потоками нейтрино высоких энергий астрофизической природы,

существование которых было подтверждено в экспериментах на нейтринном телескопе IceCube.

В течение 2017 года осуществлялась эксплуатация телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и ведется формирование банка качественных событий для последующего физического анализа.

В течение 2017 г. велся анализ экспериментальных данных, полученных на первом кластере за 2016 год. В задаче поиска каскадов, вызванных нейтрино астрофизической природы, был проведен анализ 686 млн. событий соответствующий 182 дням живого времени набора данных. В результате применения критериев отбора и процедуры восстановления параметров ливней выделено 57 событий с восстановленной энергией ливней выше 10 ТэВ и 5 событий с энергией выше 100 ТэВ, удовлетворяющих всем критериям отбора. Все выделенные события с энергией выше 100 ТэВ, кроме одного, имеют множественность сработавших оптических модулей меньше 15 и их число соответствует ожидаемому числу фоновых событий от атмосферных мюонов. Одно событие имеет множественность сработавших ОМ равное 38. Вероятность регистрации подобного события от атмосферных от атмосферных мюонов.

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).

Задача «Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах каонов».

В рамках исследования нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах каонов проводился анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску редких распадов положительно заряженных каонов на четыре фермиона, запрещённых в первом порядке в Стандартной Модели и возможных только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при

поиске тяжелых нейтрино на основе данных E949. Эта методика выделения редких каонных распадов использовались при анализе данных эксперимента NA62 (ЦЕРН).

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, в 2017 году были проведены длительные сеансы по набору статистики, в которых активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН. Продолжается анализ полученных данных как по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету, так и по поиску различных редких мод каонного распада.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведены сеансы в нейтринной и антинейтринной модах (январь – апрель, ноябрь – декабрь 2017 года), в которых сотрудники ИЯИ РАН принимали активное участие. Проводится дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2010-2017 гг., по измерению как осцилляционных параметров нейтрино и антинейтрино, так и по сечений взаимодействий нейтрино с веществом. Важной вехой всей физики элементарных частиц является тот факт, что в настоящее время эксперимент Т2К выходит на изучение нарушения СР симметрии в нейтринных взаимодействиях (в лептонном секторе), которое до сих пор было обнаружено только в кварковом секторе.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой завершено создание магнитного нейтринного детектора Baby-MIND, состоящего из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами (сцинтилляционные детекторы разработаны и собраны в ИЯИ РАН). Детектор Baby-MIND был протестирован на пучке Т9 в ЦЕРН и в декабре 2017 года был доставлен в J-PARC.

В рамках Нейтринной платформы ЦЕРН проводятся НИОКР работы по созданию ветои триггерных счетчиков для модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также нового детектора – активной мишени – для регистрации нейтринных взаимодействий. К концу 2017 года в ИЯИ РАН изготовлена пробная партия из около 10 тысяч сцинтилляционных кубиков размером 1см, которые будут составлять активную мишень. В ИЯИ РАН продолжаются измерения этих счетчиков с использованием лавинных фотодиодов – с помощью космических лучей.

В рамках темы "Разработка и создание компактных детекторов ядерных излучений для учебно-исследовательских работ в школах и учебных институтах" силами студентов и аспирантов МФТИ, МИФИ, НОЦ ИЯИ РАН проведена сборка прототипов детектора из

кубиков и сделаны измерения на космических лучах на испытательном стенде в ИЯИ РАН, а также проводится анализ полученных данных.

В исследованиях по теме «Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов ШАЛ и взаимодействий адронов при энергиях 10¹⁵ – 10¹⁸ эВ» получены следующие результаты.

Для учета новых экспериментальных данных проведена юстировка программного пакета FANSY 2.0, разработанного для моделирования взаимодействий адронов при энергиях $10^{11} - 10^{20}$ эВ. FANSY 2.0 описывает экспериментальные данные, полученные на ускорителях и коллайдере при низких и высоких энергиях по генерации вторичных частиц, оказывающих влияние на развитие ШАЛ, содержащих u,d,s,c кварки ($\pi^{\pm,0}$, K, K, нуклоны и барионы, мезонные и барионные резонансы), в частности, результаты эксперимента LHCf по нейтронам и γ -квантам в области больших значений x_F , наиболее важной для экспериментов в космических лучах.

Сравнение данных LHC и результатов моделирования компланарности энергетически выделенных вторичных частиц (ЭВЧ) при сверхвысоких энергиях требует введения новой концепции уменьшения поперечных импульсов частиц, направленных перпендикулярно плоскости компланарности. Предложена концепция проведения эксперимента на детекторе CASTOR LHC для проверки этого явления.

Показано, что остается существенной доля протонов и ядер гелия в спектре ПКИ при энергиях $E_0 \sim 10^{13} - 10^{14}$ эВ (~15%).

Получена предварительная оценка сечения генерации чармированных частиц в фрагментационной области во взаимодействиях адронов с ядрами свинца при энергиях ~ 10¹⁴ эВ, равная $\sigma_{inel} \sim 5 - 8$ мб/нуклон, что выше теоретических предсказаний.

В задаче «Нейтринные эксперименты ИЯИ РАН во ФНАЛ» на дальнем детекторе зарегистрировано 78 событий (включая 7 фоновых событий), рожденных мюонными нейтрино. В отсутствии осцилляций ожидалось зарегистрировать 473 события.

В задаче «Регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах» получены предварительные результаты измерения скорости эмиссии одиночных электронов из меди при температурах 26, 31 и 36 градусов Цельсия. Показано, что скорость эмиссии растет по мере понижения температуры. Разработан и изготовлен газовый мультикатодный счетчик усовершенствованной конструкции. Измерены рабочие характеристики счетчика. Проведены калибровочные измерения. В настоящее время проводятся измерения с целью определения оптимального режима работы, а также эффективности регистрации одиночных электронов, эмитируемых из алюминиевого катода.

Задача «Поиски нейтринного излучения от коллапсов звёзд в Галактике на детекторе

КОЛЛАПС АНС и на детекторе LVD».

На подземных сцинтилляционных детекторах ИЯИ РАН: АСД (Артемовск, Украина), LVD и OPERA (Гран Сассо, Италия) ведутся исследования в области нейтринной физики, физики космических лучей и астрофизики. Основной целью экспериментов АСД и LVD является поиск нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд в Галактике и Магеллановых облаках. Регистрация всех типов нейтрино является уникальной особенностью этих установок.

По данным работы нейтринных телескопов ИЯИ РАН: АСД (Артемовской Научной станции) и российско-итальянской установки LVD (Гран Сассо, Италия) в течение 40 лет (1977 - 2017) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 17.37 года на 90% уровне достоверности.

Проведён их совместный анализ данных экспериментов LVD и БПСТ за 2011-2017 годы включительно с целью поиска нейтринных вспышек от коллапсирующих звёзд. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что найденные кластеры состоят из фоновых событий, и нейтринных вспышек обнаружено не было.

Получены сезонные вариации интенсивности мюонов за 25 лет данных детектора LVD. Найден температурный коэффициент $\alpha_T = 0.95 \pm 0.02$.Установлено наличие сезонных вариаций нейтронов, генерированных мюонами. Измеренные характеристики вариаций нейтронов указывают на сезонные вариации средней энергии мюонов на глубине установки LVD с амплитудой 10%.

Сотрудники подразделения принимали участие в работах по выполнению Государственного задания на 2017 год, включающего проекты по целевым программам РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика», по выполнению гранта РФФИ 15-02-01056_а, 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 2017 году опубликовано 13 статей в иностранных и Российских журналах, сделано 17 докладов на международных, Российских конференциях и семинарах.

В задаче «Исследование анизотропии и вариаций космических лучей 10¹¹ – 10²⁰ эВ» проводились дальнейшие исследования вариаций космических лучей во время гроз и сопутствующих эффектов, ранее обнаруженных во время этих исследований на Баксанской нейтринной обсерватории, а также в рамках проекта Ковер-3 проводились работы по подготовке экспериментов в области гамма-астрономии.

Исследования по задаче «Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO» включали, с одной стороны, исследования фоновых потоков тепловых нейтронов в разных лабораториях и с другой стороны, работы по созданию и развертыванию установок для изучения широких атмосферных ливней.

«Экспериментальное исследование потоков В задаче частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ» в 2017 году по данной теме было запланировано выполнение следующих работ: проведение поиска нейтринных всплесков от взрывов сверхновых с коллапсом ядра в Галактике; создание и запуск в работу программного обеспечения для поиска нейтринных всплесков от коллапсирующих звёзд в режиме реального времени; поддержание установок БПСТ, "Ковёр-2" и "Андырчи" в работоспособном состоянии; продолжение непрерывного набора информации на установках, мониторинг потоков частиц космического излучения высоких и сверхвысоких энергий. Выполнение запланированных научных исследований было осложнено стихийным бедствием – селем в Баксанском ущелье, в результате которого была существенно повреждена инфраструктура Баксанской нейтринной обсерватории и прекращена подача электроэнергии на установки. До окончания восстановительных работ установки были выключены, что привело к заметному уменьшению времени набора информации. Тем не менее, с учетом меньшего времени набора информации, все запланированные исследования выполнены. Полученные результаты обсуждаются в отчёте.

В задаче «Низкофоновые исследования в БНО. Поиск солнечных адронных аксионов» проводится поиск аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в М1-переходе ядер ⁸³Кг на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения A^{+83} Кг $\rightarrow {}^{83}$ Кг $\rightarrow {}^{83}$ Кг + γ ,е (9.4 кэВ). Для регистрации γ -квантов и электронов, возникающих в результате разрядки ядерного уровня, используется пропорциональный счетчик, заполненный криптоном и размещенный в низкофоновой установке в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900. По предварительным результатам обработки данных за 2016г. получено ограничение сверху на массу аксиона на уровне $m_A \leq 75$ эВ (95 %у.д.).

Измерения продолжаются.

Параллельно, в 2017г. продолжены работы по исследованию возможностей создания детектора солнечных адронных аксионов, излучаемых в M1-переходе ядер ⁵⁷Fe на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения $A+{}^{57}Fe \rightarrow {}^{57}Fe^* \rightarrow {}^{57}Fe + \gamma$,е (14.4 кэВ). Предварительно, в качестве возможного рабочего материала детектора выбран пирит (FeS₂). Пирит является полупроводником, что может позволить испоьзовать его как материал для

полупроводникового детектора или криогенного болометра. В качестве альтернативы рассматриваются монокристаллы твердого раствора GaS:Fe и Ga₂S₃:Fe с содержанием железа до 5%.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Новый этап эксперимента по поиску 2Кзахвата в 124Хе». В БНО ИЯИ РАН поводится эксперимент по поиску 2К-захвата ¹²⁴Хе. Методика основана на использовании большого медного пропорционального счетчика заполненного ксенонм, содержащим изотоп ¹²⁴Хе. В 2017 году продолжился набор экспериментальных данных, на данный момент полная статистика составляет более 15500 часов живого времени, обработаны данные за 15427 часов. В области интересов 52-78 кэВ, где ожидается эффект от 2К-захвата Xe-124, обнаружено 7 событий-кандидатов. На основании полученных данных установлен предел на период полураспада Xe-124 относительно 2Кзахвата, на уровне 7*10²¹ лет (90% У.Д.).

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Участие в международном эксперименте AMORE по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа 100Мо». Сотрудники лаборатории являются участниками коллаборации AMORE — международного эксперимента по поиску безнейтриного двойного бета-распада изотопа Mo-100. Методика поиска основана на использовании монокристаллов 40Ca100MoO4 в качестве криогенных болометров с одноввременным съемом сцинтилляционного сигнала. Кристаллы располагаются в криостате при температуре ~10мК. Установка находится в Южной Корее (лаборатория Янгянг).

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Изучение вариаций потока тепловых нейтронов природного происхождения в подземной лаборатории с помощью детекторов на основе ZnS(Ag) с добавками ⁶LiF». В подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900 расположена экспериментальнаяустановка состоящая из 4-х сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов. Долговременные измерения потока тепловых нейтронов в лаборатории позволят выявить его зависимость от различных параметров, таких как влажноть, температура, атмосферное давление, приливные лунные волны в литосфере и т. д. Выявлена годовая модуляция потока тепловых нейтронов в лаборатории с амплитудой волны не менее 5% от среднегодового значения.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Создание воздушной ионной камеры высокого давления (ИКВД) для измерения содержания ²²²Rn в подземных условиях». По программе создания постоянного поста наблюдения за скоростью выхода ²²²Rn из скальной породы в лаборатории дальнего геофизического комплекса БНО (4000 м от входа в штольню «Вспомогательная») сделана скважина диаметром 10 см, длиной 450 см и объёмом ~14 л. Ведётся подготовка Rn-монитора и вспомогательного оборудования для создания поста

наблюдения. Изготовлены и доставлены в лабораторию KamLAND две камеры ЦВИК. Проведена предварительная проверка в неоптимальных шумовых условиях. Достигнуто разрешение ~3% при энергии α -частиц 5.5 МэВ. В рамках задачи создания комбинированного детектора-источника ²¹²Ро предложена методика и с помощью ЦВИК проведены предварительные измерения поведения атомов ²²⁰Rn и его заряженных дочерних продуктов в трубопроводах системы транспортировки газа от генератора ²²⁰Rn к камере-накопителю детектора-источника.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Создание воздушной ионной камеры высокого давления (ИКВД) для измерения содержания ²²²Rn в подземных условиях». По программе создания постоянного поста наблюдения за скоростью выхода ²²²Rn из скальной породы в лаборатории дальнего геофизического комплекса БНО (4000 м от входа в штольню «Вспомогательная») сделана скважина диаметром 10 см, длиной 450 см и объёмом ~14 л. Ведётся подготовка Rn-монитора и вспомогательного оборудования для создания поста наблюдения. Изготовлены и доставлены в лабораторию КаmLAND две камеры ЦВИК. Проведена предварительная проверка в неоптимальных шумовых условиях. Достигнуто разрешение ~3% при энергии α -частиц 5.5 МэВ. В рамках задачи создания комбинированного детектора-источника ²¹²Po предложена методика и с помощью ЦВИК проведены предварительные измерения поведения атомов ²²⁰Rn и его заряженных дочерних продуктов в трубопроводах системы транспортировки газа от генератора ²²⁰Rn к камере-накопителю детектора-источника.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Экспериментальная проверка стабильности периода полураспада альфа-активного ядра ²¹⁴Po». В рамках работы по поиску вариаций периода полураспада изотопа ²¹³Po была набрана статистика за 812 дней (июль 2015–декабрь 2017). В результате обработки временного ряда значений за 622 дня (09.07.2015-29.03.2017) обнаружены солнечно-суточная вариация константы распада с усреднённой амплитудой $A_C = (5.3 \pm 1.1) \cdot 10^4$, лунно-суточная с $A_{\Lambda} = (4.8 \pm 2.1) \cdot 10^4$ и звёздно-суточная с $A_3 = (4.2 \pm 1.7) \cdot 10^4$. При построении ряда значений периода полураспада, усреднённых за неделю (длительность набора 742 дня) обнаружилось, что начиная с ~45 недели величина периода полураспада начала расти и в конце обработанного интервала значение **т** увеличилось на ~0.6% по сравнению со средним значением за первые 320 суток ($\tau = (3.6993 \pm 0.0014)$ мкс). Причины такого изменения в данное время не установлены. Присутствие в данных ²¹³Ро годовой вариации, подобной по амплитуде и фазе годовой вариации периода полураспада 214 Ро, не исключается. Установлено, что коэффициент температурной нестабильности амплитудно-цифрового преобразователя в регистрирующей установке равен 6.8 · 10⁻⁸ (град.С°).

¹. Малая величина КТН исключает возможность того, что наблюдаемые вариации периода полураспада связаны с температурными вариациям параметров АЦП.

Эксперимент «ГЕРДА». Поиск безнейтринного двойного бета-распада ядер является в настоящее время одной из центральных задач экспериментальной физики низких энергий. Его целью является определение природы массы нейтрино (Дираковской или Майорановской) и возможное нарушением лептонного числа. Решение этих задач будет иметь фундаментальные следствия как для физики частиц так и для космологии. Эксперимент GERDA предполагает создание детектора нового поколения с ультранизким фоном для поиска безнейтринного двойного бета-распада ⁷⁶Ge. Основным преимуществом проекта является применение пассивной защиты из жидкого инертного газа и создание германиевых кристаллов нового типа, обеспечивающих высокую степень дискриминации фоновых событий по форме импульса. Проект включает три последовательные фазы. В 2013 г. Завершена первая фаза эксперимента. В результате получен верхний предел для периода полураспада ⁷⁶Ge – 2.1·10²⁵ лет (90%) и начата подготовка второй фазы эксперимента. В течение 2016 г полностью введена в строй вторая фаза эксперимента Герда, в которой наряду с модифицированными старыми коаксиальными кристаллами, использованы 30 новых кристаллов нового типа (кристаллы с точечным анодом, так наз. ВЕС кристаллы) и получен первый результат – новый верхний предел для $0v2\beta$ распада Ge-76 - $T_{1/2} > 4 \cdot 10^{25}$ лет. В течение 2017 г полностью налажены все элементы установки второй фазы эксперимента: использован сцитилляционый сигнал от жидкого аргона в антисовпадении с сигналом германиевых детекторов, введены в строй 30 новых кристаллов и продолжен набор статистики и ее анализ. В результате получен новый верхний предел для 0v2β распада Ge-76 - T_{1/2} >8·10²⁵ лет. Полученное значение является наилучшим для аналогичных современных установок.

Задача «Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории». Объектом исследования является нейтринное излучение Солнца.

Цель работы – проведение солнечных измерений на ГГНТ и калибровка ГГНТ солнечными нейтрино.

Для подготовки условий выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино продолжалась калибровка потоком солнечных нейтрино Установки с двухзонной галлиевой мишенью, предназначенной для проведения эксперимента BEST. В 2017 году все измерения скорости захвата солнечных нейтрино выполнялись на Установке. Получены предварительные результаты скорости захвата для каждой зоны и их объединенный результат. Величины скорости захвата в зонах Установки хорошо согласуются между собой, а их объединенный результат - с предыдущими измерениями на ГГНТ.

Получена величина скорости захвата солнечных нейтрино на галлии за весь период измерений с 1990 по 2017 годы. Для 266 наборов солнечных данных за 27,7 лет измерений выполнен анализ по поиску возможных временных модуляций и сезонных вариаций скорости захвата нейтрино на галлии. Анализ не выявил в данных каких-либо статистически значимых временных или сезонных вариаций. Данные согласуются с предположением о постоянстве потока солнечных нейтрино.

В рамках подготовки условий для проведения экспериментов с искусственными источниками разработано дополнительное оборудование для безопасного управления и размещения высокоинтенсивного источника.

По проекту создания большого сцинтилляционного детектора в баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Продолжались работы по развитию научного обоснования и технического предложения по созданию большого сцинтилляционного детектора с использованием Гидридной модели Земли. Как тест справедливости основных положений Гидридной модели Земли развита Гидридная модель земного электричества. Продолжались работы по измерению содержания 14С в жидких сцинтилляторах в низкофоновой лаборатории БНО при помощи детектора малого объема. Измерения необходимы для разработки сцинтиллятора, не содержащего 14С, для детектора большого объема.

Проведены измерения концентрации радиоуглерода 14С в образце сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола объемом 1.36 л. Двумя методами анализа были получены результаты, совпадающие в пределах экспериментальной погрешности, результат (5.5 ± 1.1) × 10^{-16} и (3.2 ± 1.0) × 10^{-16} (14C/12C). Разработана модель фона детектора, используемого для измерений концентрации 14C.

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	3
Содержание	15
Введение	16
Основные научно-исследовательские работы	26
1. Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз.Байкал	26
2. Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах каонов	32
2.1 Исследование нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах каонов	32
2.2 Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях КЕК и J-PARC	33
2.3 Разработка новых сцинтилляционных детекторов для экспериментов с ускорительными нейтрино	35
2.4 Проект нейтринная платформа NP05	36
2.5 разработка и создание компактных детекторов ядерных излучений для учебно- исследовательских работ в школах и учебных институтах	37
 Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов ШАЛ и взаимодействий адронов при энергиях 10¹⁵ – 10¹⁸ эВ 	38
4. Нейтринные эксперименты ИЯИ РАН во ФНАЛ	41
5. Регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах	42
6. Поиски нейтринного излучения от коллапсов звёзд в Галактике на детекторе КОЛЛАПС АНС и на детекторе LVD	47
7. Исследование анизотропии и вариаций космических лучей $10^{11} - 10^{20}$ эВ	66
8. Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO	67
9. Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории	69
10. Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ	74
11. Низкофоновые исследования в БНО	80
12. Проект ГЕРДА (Germanium Detector Array)	90
13. Разработка проекта создания большого сцинтилляционного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН	94
лаооратории новых методов детектирования неитрино и других элементарных частиц Заключение	06
Публикации	102

ВВЕДЕНИЕ

Задача «Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал». 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 для него 2018 год скорее всего будет завершающим.

Проект KM3NeT является общеевропейским проектом создания нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в Средиземном море. Первоначально условием финансовой поддержки проекта из общего бюджета стран EC 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 собой 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 гамма- всплески, поиска проявлений темной материи, исследования диффузного потока нейтрино и в ряде других задач. Наиболее ярким и значимым для дальнейшей судьбы развития нейтринной астрофизики представляются сегодня результаты анализа набора данных, накопленных в течение трех лет (за период с мая 2010 г. по май 2013 г.), при котором было выделено 37 событий в диапазоне энергий от 30 ТэВ до 2.0 ПэВ, чьи вершины были расположены в выделенном внутреннем объеме телескопа размером 0.4 км³. Энергетическое и угловое распределение этих событий, а также относительная доля событий с мюонным треком в полном числе событий хорошо согласуются с ожидаемым эффектом от изотропного потока нейтрино астрофизической природы с энергетическим спектром близким к ~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.

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, которая в 2017 г. развернула в озере Байкал

и запустила в режим набора данных два из восьми кластеров нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба BAIKAL-GVD.

Байкальский нейтринный телескоп является в настоящее время одним из трех наиболее крупных действующих нейтринных телескопов по своей эффективной площади и эффективному объему по отношению к регистрации природных потоков нейтрино высоких энергий. Дальнейшее сохранение полноправных позиций Байкальского детектора в компании мировых лидеров будет уже зависеть от темпов реализации этого проекта.

Задача «Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах каонов».

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 E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску редких распадов положительно заряженных каонов на четыре фермиона, запрещенных в первом порядке в Стандартной Модели и возможных только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при поиске тяжелых нейтрино на основе данных E949. Эта методика выделения редких каонных распадов использовались при анализе данных эксперимента NA62 (ЦЕРН).

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, в 2017 году были проведены длительные сеансы по набору статистики, в которых активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН. Продолжается анализ полученных данных как по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету, так и по поиску различных редких мод каонного распада.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведены сеансы в нейтринной и антинейтринной модах (январь – апрель, ноябрь – декабрь 2017 года), в которых сотрудники ИЯИ РАН принимали активное участие. Проводится дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2010-2017 гг., по измерению как осцилляционных параметров нейтрино и антинейтрино, так и по сечений взаимодействий нейтрино с веществом. Важной вехой всей физики элементарных частиц является тот факт, что в настоящее время эксперимент Т2К выходит на изучение нарушения СР симметрии в нейтринных взаимодействиях (в лептонном секторе), которое до сих пор было обнаружено только в кварковом секторе.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой завершено создание магнитного нейтринного детектора Baby-MIND, состоящего из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами (сцинтилляционные детекторы разработаны и собраны в ИЯИ РАН). Детектор Baby-MIND был протестирован на пучке Т9 в ЦЕРН и в декабре 2017 года был доставлен в J-PARC, где он будет одним из основных элементов эксперимента WAGASCI для измерения нейтринных сечений в области энергий 1 ГэВ на ядрах мишеней из воды и пластика (углерод и кислород), что, в свою очередь, позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC).

В рамках Нейтринной платформы ЦЕРН проводятся НИОКР работы по созданию ветои триггерных счетчиков для модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также нового детектора – активной мишени – для регистрации нейтринных взаимодействий. К концу 2017 года в ИЯИ РАН изготовлена пробная партия из около 10 тысяч сцинтилляционных кубиков размером 1см, которые будут составлять активную мишень. В ИЯИ РАН продолжаются измерения этих счетчиков с использованием лавинных фотодиодов – с помощью космических лучей.

В рамках темы "Разработка и создание компактных детекторов ядерных излучений для учебно-исследовательских работ в школах и учебных институтах" силами студентов и аспирантов МФТИ, МИФИ, НОЦ ИЯИ РАН проведена сборка прототипов детектора из кубиков и сделаны измерения на космических лучах на испытательном стенде в ИЯИ РАН, а также проводится анализ полученных данных.

Задача «Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов ШАЛ и взаимодействий адронов при энергиях 10¹⁵ – 10¹⁸ эВ»

В настоящее время не существует общепризнанных моделей адрон-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях, используемых для моделирования развития широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере для наземных астрофизических исследований при сверхвысоких энергиях, т.е. выше энергий Большого адронного коллайдера (LHC). Это связано с тем, что эксперименты на LHC дают информацию, в основном, о характеристиках центральной кинематической области взаимодействий нуклонов ($\eta < 5 - 6$), которая играет второстепенную роль в развитии ШАЛ. Информация о наиболее важной фрагментационной области ($x_F > 0.01 - 0.05$) во взаимодействиях нуклонов с ядрами имеется только при энергиях ниже 1 ТэВ в Лабораторной системе, т.е. при $\sqrt{s} < 50$ ГэВ. Ситуация с взаимодействиями мезонов, которые также играют существенную роль в развитии ШАЛ, ещё более удручающая.

С другой стороны, модели, применяемые для моделирования ШАЛ, в известной степени упрощают характеристики взаимодействий, воспроизводя генерацию лишь основных адронов и не обращая должного внимания на выполнение закона сохранения энергии. В частности, только последняя версия SIBYLL учитывает генерацию чармированных частиц. Кроме того, практически не учитывается генерация мезонных резонансов, которые дают вклад в генеацию мюонов, являющихся важной компонентой ШАЛ.

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

Таким образом, по-прежнему требуется как разработка новых, более адекватных моделей взаимодействия адронов с ядрами при сверхвысоких энергиях, так и экспериментальные исследования фрагментационной области во взаимодействиях нуклонов и мезонов с ядрами при энергиях выше 1 ТэВ с помощью исследований ШАЛ на высотах гор [3,4].

С этой целью в рамках данной научной темы была начата разработка программного пакета FANSY 2.0 QGSJ, предназначенного для моделирования взаимодействий адронов в интервале энергий от $\sim 10^{11}$ до $\sim 10^{20}$ эВ.

Задача «Нейтринные эксперименты ИЯИ РАН во ФНАЛ». Целью эксперимента NOvA (NuMI Off-axis ve Appearance) является определение параметров нейтринный осцилляций. В этом эксперименте используется самый мощный пучок (мощностью 700 кВт) мюонных нейтрино с энергией 1-3 ГэВ и два подобных детектора - ближний и дальний. Ближний детектор расположен вблизи источника нейтрино (Фермилаб, США), а дальний детектор находится на расстоянии 810 км Аш-Ривер (ш. Миниссота, США).

В задаче «Регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах» получены предварительные результаты измерения скорости эмиссии одиночных электронов из меди при температурах 26, 31 и 36 градусов Цельсия. Показано, что скорость эмиссии растет по мере понижения температуры. Этот результат находится в противоречии с ожидаемым ходом при термоэмиссии, для которой скорость эмиссии должна быстро расти с температурой, и этот результат измерений пока не находит удовлетворительного объяснения. Одним из возможных объяснений этого является эффект от скрытых фотонов холодной темной материи когда конверсия скрытых фотонов на поверхности металла в обычные фотоны является источником

энергии, приводящей к эмиссии одиночных электронов. В этом случае эффект должен зависеть от работы выхода материала катода как это было изложено в нашей работе [1]. В случае, если измерения покажут, что скорость эмиссии при криогенной температуре обратно работе выхода металла, это станет косвенным доказательством пропорционально правильности этой гипотезы. Наблюдаемый рост с понижением температуры качественно согласуется с измеренным ранее на ФЭУ при понижении температуры вплоть до криогенных температур [Rodman and Smirth (1963); Nikkel (2007); Meyer (2010)]. Этот результат недавно также нашел подтверждение в измерениях на ФЭУ для детектора ProtoDUNE. Темновой ток является фоном, который является определяющим при регистрации малых энерговыделений с использованием детекторов с низким порогом. Одной из таких задач, активно исследуемых в настоящее время, является регистрация когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Эксперимент COHERENT с детектором CsI(Na) впервые зарегистрировал когерентное рассеяние нейтрино на ядрах используя пучок нейтрино от распада остановившихся пимезонов и мюонов в лаборатории Oak Ridge (США). Это явилось несомненно крупным успехом, однако в физике существенным моментом является подтверждение полученного результата в независимом эксперименте, желательно проведенном с использованием отличной от первого методики. Поэтому необходимо разрабатывать новые детекторы с низким порогом.

Задача «Поиски нейтринного излучения от коллапсов звёзд в Галактике на детекторе КОЛЛАПС АНС и на детекторе LVD».

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.

В задаче «Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения комплексе установок БПСТ» Ha на уникальном комплексе экспериментальных установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, расположенная над ним ливневая установка "Андырчи" и комплексная ливневая установка "Ковер-2") в течение многих лет проводятся исследования в области физики космических лучей и нейтринной астрофизики. Для выполнения исследований установки комплекса в течение 2017 года поддерживались в работоспособном состоянии. Проводились работы по модернизации установок. Поддерживался режим непрерывного набора информации на установках комплекса и проводился мониторинг потоков частиц космического излучения.

Первого сентября 2017 года по Баксанскому ущелью прошел сель, вызванный потоком воды из прорвавшего естественную дамбу высокогорного озера. Вышедшая из берегов река Баксан нанесла значительный ущерб Баксанской нейтринной обсерватории. Вместе с подвесным мостом через р. Баксан, были снесены силовые кабели подачи напряжения на установки БПСТ и «Андырчи». На установке "Ковер" был унесен потоком один фургон (выносной пункт) с 18 сцинтилляционными детекторами (несколько тонн веса, около 3000 литров жидкого сцинтиллятора и соответствующее оборудование), а другой такой же фургон накренился, и был сдвинут со своего места на значительное расстояние, с соответствующими обрывами всей кабельной (силовой и сигнальной) сети. Стихийное бедствие привело к заметному уменьшению времени набора информации. Тем не менее, с поправкой на время набора экспериментальных данных, были выполнены все запланированные исследования.

Создан архив экспериментальных данных установок за 2017 год. Разработан новый алгоритм поиска нейтринных вспышек от Сверхновых с коллапсом ядра, позволяющий увеличить радиус чувствительности БПСТ до ~ 24 кпк. По экспериментальным данным БПСТ проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, получено новое ограничение на частоту вспышек с коллапсом ядра в Галактике. Разработано программное обеспечение для поиска на БПСТ нейтринных всплесков от коллапсирующих звёзд в режиме реального времени.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Поиск солнечных адронных аксионов». Наиболее естественное решение СР-проблемы сильных взаимодействий было получено путем введения новой киральной симметрии, спонтанное нарушение которой при энергии f_A

полностью компенсирует СР-неинвариантный член в лагранжиане квантовой хромодинамики (КХД) и приводит к появлению аксиона. На данный момент развиты модели двух классов "невидимого" аксиона. Это модели адронного (или KSVZ)-аксиона, и GUT- или DFSZаксиона. Масса аксиона mA в обеих моделях может быть выражена через свойства $\pi 0$ -мезона:

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

где m_{π} и f_{π} – масса и константа распада пиона, $z = m_u / m_d = 0.56$ и $w = m_u / m_s = 0.029$ – отношения масс кварков. Значения z = 0.56 и w = 0.029 являются общепринятыми в аксионной литературе, хотя существующие экспериментальные данные разрешают достаточно широкий интервал для возможных значений z и w. Ограничения на массу аксиона возникают как следствие экспериментальных ограничений на константы связи аксиона с фотонами ($g_{A\gamma}$), электронами (g_{Ae}) и нуклонами (g_{AN}), которые, в свою очередь, являются модельно зависимыми величинами. Если аксион существует, Солнце должно быть одним из наиболее мощных его источников. Целью данной работы является поиск монохроматических аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в М1-переходе в ядрах ⁸³Кг на Солнце. На Земле аксионы могут быть обнаружены в обратной реакции резонансного поглощения путем регистрации частиц (γ и рентгеновских квантов, конверсионных и оже-электронов), возникающих при разрядке возбужденного ядерного уровня. Вероятность испускания и последующего поглощения аксионов зависит только от константы связи с нуклонами, которая является наименее модельно-зависимой и пропорциональна (g_{AN})⁴.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Новый этап эксперимента по поиску 2Кзахвата в 124Хе». В БНО ИЯИ РАН поводится эксперимент по поиску 2К-захвата ¹²⁴Хе. Методика основана на использовании большого медного пропорционального счетчика заполненного ксенонм, содержащим изотоп ¹²⁴Хе. В 2017 году продолжился набор экспериментальных данных, на данный момент полная статистика составляет более 15500 часов живого времени, обработаны данные за 15427 часов. В области интересов 52-78 кэВ, где ожидается эффект от 2К-захвата Xe-124, обнаружено 7 событий-кандидатов. На основании полученных данных установлен предел на период полураспада Xe-124 относительно 2Кзахвата, на уровне 7*10²¹ лет (90% У.Д.).

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Участие в международном эксперименте AMORE по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа 100Мо». Сотрудники лаборатории являются участниками коллаборации AMORE — международного эксперимента по поиску безнейтриного двойного бета-распада изотопа Мо-100. Методика поиска основана

на использовании монокристаллов 40Ca100MoO4 в качестве криогенных болометров с одноввременным съемом сцинтилляционного сигнала. Кристаллы располагаются в криостате при температуре ~10мК. Установка находится в Южной Корее (лаборатория Янгянг).

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Изучение вариаций потока тепловых нейтронов природного происхождения в подземной лаборатории с помощью детекторов на основе ZnS(Ag) с добавками ⁶LiF». В подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900 расположена экспериментальнаяустановка состоящая из 4-х сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов. Долговременные измерения потока тепловых нейтронов в лаборатории позволят выявить его зависимость от различных параметров, таких как влажноть, температура, атмосферное давление, приливные лунные волны в литосфере и т. д. Выявлена годовая модуляция потока тепловых нейтронов в лаборатории с амплитудой волны не менее 5% от среднегодового значения.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Создание воздушной ионной камеры высокого давления (ИКВД) для измерения содержания ²²²Rn в подземных условиях». По программе создания постоянного поста наблюдения за скоростью выхода ²²²Rn из скальной породы в лаборатории дальнего геофизического комплекса БНО (4000 м от входа в штольню «Вспомогательная») сделана скважина диаметром 10 см, длиной 450 см и объёмом ~14 л. Ведётся подготовка Rn-монитора и вспомогательного оборудования для создания поста наблюдения. Изготовлены и доставлены в лабораторию KamLAND две камеры ЦВИК. Проведена предварительная проверка в неоптимальных шумовых условиях. Достигнуто разрешение ~3% при энергии α -частиц 5.5 МэВ. В рамках задачи создания комбинированного детектора-источника ²¹²Po предложена методика и с помощью ЦВИК проведены предварительные измерения поведения атомов ²²⁰Rn и его заряженных дочерних продуктов в трубопроводах системы транспортировки газа от генератора ²²⁰Rn к камере-накопителю детектора-источника.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Создание воздушной ионной камеры высокого давления (ИКВД) для измерения содержания ²²²Rn в подземных условиях». По программе создания постоянного поста наблюдения за скоростью выхода ²²²Rn из скальной породы в лаборатории дальнего геофизического комплекса БНО (4000 м от входа в штольню «Вспомогательная») сделана скважина диаметром 10 см, длиной 450 см и объёмом ~14 л. Ведётся подготовка Rn-монитора и вспомогательного оборудования для создания поста наблюдения. Изготовлены и доставлены в лабораторию КаmLAND две камеры ЦВИК. Проведена предварительная проверка в неоптимальных шумовых условиях. Достигнуто разрешение ~3% при энергии α-частиц 5.5 МэВ. В рамках задачи создания комбинированного детектора-источника ²¹²Po предложена методика и с помощью ЦВИК проведены

предварительные измерения поведения атомов ²²⁰Rn и его заряженных дочерних продуктов в трубопроводах системы транспортировки газа от генератора ²²⁰Rn к камере-накопителю детектора-источника.

«Низкофоновые исследования в БНО. Экспериментальная Задача проверка стабильности периода полураспада альфа-активного ядра ²¹⁴ Po». В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН с 2008 года проводится экспериментальное исследование поведения во времени периода полураспада (τ) ядра ²¹⁴Ро. Для определения этого параметра измеряются задержки между моментом рождения ядра (бета-электрон от распада²¹⁴Bi + гамма-квант) и его распадом (альфа-частица от распада ²¹⁴Po). Измерения выполнены на низкофоновой установке ТАУ-2 в подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900 на глубине 4900 м в.э. (973 дня) и на установке ТАУ-1 в подземной низкофоновой лаборатории КАПРИЗ на глубине 1000 м в.э. (354 дня). Временной интервал измерений на установке ТАУ-1 соответствует концу интервала измерений на установке TAУ-2. Объектами дальнейшего анализа являются временные ряды значений т с различным временным шагом. Из данных установки ТАУ-2 усреднённое значение периода полураспада ²¹⁴Ро составило величину τ =163.47±0.03 мкс. В ряду значений τ обнаружены годовая вариация с амплитудой A=(9.8±0.6)·10⁻⁴, солнечно-суточная вариация с амплитудой $A_C = (7.5 \pm 1.2) \cdot 10^{-4}$, лунно-суточная вариация с амплитудой $A_T = (6.9 \pm 2.0) \cdot 10^{-4}$ и звёздно-суточная вариация с амплитудой А₃=(7.2±1.2)·10⁻⁴.

Для обретения полной уверенности в том, что наблюдаемые вариации временного ряда значений **т** имеют неслучайную природу, его необходимо сравнить с аналогичным рядом данных, полученным независимо на другой установке с другим ядром. Такая возможность была реализована на установке TAУ-3 с источником ²²⁹Th, являющимся материнским изотопом для рабочей пары изотопов ²¹³Bi-²¹³Po ($T_{1/2}$ =4.2 мкс). Ниже приводятся результаты работы, полученные в 2017 году.

Эксперимент «ГЕРДА». Двойной бета-распад (2 β 0v) - особый вид бета-распада ядер, при котором ядро испускает два электрона или позитрона, превращаясь в ядро-изобару с зарядом $Z \mp 2$ (Z - заряд родительского ядра). В случае сохранения лептонного числа Д. б--р. сопровождается испусканием двух электронных антинейтрино или нейтрино $A(Z, N) \rightarrow A(Z+2, N-2) + 2e^- + 2\tilde{v}_e;$ $A(Z, N) \rightarrow A(Z-2, N+2) + 2e^+ + 2v.$ (1)

Если лептонное число не сохраняется, нейтрино может быть истинно нейтральной частицей, т. е. совпадать со своей античастицей. Такое нейтрино называют майорановским. В этом случае возможен двойной безнейтринный бета распад (0v2β распад):

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

Процесс 0v2β происходит с нарушением закона сохранения лептонного числа и возможен только при выполнении двух условий:

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

В современной "классической" Стандартной модели частиц масса нейтрино строго равна нулю и 0v2β невозможен. Однако одним из великих физических открытий начала 21-го века является открытие эффекта осцилляции нейтрино. Существование этого эффекта однозначно свидетельствует о наличии массы нейтрино и необходимости расширения Стандартной модели и процесс 0v2β становится возможным. Результаты осцилляционных экспериментов позволяют определить только разности квадратов масс различных типов нейтрино, но не позволяют определить их абсолютные значения.

В простейшем расширении Стандартной модели $0v2\beta$ происходит в результате обмена легкими Майорановскими нейтрино при этом время жизни изотопа относительно $0v2\beta$ распада обратно пропорционально массе нейтрино Таким образом поиск $0v2\beta$ позволяет в случае положительного результата подтвердить майорановскую природу нейтрино (как и предполагается в простейших моделях расширения Стандартной модели), так и получить оценку ее массы. Другим следствием наблюдения $0v2\beta$, возможно даже более важным как для физики частиц, так и для космологии, было бы открытие нарушение закона сохранения лептонного числа. Открытие $0v2\beta$ распада будет иметь фундаментальные следствия как для физики частиц, так и для космологии.

Задача «Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории». Тема исследования нейтрино по-прежнему остается актуальной в программах исследований ведущих мировых научных центров.

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 *pp*-нейтрино. Измерения, проводимые двумя независимыми методами и группами, значительно повышает достоверность получаемых результатов.

С первого солнечного эксперимента Дэвиса поиски вариаций в солнечных измерениях проводились различными независимыми группами исследователей, поскольку подтверждение наличия каких-либо периодических модуляций в солнечных данных будет являться указанием на новую физику за пределами LMA MSW. За последние два десятилетия было много заявлений об обнаружении значимых периодических модуляции на разных частотах в наборах данных солнечных нейтрино в эксперименте Super-K (Япония), результаты которых не подтверждаются анализом участников эксперимента Super-K.

Длительный непрерывный период (27.7 лет) измерений скорости захвата нейтрино на галлии предоставляет возможность проведения анализа по поиску возможных временных и сезонных вариаций в солнечных данных эксперимента SAGE на ГГНТ.

По проекту создания большого сцинтилляционного детектора в баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

В последнее время активно обсуждается ряд проектов по созданию больших сцинтилляционных жидкостных детекторов для регистрации крайне редких событий, в частности нейтринных потоков от различных природных источников. Фундаментальной задачей является измерение потоков антинейтрино от распадов 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, рассматривается возможность регистрации нейтрино от Солнца, образующихся в реакциях захвата протонов ядрами C, N, O и F, а затем позитронного распада образовавшихся ядер (так называемый цикл CNO), с помощью крупномасштабного жидко-сцинтилляционного детектора (типа LENA). Измерение потока этих нейтрино позволит получить важную информацию о химическом составе солнечных недр.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

1. ГЛУБОКОВОДНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МЮОНОВ И НЕЙТРИНО НА ОЗ. БАЙКАЛ

Научный руководитель чл.-корр. РАН Г.В.Домогацкий

В 2017 году ИЯИ РАН совместно с членами коллаборации «Байкал» были выполнены следующие работы по теме «Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал»:

1) завершение комплектации, изготовления и лабораторных испытаний 288 оптических и 40 электронных управляющих модулей для развертывания второго кластера телескопа Baikal-GVD;

2) осуществлена транспортировка научного и технологического оборудования на озеро Байкал и подготовка к работам экспедиции;

развертывание ледового лагеря на 106 км КБЖД в 4 км от берега и размещение
 40 приезжих российских и зарубежных специалистов в зданиях на 106 и 107 км КБЖД;

4) развертывание на оз. Байкал и запуск в режим регистрации и набора данных второго полномасштабного кластера из 288 оптических (регистрирующих) модулей;

5) устранение выявленных недостатков и модернизация управляющей электроники на первом кластере телескопа;

6) установлен в состав телескопа импульсный светодиодный лазер в глубоководном исполнении для проверки работоспособности и синхронизации элементов регистрирующей системы телескопа

7) продолжены работы по разработке и усовершенствованию программного обеспечения моделирования отклика и анализа данных нейтринного телескопа Baikal-GVD. В рамках работ по развитию комплекса вычислительных и служебных программ BARS, разработана и реализована автоматизированная процедура формирования события из данных отдельных секций;

8) проведены экспериментальные исследования по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких (E>10 TэB) энергий, по поиску проявлений массивных частиц - кандидатов на роль холодной темной материи. Развертывание второго кластера и регламентные работы на первом кластере были проведены во время зимней экспедиции на озеро Байкал с 15 февраля по 10 апреля 2017 г.

 комплектация и производство следующих 3 и 4 кластеров. Всего к 2020 году планируется установить 8 аналогичных кластеров нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GV;

10) существенно улучшены технология и условия производства и испытаний оптических модулей, что позволило удвоить годовой выпуск до 600 штук в год и повысить качество высокотехнологичной продукции;

 изготовлены и смонтированы все необходимые кабельные глубоководные соединения системы сбора информации и управления телескопом, проложен донный оптоэлектрический кабель от кластера телескопа до берегового центра (6 км);

12) развитие инфраструктуры для обеспечения монтажа двух кластеров в год, включая ремонт помещений Байкальского технического стационара в г. Байкальске, разработку генплана Байкальской нейтринной обсерватории на 106-107 км КБЖД, проектирование новых зданий и сооружений с целью улучшения условий работы и отдыха специалистов во время экспедиций на озеро Байкал, увеличение до 200 кВт электроснабжения на 106-107 км КБЖД, ремонт подъемных механизмов для монтажа телескопа с ледового покрова озера Байкал, механизмов для прокладки подводных кабелей.

Введенная в режим регистрации и накопления данных установка 2017 года из 2 кластеров содержит в общей сложности 576 оптических модулей, размещенных на 16 вертикальных гирляндах (по 8 гирлянд в каждом кластере) в интервале глубин от 750 до 1275 метров. Нейтринный телескоп Baikal-GVD в конфигурации 2017 г., является глубоководным детектором с эффективным объемом порядка 0.1 км3 для регистрации ливней заряженных частиц, вызываемых потоками нейтрино высоких энергий астрофизической природы, существование которых было подтверждено в экспериментах на нейтринном телескопе IceCube.

В период зимней экспедиции 2017 года на оз. Байкал выполнены работы по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной аппаратуры и подводных линий кабельной связи первого кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD, содержавшего 288 оптических модуля (OM) с фотодетекторами и успешно функционировавшего в течение 2016 г.

Оптические модули установки включают в себя фотоэлектронные умножители Нататаtsu R7081-100 с повышенной квантовой чувствительностью и сопутствующую электронику, а также по два калибровочных светодиода. Каждая из гирлянд содержит 36 OM, расположенных на расстоянии 15 м друг от друга и формирующих три секции по 12 OM в каждой. Системы сбора, обработки и передачи данных измерительных каналов расположены в электронных блоках каждой секции и позволяют регистрировать временную форму сигнала. Кластер связан с береговым центром управления и сбора данных гибридным глубоководным кабелем длиной около 6 км, включающим в себя оптоволоконные линии передачи данных и медные жилы для электропитания установки. Временная синхронизация измерительных

каналов установки осуществляется засветкой оптических модулей световыми вспышками трех калибровочных светодиодных источников излучения, расположенных на центральной и одной из периферийных гирлянд кластера, а также с использованием световых импульсов калибровочных светодиодов, размещенных в каждом оптическом модуле. Пространственное положение фотодетекторов установки контролируется с помощью акустической системы позиционирования, разработанной фирмой EvoLogics (Германия). Оборудование, предназначенное для долговременного мониторинга гидрофизических параметров глубинных вод оз. Байкал размещено на отдельной инструментальной гирлянде.

В течение 2017 года установка из двух кластеров телескопа Baikal-GVD работала в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и ведется формирование банка качественных событий для последующего физического анализа. Осуществлен непрерывный мониторинг уровня собственного свечения водной среды и временного поведения параметров оптических модулей и других функциональных систем установки. Проведены долговременные измерения (с периодом в 40 секунд) относительного смещения фотодетекторов установки с помощью акустической системы позиционирования.

Кластеры Baikal-GVD является мультимегатонным глубоководным детектором нейтрино, способным вести исследование потока нейтрино астрофизической природы. Каждый из двух кластеров содержит 288 фотодетекторов – оптических модулей, размещенных на 8 вертикальных гирляндах. В качестве фотодетекторов в установке используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) Hamamatsu R7081-100 с полусферич еским фотокатодом диаметром 25 см и квантовой эффективностью ~35%. Оптические модули (OM)состоят из ФЭУ, управляющей электроники, магнитных пермаллоевых экранов, оптического геля, пятиштырькового глубоководного разъема, вакуумного клапана и монометра, размещенные в глубоководных стеклянных корпусах диаметром 43 см. 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 36 ОМ расположенных на расстоянии 15 м друг от друга и формирующих три секции по 12 ОМ в каждой. Системы сбора, обработки и передачи данных измерительных каналов расположены в электронных блоках каждой секции и позволяют регистрировать временную форму сигнала. Кластер связан с береговым центром управления и сбора данных гибридным глубоководным кабелем длиной около 6 км включающим в себя оптоволоконные линии передачи данных и медные жилы для электропитания установки.

Помимо оптической системы регистрации на основе фотодетекторов, кластер снабжен системами калибровки и позиционирования гирлянд. Временная синхронизация измерительных каналов установки осуществляется при помощи засветки оптических модулей световой вспышкой от калибровочных светодиодных источников излучения, расположенных на гирляндах, а также с использованием световых импульсов калибровочных светодиодов, размещенных в каждом оптическом модуле. Дли проверки правильности работы всех элементов и программного обеспечения установки в 2017 г. в состав телескопа между кластерами был включен импульсный светодиодиый лазер, засвечивающий все оптические модули двух кластеров.

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 акусти В течение 2017 года осуществлялась эксплуатация двух кластеров телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и ведется формирование банка качественных событий для последующего физического анализа.

На протяжении 2017 года выполнялась работа по комплектации, сборке и испытаниям в лабораторных условиях оптических модулей и измерительных систем двух последующих (третьего и четвертого) кластеров телескопа Baikal-GVD, содержащих в общей сложности порядка 600 ОМ. К сожалению, начиная с ноября 2017 года началось заметное отставание от графика работ в связи с задержкой поставок комплектующих элементов (высоковольтных источников питания) фирмой TRACO POWER (Япония), передвинувшей, в нарушение условий контракта, сроки поставок с ноября 2017года на январь-февраль 2018 года. К настоящему времени завершена подготовка примерно половины ОМ третьего кластера и мы сохраняем надежду на то, что нам удастся развернуть третий кластер в период зимней экспедиции на оз. Байкал в 2018 г., что позволит увеличить детектирующий объем установки до 0.15 км3.

В течение 2017 г. велся анализ экспериментальных данных, полученных на первом кластере за 2016 год. В задаче поиска каскадов, вызванных нейтрино астрофизической природы, был проведен анализ 686 млн. событий соответствующий 182 дням живого времени набора данных. В результате применения критериев отбора и процедуры восстановления параметров ливней выделено 57 событий с восстановленной энергией ливней выше 10 ТэВ и 5 событий с энергией выше 100 ТэВ, удовлетворяющих всем критериям отбора. Все

выделенные события с энергией выше 100 ТэВ, кроме одного, имеют множественность сработавших оптических модулей меньше 15 и их число соответствует ожидаемому числу фоновых событий от атмосферных мюонов. Одно событие имеет множественность сработавших ОМ равное 38. Вероятность регистрации подобного события от нейтрино астрофизической природы сопоставимо с вероятностью регистрации фонового события от атмосферных мюонов.

Выполнен анализ нейтринных событий, зарегистрированных на глубоководном нейтринном телескопе HT200 в оз. Байкал за пять лет наблюдений в направлении на темные карликовые галактики Южной полусферы (dSphs) и на Большое Магелланово Облако (LMC). Этим анализом завершается цикл работ по данным HT200 в поиске сигнала от аннигиляции темной материи в астрофизических объектах. Не обнаружено какого-либо значимого превышения в числе наблюдаемых событий относительно ожидаемого фона от атмосферных нейтрино во всех тестируемых направлениях -- в двадцати двух галактиках dSphs и в галактике LMC. Для ансамбля из пяти отобранных карликовых галактик мы сделали комбинированный анализ данных методом максимального правдоподобия. Получив соответствие наблюдения нулевой гипотезе о присутствии только фоновых событий, мы установили верхние пределы на 90\% д.у. на сечения аннигиляции частиц темной материи с массой от 30 ГэВ до 10 ТэВ в нескольких каналах аннигиляции как в комбинированном анализе отобранного набора галактик так и в анализе в направлении LMC. Наиболее сильные ограничения на уровне $7*10^{-21}$ см^3/с были получены для направления на галактику LMC в канале аннигиляции в пару нейтрино.

Проведен полный расчет и получены ограничения на сечения процессов аннигиляции частиц темного вещества с массой до 10 ТэВ по данным телескопа NT200 за пять лет наблюдений в направлении на галактику Большое Магелланово Облако (LMC), являющейся ближайшим и самым большим спутником нашей Галактики, и в направлениях четырнадцати классических и восьми сверхслабых темных сфероидальных галактик Южной небесной полусферы. Получены ограничения на 90% д.у. на сечения аннигиляции частиц темной материи частиц с массой в диапазоне 30 ГэВ - 10 ТэВ и с распределением плотности по модели Navarro-Frenk-White, соответствующей стандартной космологической модели. Наиболее строгие ограничения получены в прямом нейтринном канале аннигиляции из шести рассмотренных лептонных и адронных каналов, на уровне 10^{-22} см³ сек¹, для больших масс. Все результаты получены с учетом статистических и систематических погрешностей, а также с оценкой астрофизических неопределенностей.

Распространение нейтрино высоких энергий (выше 10 ГэВ) от астрофизических источников до уровня детектора рассчитано с учетом осцилляций нейтрино на длинной базе

при их распространении в Земле. Все результаты получены с учетом статистических и систематических погрешностей, а также с оценкой астрофизических неопределенностей. Для оценки чувствительности телескопа NT200 использовался численный подход с псевдоэкспериментами и максимизация отношения правдоподобия для нулевой гипотезы («только фон») и альтернативной. Вывод верхних пределов на 90\% д.у. по данным NT200 за пять лет наблюдений был сделан в приближении хи-квадрат в численном решении уравнения для отношения правдоподобия. Полученные результаты по нейтринным событиям от LMC подтверждают потенциал этого источника аннигиляций сравнимым с тем, что оценивается от центра Галактики. Показано, что ожидаемые предельные значения сечений для масс частиц темной материи выше 1 ТэВ для телескопа гигатонного объема GVD сильнее на два порядка, чем у предыдущего телескопа NT200 и сравнимы с результатами действующих больших телескопов на Южном полюсе и в Средиземном море. Нами был сделан комбинированный анализ максимальной вероятности сигнала по пяти из двадцати двух темных галактик, выбранных по наибольшему значению астрофизического фактора. Получено, что данные соответствуют нулевой гипотезе «только фон» и, что новые верхние пределы на сечения аннигиляции в объединенном анализе более строгие в сравнении с индивидуальными галактиками.

Сотрудники лаборатории НАВЭ ИЯИ РАН приняли участие с докладами в следующих научных мероприятиях за 2017 г.:

- XVII International Workshop on Neutrino Telescopes, 13-17 March (Venice, Italy)

- 35th Int. Cosmic Ray Conference -2017 12-20 июля 2017, Bexco, Busan, S.Korea

- Mediterranean and Antarctic Neutrino Telescopes Workshop, 7-8 October, Marseille, France, 2017.

- 8th International Workshop on Air Shower Detection at High Altitudes, 10-13 Shankhai, Chaina, 2017.

- The 26th International Symposium Nuclear Electronics and Computing (NEC2017), 25-29 September, Budva, Montenegro, 2017.

- Проведены два международных совещания с подробным рассмотрением результатов и планов работ в июне и декабре 2017 г. в ОИЯИ (г. Дубна).

- Проведено двухдневное заседание Технического комитета с участием ведущих российских и зарубежных специалистов по оценке результатов выполненных работ в 2015-2017 годах.

Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Рациональное природопользование

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРИННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ И НАРУШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СР И Т СИММЕТРИЙ В РАСПАДАХ КАОНОВ Научный руководитель проф. Куденко Ю.Г.

2.1 ИССЛЕДОВАНИЕ НАРУШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СР И Т СИММЕТРИЙ В РАСПАДАХ КАОНОВ

Продолжается анализ данных эксперимента E949 с целью поиска редких распадов положительно заряженных каонов, запрещенных в первом порядке Стандартной Модели. В частности, ищется распад каона на четыре фермиона, который возможен только в более высоких порядках слабого взаимодействия. Работа с данными эксперимента E949 позволяет не только искать новую физику вне рамок Стандартной Модели, но и отрабатывать новые методы выделения редких каонных распадов и поиска следов стерильных частиц, которые применяются при анализе данных других экспериментов, в частности, NA62 (ЦЕРН).

Эксперимент NA62 (ЦЕРН) нацелен на поиск редкого распада положительно заряженного каона ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \ \bar{\nu}$), чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели. В рамках этого эксперимента в 2017 г. были проведены длительные сеансы по набору статистики основного процесса, в которых активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН, в том числе и в качестве дежурных экспертов. По ходу набора статистики идет процесс анализа как основной, сверхредкой, моды каонного распада ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \ \bar{\nu}$), так и других мод, связанных с поиском стерильных частиц.

Была продолжена работа по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету, используя методы, алгоритмы и опыт, полученные участниками проекта из группы ИЯИ в эксперименте E949. Исследовались основные фоновые процессы и критерии отбора возможных распадов тяжелых нейтрино и подавления фона. Предварительные результаты на статистике, накопленной NA62 в сеансах в 2015 г., соответствующей 300 миллионам каонных распадов, позволяет значительно улучшить чувствительность к величине элемента смешивания активных и стерильных нейтрино для диапазона масс тяжелых нейтрино более 300 МэВ для распадной моды $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ и в интервала масс более 150 МэВ для распадной моды $K^+ \rightarrow e^+ \nu_H$. Анализ данных, накопленных в 2016-2017 гг., продолжается, в том числе и по поиску различных мод каонного распада: $K^+ ->\pi^+ e^+ e^-$; $K^+ ->\pi^+ e^+ e^-$ датта, а также распадов нейтральных пионов в нейтрино и антинейтрино ($\pi 0 ->$ «ничто»), запрещенного в Стандартной Модели.

Продолжается анализ данных эксперимента E36 (J-PARC), основной целью которого является изучение универсальности взаимодействий мюонов и электронов по распадам каонов в мюонную и электронную моды.

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) проведены сеансы по набору данных как в нейтринной, так и в антинейтринной моде (в январе – апреле, а также в ноябре – декабре 2017 г.), в которых активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН. Благодаря увеличенной мощности протонного ускорителя J-PARC (в среднем около 440 кВт, а в конце 2017 года ускоритель стабильно работал при ~470 кВт) только за 2017 г. удалось удвоить статистику для нейтринной моды, а всего с 23 января 2010 г. по 22 декабря 2017 г. набрано около 2.6 x 10^{21} РОТ (протонов на мишени), из них в нейтринной моде ~1.5 x 10^{21} РОТ, а в антинейтринной моде ~1.1 x 10^{21} РОТ.

Анализ всех данных продолжается, однако, основываясь на одновременном анализе большей части данных (собранных к концу апреля 2017 г.) по осцилляциям мюонных нейтрино в электронные нейтрино и мюонных антинейтрино в электронные антинейтрино, эксперимент Т2К получил дальнейшее подтверждение максимального нарушения СР симметрии в нейтринных осцилляциях. Для обеих возможных иерархий масс нейтрино наиболее вероятным является значение СР нечетной фазы $\delta_{CP} = -\pi/2$, соответствующее максимальному СР нарушению. Значения фазы $\delta_{CP} = 0$ и $\delta_{CP} = \pi$, которые соответствуют случаю, когда СР симметрия сохраняется, исключены на уровне статистической значимости более 2σ .

В эксперименте Т2К были измерены осцилляцилнные параметры при измерении «дефицита» мюонных нейтрино в дальнем детекторе Супер-Камиоканде. Полученные данные указывают на близкое к максимальному смешиванию между вторым и третьим массовыми состояниями: величина угла $\theta_{23} \approx 45$ градусов, что подтверждается (с меньшей точностью) экспериментами Супер-Камиоканде и IceCube. Однако эксперименты MINOS и NOvA указывают на значительное отклонение возможной величины этого угла от 45 градусов.

Кроме того, в эксперименте T2K были измерены осцилляцилнные параметры при регистрации "появления" электронных нейтрино и антинейтрино в дальнем детекторе Супер-Камиоканде (из J-PARC выходит почти чистый пучок мюонных (анти)нейтрино). К основным "электронным" событиям, имеющим только один электроноподобный черенковский конус в дальнем детекторе Супер-Камиоканде (кандидаты в CCQE-события, квазиупругие взаимодействия через заряженные токи), были добавлены CC1 π -события, в которых присутсвует еще и конус от электрона, образовавшегося в результате распада заряженного π -мезона (взаимодействия нейтрино и ядер через заряженные токи с одним заряженным пионом в конечном состоянии), что позволило расширить общую статистику анализируемых данных.

В эксперименте Т2К впервые измерено когерентное рассеяние мюонных нейтрино с рождением одного пиона на легких ядрах (вода). Для энергии нейтрино около 0.7 ГэВ величина сечения составила

 σ =(4.25±0.48 (stat)±1.56 (syst))×10⁻⁴⁰ cm²/nucleon, что находится в согласии с предсказанием нейтринного генератора NEUT и существенно расходится с предсказанием другого нейтринного генератора GENIE.

Проведен анализ новых данных по поиску осцилляций активных нейтрино в стерильные нейтрино в диапазоне масс до ~450 МэВ в ближнем детекторе ND280 (в газе время проекционных камер TPC), по результатам анализа готовится публикация.

В ноябре – декабре 2017 года детектор Baby-MIND, созданный в 2016-2017 гг. с непосредственным участием сотрудников ИЯИ РАН, был транспортирован в Японию, где в 2018 году он будет развернут на пучке T2K в качестве трековой части детектора WAGASCI.

Запущен в работу первый модуль детектора WAGASCI, состоящий из активных элементов (сцинтилляционных детекторов) и пассивных (вода) в соотношении 20:80. Начаты измерения на нейтринном пучке Т2К. Активные элементы этих детекторов (сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами) были разработаны и созданы сотрудниками ИЯИ РАН, входящими в этот научный коллектив.

Проведены тесты и начат монтаж детектора мюонного пробега (MRD) для центральной мишени WAGASCI. Один их двух MRD детекторов собран и готов к набору статистики на нейтринном пучке.

Предварительный анализ данных модуля детектора ВАГАСИ показывает, что его параметры соответствуют ожидаемым значениям. В 2018 году планируется установка и запуск всего нового детекора WAGASCI на пучке T2K.

2.3 РАЗРАБОТКА НОВЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С УСКОРИТЕЛЬНЫМИ НЕЙТРИНО

В 1-м квартале 2017 года была завершена работа по созданию магнитного детектора Baby-MIND общей массой около 60 тонн, сцинтилляционные счетчики для которого были разработаны и изготовлены в ИЯИ РАН.

Детектор Baby-MIND состоит из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы спектросмещающими волокнами co И лавинными фотодиодами. Каждый сцинтилляционный счетчик был протестирован в ИЯИ РАН, а затем и в ЦЕРНе – после монтажа в детекторе. В тестах и монтаже детектора активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН.

В мае – июле 2017 года детектор Бейби-Майнд был протестирован на канале заряженных частиц Т9 в ЦЕРНе. Были использованы вторичные пучки мюонов и пионов разного знака, кроме того, были протестированы оба возможных направления магнитного поля детектора Бейби-Майнд. В дополнение к магнитному детектору Бейби-Майнд на канале Т9 ЦЕРНа был установлен полностью активный детектор АИДА (основные модули для которого были изготовлены в ИЯИ РАН) – в качестве запускающей детекторной системы.

Анализ данных пучковых тестов продолжается, но предварительные результаты тестов демонстрируют хорошие параметры и способность детектора Бейби-Майнд измерять импульсы мюонов при низких энергиях около 500 МэВ.

В ноябре – декабре 2017 года детектор Baby-MIND был благополучно транспортирован (в контейнерах на автотранспорте и на морском судне) в Японию и доставлен в J-PARC, где в 2018 году он будет развернут на пучке T2K в качестве трековой части детектора WAGASCI.

2.4 ПРОЕКТ НЕЙТРИННАЯ ПЛАТФОРМА NP05

В рамках проекта Нейтринная платформа NP05 проводятся НИОКР работы по созданию вето- и триггерных счетчиков для модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также нового детектора – активной мишени – для регистрации нейтринных взаимодействий. В текущем варианте предполагается сборка этого нового детектора из большого числа сцинтилляционных кубиков (около 2 млн кубиков из полистирола с добавками и со светоотражающим покрытием) со стороной 1 см, в каждом из которых проделываются три сквозных отверстия (во взаимно перпендикулярных направлениях) для оптических спектросмещающих волокон, свет с которых снимается с помощью компактных лавинных фотодиодов. Высокая сегментация данного детектора позволит улучшить геометрическое разрешение при определении координат точки нейтринных взаимодействий (вершины), что, в свою очередь, приведет к уменьшению систематических погрешностей измерения параметров нейтринных осцилляций.

В октябре 2017 года сотрудниками ИЯИ РАН небольшая часть кубиков (125) была протестирована на пучке Т10 в ЦЕРНе. Основными задачами тестов были следующие: измерение световыхода детектора (как отдельных кубиков, так и суммарного по группе кубиков); получение временного разрешения детектора; определение возможных потерь света через боковые плоскости кубиков; а также влияние засветки соседних кубиков на съём сигнала (cross talk). В настоящее время проводится анализ данных как пучковых тестов, так и лабораторных тестов с помощью космических лучей. Также идет работа по Монте-Карло моделированию отклика различных конфигураций детектора.

Важной и нетривиальной частью исследований является инженерно-конструкторская разработка механической части всего детектора, поскольку его вес будет достигать 2 тонн, а для достижения наилучших показателей необходимо минимизировать наличие «пассивного» вещества в детекторе.

К концу 2017 года в ИЯИ РАН изготовлена пробная партия из около 10 тысяч сцинтилляционных кубиков. В ИЯИ РАН продолжаются измерения этих счетчиков с использованием лавинных фотодиодов – с помощью космических лучей.
2.5 РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ КОМПАКТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ В ШКОЛАХ И УЧЕБНЫХ ИНСТИТУТАХ

Проведена сборка прототипов детектора из кубиков и сделаны измерения на космических лучах с участием студентов и аспирантов (МФТИ, МИФИ, ИЯИ РАН) на испытательном стенде в ИЯИ РАН. В ходе проведения тестов исследовались световыход детекторов, влияние на световыход количества спектросмещающих волокон для считывания сигнала, а также отрабатывалась технология сборки детектора из кубиков с 3D-геометрией считывания световыхода с помощью спектросмещающих волокон.

Силами студентов МФТИ создан стенд для испытаний спектросмещающих волокон на основе УФ светодиода как источника света и проведены измерения волокон для прототипа детектора из кубиков. На стенде также отрабатывались методы измерения параметров многопиксельных лавинных фотодиодов МРРС Hamamatsu.

ВЫСОКОГОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРО- И ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКОГО АСПЕКТОВ ШАЛ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ АДРОНОВ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 10¹⁵ – 10¹⁸ ЭВ

Научный руководитель д.ф.-м.н. Р.А.Мухамедшин

В течение 2017 г. была продолжена юстировка программного пакета FANSY 2.0 QGSJ, разработанного для моделирования взаимодействий адронов в интервале энергий $(10^{11} - 10^{20}$ эВ), в соответствии с новыми экспериментальными результатами, полученными как при низких (NA61 SHINE, 158 ГэВ), так и при сверхвысоких (LHCb, $\sqrt{s} = 13$ ТэВ) энергиях. FANSY 2.0 воспроизводит основные характеристики *pp* взаимодействий при этих энергиях и описывает экспериментальные данные, полученные на ускорителях при низких энергиях и на высокоэнергичном Большом адронном коллайдере (LHC) по генерации основных типов вторичных частиц, оказывающих влияние на развитие ШАЛ, содержащих u,d,s,c кварки (заряженные и нейтральные пионы, каоны, нуклоны и барионы, чармированные частицы, мезонные и барионные резонансы).

FANSY 2.0 воспроизводит основные результаты LHC при $\sqrt{s} = 7$ и 13 ТэВ, в частности, по нейтронам и γ -квантам в области больших значений x_F , наиболее важной для экспериментов в космических лучах [1].

На рис. 1 показаны энергетические спектры γ -квантов, полученные в эксперименте LHCf и рассчитанные по FANSY 2.0 при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в интервалах псевдобыстрот $\eta > 10.94$ и $8.81 < \eta < 8.99$.

На рис. 2 показаны энергетические спектры нейтронов (с 10%-й примесью нейтральных \bar{n} , Λ^0 , $\bar{\Lambda}^0$, K^0 и \bar{K}^0), полученные в эксперименте LHCf и рассчитанные по FANSY 2.0 при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в интервалах псевдобыстрот $\eta > 10.76$ и $8.99 < \eta < 9.22$.



Рисунок 1. Спектры γ-квантов LHCf при η > 10.94 и 8.81 < η < 8.99.



Рисунок 2. Спектры нейтронов LHCf при $\eta > 10.76$ и 8.99 < $\eta < 9.22$.

Можно видеть хорошее совпадение экспериментальных данных и расчетных результатов, полученных с помощью FANSY 2.0. В то же время на рис. 2 видны большие отличия предсказаний других моделей от экспериментальных результатов.

На основе базовой модели FANSY 2.0 QGSJ была разработана версия FANSY 2.0 QGSCPG, воспроизводящая компланарную генерацию энергически выделенных вторичных частиц (ЭВЧ) во взаимодействиях протонов первичного космического излучения с энергиями $E_0 > 10^{16}$ эВ с ядрами атомов воздуха, обнаруженную в высокогорных и стратосферных экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами.

На основе моделирования с использованием FANSY 2.0 QGSJ было показано, что согласование данных LHC и компланарности ЭВЧ в рамках первоначальной, предложенной около 15 лет назад, концепции объяснения компланарности большими поперечными импульсами (в плоскости компланарности) ЭВЧ очень маловероятно. Предложена новая концепция объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности.

Предложена концепция эксперимента на LHC с использованием детектора CASTOR LHC для проверки новой гипотезы. На рис. 3 показан возможный экспериментальный результат в случае регистрации компланарного взаимодействия, полученного при моделировании в рамках новой концепций компланарности. Треки ЭВЧ показаны большими черными кружками, размер которых зависит от энергии частиц.

На рис. 4 показано распределение вероятности величины $\varepsilon_{cop} = E_{cop}/(E_{cop} + E_{tr})$, измеряемой детектором CASTOR для версий с традиционными взаимодействиями (FANSY

2.0 QGSJ) и компланарной генерацией ЭВЧ (FANSY 2.0 QGSCPG). Здесь E_{cop} – максимальное энерговыделение в двух противоположных секторах детектора, E_{tr} = энерговыделение в двух противоположных секторах детектора, расположенных перпендикулярно к секторам с максимальным энерговыделением. Очевидно, имеет место большое различие между предсказаниями двух версий.



Рисунок 3. Возможный экспериментальный результат в случае регистрации компланарного взаимодействия. Треки ЭВЧ показаны большими черными кружками.

Проведены расчеты образования т.н. гало – области потемнения в центре гаммасемейств с наблюдаемыми энергиями выше 500 ТэВ. Результаты сравнения с экспериментальными данными показывают, что доля протонов и ядер гелия в спектре ПКИ во всей области энергий E₀ ~ 10 – 100 ПэВ остается существенной (~15%) [2,5].

Проведена предварительная оценка сечения генерации чармированных частиц в фрагментационной области во взаимодействиях адронов (в основном, мезонов) космических лучей с ядрами свинца при энергиях ~ 10^{14} эВ. Получено значение $\sigma_{inel} \sim 5 - 8$ мб/нуклон [6], что заметно выше теоретических предсказаний.



Рисунок 4. Распределение по вероятности регистрации величины $\varepsilon_{cop} = E_{cop}/(E_{cop} + E_{tr})$, измеряемой детектором CASTOR для версий FANSY 2.0 (QGSJ и QGSCPG).

4. НЕЙТРИННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ИЯИ РАН ВО ФНАЛ

Научный руководитель д.ф.-м.н. Буткевич А.В.

На дальнем детекторе зарегистрировано 78 событий (включая 7 фоновых событий), рожденных мюонными нейтрино [Публикации.4.1]. В отсутствии осцилляций ожидалось зарегистрировать 473 события.



Рисунок 5. Полученные ограничения на разности квадратов масс нейтрино $|\Delta m^2_{32}| = |m^2_3 - m^2_2|$ и значения *sin²* (θ_{23}) угла смешивания θ_{23} .

В плоскости (Δm^2_{32} , $sin^2 \theta_{23}$) имеется две изолированных области разрешенных значений параметров осцилляций. Впервые было показано, что максимальное смешивание, т. е. значение $\theta_{23}=\pi/4$, когда примеси мюонных v_{μ} и тау v_{τ} нейтрино в третьем массовом состоянии v_3 одинаковы (т. н. μ - τ симметрия в состоянии v_3) исключается со значимостью 2.6 σ . Этот результат позволяет, также, исключить ряд моделей, предложенных для описания больших углов смешивания лептонов и нарушения СР-инвариантности, которые основываются на μ - τ симметрии.

Кроме того, на дальнем детекторе зарегистрировано 33 события кандидата (ожидаемый фон 8 событий), рожденных электронными нейтрино $v_{e,k}$ которые появились в пучке мюонных нейтрино из-за v_{μ} -> v_{e} осцилляций [Публикации.4.2]. В результате фитирования спектров мюонных и электронных событий, как функций параметров Δm^{2}_{32} , $sin^{2} \theta_{23}$ и фазы нарушения СР-инвариантности δ_{CP} получены вырожденные решения:

а) $\theta_{23} < \pi/4$, нормальная иерархия масс (m₁<m₂<m₃) и $\delta_{CP} \sim 3\pi/2$ (максимальное нарушение CP-инвариантности)

б) $\theta_{23} > \pi/4$, обратная иерархия масс (m₃<m₁<m₂) и $\delta_{CP} \sim 3\pi/2$, или нормальная иерархия масс и $\delta_{CP} \sim \pi/2$ (минимальное нарушение CP-инвариантности)

5. РЕГИСТРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРИНО НА ЯДРАХ

Научный руководитель к.ф.-м.н. Копылов А.В.

В работе предложен новый метод регистрации одиночных электронов, эмитируемых с поверхности металла. Метод позволяет достичь эффективности регистрации одиночных электронов, значительно превосходящий существующие методы с помощью ФЭУ, ВЭУ и другие за счет использования оригинальной конструкции мультикатодного счетчика. Подробно работа мультикатодного счетчика нами описана в работах [Публикации.5.2, 3]. Общий вид счетчика в момент его сборки изображен на Рис. 6.



Рисунок 6. Общий вид счетчика

В этом счетчике, схематически изображенным на Рис.7, рабочей поверхностью является внешний катод цилиндрической формы, из которого эмитируются электроны. За счет относительно большой (примерно 0.2 м²) площади катода достигается высокая



Рисунок 7. Схема мультикатодного счетчика

чувствительность детектора. Одиночные электроны, эмитируемые из катода, дрейфуют в газе по направлению к внутреннему цилиндрическому счетчику, где регистрируются за счет высокого (примерно 10⁵) газового усиления. Рядом со сплошным металлическим катодом располагается второй катод, образованный натянутыми нитями с определенным интервалом, который выполняет функцию сетки в электронной лампе. На этот катод подается либо положительный (относительно потенциала сплошного катода), либо отрицательный (запирающий) потенциал. На рисунках 8, 9 представлены картины потенциала полей для этих двух конфигураций.



Рисунок 8. Потенциалы поля в конфигурации 1



Рисунок 9. Потенциалы поля в конфигурации 2

На рисунках 10, 11 показаны напряженности полей в этих конфигурациях.







Рисунок 11. Напряженности поля в конфигурации 2

В первом случае (конфигурация 1) электроны, эмитируемые из катода, свободно диффундируют в поле по направлению к центральному счетчику. В этой конфигурации детектор измеряет скорость эмиссии одиночных электронов плюс фон R₁. Во втором случае (конфигурация 2) измеряется только фон R₂. Скорость эмиссии одиночных электронов находится как разность этих двух измеренных величин R₁ - R₂. Калибровка счетчика производилась по одиночным электронам, выбиваемым из катода счетчика ультрафиолетовыми фотонами от кварцевой лампы. На Рис. 12 показаны спектры одиночных электронов, полученные при калибровке счетчика в этих двух конфигурациях.



Рисунок 12. Спектры одноэлектронных импульсов от УФ кварцевой лампы в конфигурациях 1 и 2

Как известно, спектр одноэлектронных импульсов имеет вид распределения Полиа:

$$P(A) = \left(\frac{A(1+\theta)}{\overline{A}}\right)^{\theta} \exp\left(\frac{-A(1+\theta)}{\overline{A}}\right)$$

Здесь θ – параметр, который зависит от характеристик счетчика и находится аппроксимацией данных измерений. При измерениях рабочий диапазон амплитуд импульсов составлял интервал от 3 до 30 мВ, при этом эффективность счета рассчитывалась как интеграл от распределения Полиа в этом диапазоне амплитуд. На рис. 13 представлены спектры одноэлектронных импульсов, измеренных в конфигурациях 1 и 2.



Рисунок 13. Спектры одноэлектронных импульсов, измеренные в конфигурациях 1 и 2

Электронная схема измерения состояла из зарядочувствительного предусилителя, платы оцифровки импульсов 8 бит и блоков высокого напряжения. Чувствительность зарядочувствительного предусилителя составляла 0.38 В/пКл. Оцифровка импульсов производилась в диапазоне амплитуд +/- 50 мВ с частотой дискретизации 10 МГц и шагом квантования 400 мкВ. Для проверки гипотезы, что именно скрытые фотоны являются источником «криогенного» темнового тока, нами были проведены измерения скорости счета одиночных электронов, эмитируемых из медного катода мультикатодного счетчика при температурах 26, 31 и 36 °C. Измерения проводились в течение 78 суток при этом было получено более 15 ТБ информации по результатам оцифровки формы регистрируемых импульсов. Обработка данных проводилась в режиме офлайн, полезным сигналом считались импульсы с амплитудой от 3 до 30 мВ с коротким фронтом импульса, соответствующим времени дрейфа отрицательных ионов к катоду центрального счетчика, и пологим спадом, соответствующим времени восстановления нулевой линии зарядочувствительного предусилителя, а также с «хорошей» предысторией, соответствующей малому отклонению нулевой линии от нулевого потенциала. По результатам обработки этих данных были получены следующие результаты: $r_{MCC}(26 \text{ °C}) = (0.98 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MC}(31 \text{ °C}) = (0.75 \pm 0.22) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, r_{MC} $(0.15) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$, $r_{MCC}(36 \text{ }^{\circ}\text{C}) = (0.69 \pm 0.23) \times 10^{-4} \text{ Hz cm}^{-2}$. Здесь под r_{MCC} обозначена скорость счета в пересчете на 1 сm². Среднее по этим трем величинам составило $r_{MCC} = (0.79 \pm 0.11) \times 10^{-10}$ ⁴ Hz. Видно, что измеренная скорость счета превышает нулевую на уровне более 7 стандартных отклонений. Ниспадающий характер температурной зависимости скорости счета свидетельствует, что вкладом термоэмиссии с поверхности медного катода можно пренебречь. На Рис.14 приведены полученные в этих измерениях величины. Видно, что они неплохо согласуются с ожидаемым эффектом в случае справедливости этой гипотезы. Видно также, что наш метод обладает высокой чувствительностью и позволяет проводить измерения одиночных электронов на уровне 3-4 скорости счета на порядка ниже, чем продемонстрированный в работе [Meyer, 2010].



Рисунок 14. Температурная зависимость темновой скорости счета одиночных электронов. Сверху – данные из работы Майера, снизу – ожидаемый эффект для медного катода.

Экспериментальные точки – результаты измерения в данной работе.

Безусловно, эти результаты носят предварительный характер и подлежат дальнейшему уточнению при более низкой температуре. Учитывая то, что в мультикатодном счетчике мы используем газовую смесь P10, т.е. аргон плюс 10% метана, минимальная температура, которую можно достичь при этой методике, составляет примерно 200-220 °К. На рис.8 эта область обозначена более темным пунктиром. Нами планируется провести измерения в этой области. Полученные результаты могут рассматриваться только как указание (a hint) на возможный физический процесс.

Для независимой проверки полученных результатов нами был разработан и изготовлен счетчик с алюминиевым катодом усовершенствованной конструкции. Счетчик показал устойчивую работу в режиме регистрации одноэлектронных импульсов. Измерены рабочие характеристики счетчика. Проведены калибровочные измерения. В настоящее время проводятся исследования с целью определения оптимального режима работы счетчика, а также определения эффективности регистрации одиночных электронов, эмитируемых из алюминиевого катода.

6. ПОИСКИ НЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ КОЛЛАПСОВ ЗВЁЗД В ГАЛАКТИКЕ НА ДЕТЕКТОРЕ КОЛЛАПС АНС И НА ДЕТЕКТОРЕ LVD

Научный руководитель член-корр. РАН Ряжская О.Г.

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 даже, 1000 тонн водородосодержащего вещества в качестве мишени для реакции $\overline{v}_e p \rightarrow e^+n$. Эффект от коллапса идентифицируется по появлению в пределах 20 секунд статистически редкого сгущения импульсов, регистрируемых детектором. Важным является совпадение эффекта с оптическим наблюдением вспышки сверхновой. Сильно улучшить достоверность результатов позволяет параллельная работа нескольких детекторов, расположенных в разных местах земного шара.

Исследование нейтринного излучения от коллапса звезд позволит 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 разработана 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. 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. АСД - стотонный сцинтилляционный детектор Артемовской Научной станции. Артемовский Сцинтилляционный Детектор (АСД) расположен в соляной шахте на глубине 570 м.в.э. (Рис.15). Основной задачей эксперимента является поиск нейтринного излучения от коллапсирующих в нашей Галактике звезд. Масса мишени для поиска нейтринного излучения от коллапсов звезд равна 105 тоннам сцинтиллятора и 1000 тоннам окружающей детектор соли (NaCl).



Рисунок 15. Установка АСД АНС

Фон естественной радиоактивности соли примерно в 300 раз меньше чем в обычном грунте. Глубина расположения установки также позволяет набирать статистику взаимодействия нейтронов за относительно короткие сроки, и достаточно велика для экстраполяции полученных данных на другие глубины. Эффективность регистрации замедлившихся до тепловых энергий нейтронов составляет для АСД около 80 %, если источники нейтронов равномерно распределены по объему сцинтиллятора. Детектор имеет цилиндрическую форму, диаметр (556 ± 3) см, высота 547 см; содержит 105 тонн жидкостного сцинтиллятора на основе уайт-спирита C_nH_{2n} , n \approx 10. Высота столба сцинтиллятора 540 см, плотность – 0.78 г/см³. По поверхности цилиндра были равномерно вырезаны 144 иллюминатора для 128 ФЭУ-49Б, 16-ти ФЭУ-110 и 16-ти ФЭУ-30. Внутри детектор был оклеен светоотражающей лавсановой пленкой с диффузным покрытием на основе двуокиси

титана. Коэффициент отражения покрытия в заполненном детекторе равен 84% на длине волны 420 нм.

Установка АСД способна идентифицировать все типы нейтрино.

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.

Электронные антинейтрино регистрируются по реакции обратного бета-распада на протонах сцинтиллятора:

$$v_e + p \rightarrow e^+ + n, E_e = E_v - 1.3 \text{ M} \Im B$$
(1)

Вероятность взаимодействия по этому каналу составляет 83%. Эта реакция сопровождается захватом нейтрона водородом с излучением у-кванта 2.2 МэВ:

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

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

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

Время захвата нейтронов в АСД равно $\tau = 170$ мксек. Вероятность захвата 85%.

Вероятность регистрации детектором позитрона в реакции (1) составляет 99%. Таким образом, АСД с высокой степенью надежности может идентифицировать v_e .

Все типы нейтрино (v_i) взаимодействуют также с углеродом. В случае МСК основной реакцией (13% событий) является реакция возбуждения ядерного уровня углерода 1+ (15.11 МэВ) за счет нейтрального тока и реакции гигантского резонанса:

$$v_i + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}C^* + v_i, \tag{4}$$

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

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

$$v_i + {}^{12}C \rightarrow {}^{11}B + v_i + p, E_p = 8 - 9 \text{ M} \Im B$$
 (7)

$$v_i + {}^{12}C \rightarrow {}^{11}C + v_i + n, (n + p \rightarrow d + \gamma, E_{\gamma} = 2.2 \text{ M}3B.)$$
(8)

Еще одна важная реакция, но, значительно с меньшим сечением по сравнению с обратным бета-распадом – упругое рассеяние нейтрино на электроне (3% событий):

$$v_i + e^- \to v_i + e^- \tag{9}$$

Несмотря на то, что МСК разработана достаточно давно, она не в силах объяснить сброс оболочки при взрыве звезды, а также сигнал, полученный в результате вспышки Сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом облаке 23 февраля 1987 г. в 2:52 UT в эксперименте LSD. В связи с этим были разработаны другие модели гравитационного коллапса. Наиболее хорошо двойной сигнал от SN1987A объясняется в рамках модели

вращающегося коллапсара (MBK), разработанной В.С. Имшенником [V.S. Imshennik Sp. Sci. Rev. **23**, 779 (1995)], предсказывающей двустадийное излучение нейтрино: в первой фазе испускаются электронные нейтрино со средними энергиями 30–40 МэВ, во второй – нейтрино всех типов.

В МВК регистрация электронных нейтрино может осуществляться благодаря реакциям:

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

Сечения взаимодействия этих нейтрино с различными ядрами посчитаны в работах [E.V. Bugaev, G.S. Bisnovatyi-Kogan, M.A. Rudzsky, Z.F. Seidov. Nucl. Phys. A **324** 350 (1979); E. Kolbe, K. Langanke, S. Krewald Phys. Rev. C **49** 1122 (1994); E. Kolbe, K. Langanke Phys. Rev. C **63** 025802 (2001); Ю.М. Гапонов, О.Г. Ряжская, С.В. Семенов ЯФ **67** 1993 (2004); W. C. Haxton Phys. Rev. D **36** 2283 (1987); M. Fukugita, Y. Kohyama, K. Kubodera, Phys.Lett.B **212** 139(1988)].

Для углерода это реакции:

$$v_e + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}N + e^-, \Delta M = 16.83 \text{ M} \Rightarrow B$$
 (10)

$$^{12}N \rightarrow {}^{12}C + e^+ + v_e, \ \tau = 15.9 \text{ Mc}, E_{\text{max}} \approx 16.4 \text{ M} \Rightarrow B$$
 (11)

$$\bar{v}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+ \ , \Delta M = 13.88 \text{ M}\Im\text{B}$$
 (12)

$${}^{12}\text{B} \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^- + v_e, \tau = 29.3 \text{ Mc}$$
 (13)

Электронные нейтрино 30-40 МэВ вступают в реакцию с хлоридом натрия NaCl:

$$v_e + Na^{23} \rightarrow e^- + Mg^{23}$$
, порог примерно 4 МэВ; (14)

$$v_e + Cl^{35,37} \rightarrow e^- + Ar, \tag{15}$$

порог $E_{\text{th}} \sim 800$ кэВ для $\text{Cl}^{37}(24.5\%)$ и ~ 5 МэВ для $\text{Cl}^{35}(75.5\%)$.

При взаимодействии электронов с солью высока вероятность рождения ядра Mg²³ в возбужденном состоянии с излучением γ-кванта с энергией примерно 7.5 МэВ. Возможности регистрации нейтрино от взаимодействия с окружающей солью детектором АСД рассматривались подробно в работе [В.В. Бояркин, О.Г.Ряжская, Изв. РАН Сер. физ. **73**, №5, 691 (2009)].

Для отбора кандидатов на нейтринную вспышку установлен следующий критерий отбора событий:

а) в энергетическом диапазоне (5 – 50) МэВ за 20 сек. регистрируются кластеры импульсов (триггеры), которые при вспышке являются результатом детектирования позитронов в реакции (1);

б) триггер открывает временные ворота длительностью $\Delta t = 512 \ \mu c$ с энергетическим порогом 1 МэВ, т.е. в энергетическом интервале (1 – 5) МэВ регистрируются γ -кванты от реакции захвата нейтрона в реакции (2).

Темп счета триггеров (> 5 МэВ), в среднем, составляет 0.5 имп/сек. Темп счета на пороге 1 МэВ ~ 2000 имп/сек.

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

За период наблюдения за Галактикой по данным установки с 1977г. по 2017г. кандидатов на вспышки Сверхновых обнаружено не было. Экспериментально получено, что фоновые события распределены по закону Пуассона. Предел на частоту коллапсов на 90% уровне достоверности определяется по формуле: $1/f_{col} = \Delta T / \ln(0.1)$, где ΔT – время наблюдения.

Таким образом, за $\Delta T = 40$ лет работы детектора АСД получено ограничение на частоту гравитационных коллапсов менее, чем одно событие за 17.37 года на 90% доверительном уровне ($f_{col} < 0.057$ года⁻¹). Живое время работы детектора на сегодняшний день составляет 80%. За 40 лет наблюдений за нашей галактикой антинейтринных вспышек обнаружено не было.

Поскольку эксперимент связан с поиском крайне маловероятных событий, изучение фона установки имеет особое значение. Знание фоновых характеристик важно не только для решения проблемы выделения истинных событий, но и для поиска возможных путей снижения фона. Часть характеристик фона в используемых энергетических диапазонах (1 – 5) МэВ и (5 – 50) МэВ получается ежесуточно. Это временные распределения импульсов в обоих диапазонах, а также амплитудные спектры. Амплитудный спектр фона в диапазоне (5 – 50) МэВ представлен на рис. 16. Фон в этом энергетическом диапазоне обусловлен прохождением мюонов космических лучей вблизи стенок детектора, а также регистрацией вторичных частиц, сопровождающих мюоны (*e*, γ , π , *p*, *n*).



Рисунок 16. Пример амплитудного спектра фона в интервале 5 - 50 МэВ.

Амплитудный спектр фона в каналах (1 – 50), соответствующий энергетическому диапазону (1 – 50) МэВ и обусловленный регистрацией детектором гамма-квантов, показан на рис. 17. Эффективность регистрации нейтронов для реакции (2) в этом диапазоне равна 80 %. Основное уменьшение эффективности регистрации нейтронов происходит из-за потерь при регистрации гамма-квантов, из-за того что при выходе γ-кванта из детектора он может дать энерговыделение ниже порогового и из-за введения временного окна 10 – 510 мкс при регистрации γ-кванта.



Рисунок 17. Пример амплитудного спектра фона в интервале 1 - 50 МэВ во временном окне 10 - 510 мкс.

Распределение временных интервалов между импульсами (5 – 50) МэВ представлено на рис. 18. Т.к. импульсы фона связаны со статистически независимыми событиями, то распределение интервалов Δt_i между ними должно иметь вид: $\propto \exp(-k \Delta t_i)$, где k = 0.56 сек⁻¹ – частота событий. Из рисунка 18 видно, что импульсы фона (5 – 50) МэВ можно считать статистически независимыми.



Рисунок 18. Распределение длительности временных интервалов между импульсами с энергией 5 – 50 МэВ.

С каждым годом детектор АСД устанавливает новое, более сильное, значение предела частоты гравитационных коллапсов в Галактике и в Магеллановых облаках, в том числе скрытых. Хотя по массе и многим другим параметрам АСД не выделяется среди других подземных установок, этот детектор, тем не менее, способен уверенно работать с сети «нейтринного патруля».

LVD - Детектор Большого Объема – поиск нейтринного излучения. Основная цель эксперимента LVD – поиск нейтринного излучения от коллапсов звезд. По этой программе LVD работает с 1992 года. Помимо основной задачи, на установке LVD исследуется поток нейтронов, генерируемых мюонами космических лучей под землей, как источник фона в низкофоновых подземных экспериментах.

Детектор LVD (Large Volume Detector), расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине <H> = 3650 м в.э., состоит из сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой контейнеры из нержавеющей стали с размерами 100×100×150 см3, заполненные жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Они размещены по 8 штук в стальных модулях, которые сгруппированы в колонны, имеющие 7 горизонтальных слоёв модулей. Детектор LVD состоит из 3 башен, разделенных коридорами шириной 2 м, по 5 колонн в каждой (Рис.19). В такой конфигурации установка работает с 2002 года. Эффективное время работы LVD составляет 99.8% (Рис.1.6). Модульная структура установки позволяет проводить регламентные работы по поддержанию детектора в рабочем состоянии без остановки системы сбора информации. Для регистрации нейтринной вспышки от Сверхновой нужна большая масса мишени установки и высокий процент живого времени. LVD удовлетворяет обоим требованиям.



Рисунок 19. Установка LVD



Рисунок 20. Живое время работы и активная масса эксперимента LVD по годам с 1992 по 2017.

В соответствии с различными значениями установленных триггерных порогов регистрации работу LVD можно разделить на 2 периода. В первый период с 6 июня 1992 года

по 31 декабря 2005 энергетический порог внутренних счетчиков составлял 5 МэВ. Эти счетчики хорошо защищены от радиоактивности окружающих пород наружными, энергетический порог которых был 7 МэВ. Число внутренних счетчиков составляет 47% от общего числа счетчиков. С 2006 года был установлен порог $E_{HET} = 4$ МэВ на все счетчики вне зависимости от их положения. Действующие характеристики LVD приведены в Табл.1.

Длина ×Ширина×Высота	22.7 м × 13.2 м × 10 м
Масса железа , М _{Ге}	1020 т
Масса сцинтиллятора, М _{sc}	1008 т
Число сцинтилляционных счетчиков	840
Число РМТs (ФЭУ)	2520
Средняя глубина Н, минимальная H _{min}	3650 м.в.э., 3000 м.в.э.
Средняя энергия мюонов, Е _µ	280 ГэВ ± 18 ГэВ
Пороговая энергия мюонов	1.3 ТэВ
Скорость счета мюонов (на 1 башню)	~ 120 ч ⁻¹
Темп счета триггеров	0.013 c ⁻¹ t ⁻¹
Триггерный порог, Енет	4 МэВ
Порог регистрации нейтронов, E _{LET}	0.5 МэВ

Таблица 1. Характеристики установки LVD

Установка LVD способна регистрировать нейтрино всех типов по реакциям взаимодействия с ядрами веществ, входящих в её структуру – водородом, углеродом, железом (Табл.2).

Таблица 2. Каналы взаимодействия нейтрино в детекторе LVD ($v_i \equiv v_{e,\mu,\tau}, v_{e,\mu,\tau}$)

	$\overline{\nu}_{e} + p \rightarrow e^{+} + n$ $n + p \rightarrow d + \gamma$ $n + Fe \rightarrow Fe + Fe + Fe + Fe + Fe + Fe + Fe$	$E_{\rm th} = 1.8 { m M} \Im { m B}$ $E_{\gamma} = 2.2 { m M} \Im { m B}$ $\langle E_{\gamma} \rangle \approx 7 { m M} \Im { m B}$	(1) (1a) (1б)
Σγ.			
	$v_e + {}^{12}C \rightarrow e^- + {}^{12}N$	$E_{\rm th} = 17.3 \text{ M} \Im \text{B}$	(2)

	$^{12}N \rightarrow ^{12}C +$			
$e^+ + v_e$				
	$\overline{v}_e + {}^{12}C \rightarrow e^+ + {}^{12}B$			
	$^{12}B \rightarrow ^{12}C +$	$E_{\rm th} = 14.4 \text{ M} \Im \text{B}$	(3)	
$e^{-} + \overline{v}_{e}$				
	$\nu_i + {}^{12}C \rightarrow \nu_i + {}^{12}C^*$			
	$^{12}C^* \rightarrow ^{12}C^+$	$E_{\rm th} = 15.1 \text{ M} \Rightarrow \text{B}$	(4)	
γ		$E_{\gamma} = 15.1 \text{ M}_{\Im}\text{B}$		
	$^{12}C^* \rightarrow ^{11}C +$	$E_n = 8 - 9 \text{ M} \Rightarrow B$		
n				
	$v_e + {}^{56}Fe \rightarrow e^{-} + {}^{56}Co^*$			
	${}^{56}Co^* \rightarrow {}^{56}Co$	$E_{\rm th} = 10 { m M} \Im { m B}$	(5)	
$+\Sigma\gamma$		$E_{\gamma} \approx 7$ -11 МэВ		
	⁵⁶ Co* →	$E_n = 0.5 - 8 \text{ M} \Rightarrow B$		
⁵⁵ Co + <i>n</i>				
	$\overline{\nu}_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow e^+ + {}^{56}\text{Mn}^*$			
	$^{56}Mn^* \rightarrow$	$E_{\rm th} = 12.5 \; {\rm M} \Im {\rm B}$	(6)	
$^{56}Mn + \gamma$		$E_{\gamma} \approx 7 $ МэВ		
	$^{56}Mn^* \rightarrow$	$E_n = 0.5 - 8 \text{ M} \Rightarrow B$		
$^{55}Mn + n$				
	$v_i + {}^{56}Fe \rightarrow v_i + {}^{56}Fe^*$			
	${}^{56}\mathrm{Fe}^* \rightarrow {}^{56}\mathrm{Fe}$	<i>E</i> _{th} =15.0 МэВ	(7)	
$+\gamma$		$E_{\gamma} \approx 7.6 \text{ МэВ}$		
	${}^{56}\mathrm{Fe}^* \rightarrow {}^{55}\mathrm{Fe}$	$E_n = 0.5 - 8 \text{ M} \Rightarrow \text{B}$		
+ <i>n</i>				
	$v_i + e^- \rightarrow v_i + e^-$	-	(8)	

Основной реакцией взаимодействия антинейтрино является обратный бета распад (IBD реакция (1)), которая создает два детектируемых сигнала: первый сигнал вызывается позитроном (видимая энергия $E_{vis} = Ev_e - 1.8 \text{ M}$ эВ + 2 m_ec²), следующий за ним – захватом нейтрона (1а) (E_{γ} =2.2 MэB, среднее время захвата около 185 мкс). Эта реакция дает основной вклад в отклик детектора при реализации МСК. Протоны и альфа-частицы в реакциях v_e (v_e)Fe и v_iFe от возбужденных ядер Co*, Mn* и Fe* не регистрируются из-за квэнчинг-

эффекта в сцинтилляторе. Сечения реакций взаимодействия нейтрино с веществом детектора LVD представлены на рис.21 а и б.

Благодаря наличию в своем составе ядер углерода и железа детектора LVD чувствителен также к нейтрино, взаимодействующим посредством реакций (2, 4, 5, 7, 8). В реакциях (4), (7), (8) участвуют нейтрино всех ароматов.



Рисунок 21. а Сечения взаимодействия нейтрино для реакций (1) – (4), (8). б Сечения взаимодействия нейтрино для реакций (1), (5), (6).

В эксперименте проводится анализ данных в режимах on-line и off-line.

Поиск кластеров кандидатов-событий в режиме *on-line* осуществляется во временном окне $\Delta t < 20$ с и с энергией импульсов выше пороговой $E_{\rm th} > 4$ МэВ. Число импульсов в кластере пропорционально массе детектора и эффективности регистрации позитрона. Информация о кластерах LVD с низкой частотой имитации в режиме *on-line* посылаются в систему SNEWS. LVD активно работает в этой системе и посылает свои данные в режиме on-line с 2005 года. За время существования системы SNEWS сигнала-оповещения не производилось.

Поиск кластеров ve-событий *off-line* осуществляется в течение временного окна с длительностью Δt до 100 с шагом 100 мс. Каждый кластер характеризуется Δt и количеством событий внутри Δt . Для каждого кластера, была определена частота имитации F_{im} . За период с 1992 по 2017 год ни один из обнаруженных кластеров не имеет частоты имитации менее 1/100 г⁻¹. Таким образом, можно сделать вывод о том, что не было зафиксировано никаких сигналов от вспышек сверхновых, на расстоянии до 25 кпк в период наблюдения. Предел на частоту вспышек сверхновых в нашей галактике составляет менее 0.094 коллапсов в год при 90% С.L.

Поиск нейтринных всплесков от коллапсирующих звёзд по экспериментальным данным установок LVD и БПСТ. Кроме этого ведется поиск совпадений в детекторах LVD и БПСТ. Анализируется распределение количества совпадений событий за сутки.

При поиске нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звёзд проводится отбор событий, которые могут быть вызваны взаимодействием нейтрино в детекторе. Однако помимо регистрации взаимодействия нейтрино, в детекторе также регистрируются события, имитирующие такие взаимодействия. Эти события регистрируются постоянно, образуя фон и затрудняя идентификацию нейтринной вспышки. С увеличением длительности непрерывной работы детектора повышается точность определения скорости счёта фоновых событий. Скорость счёта фоновых событий является основной характеристикой, от которой зависит вероятность имитации регистрации нейтринной вспышки (кластера импульсов во временном окне малой длительности) в ходе проведения поискового эксперимента. С целью уменьшения фона детекторы экранируют большим количеством вещества: сцинтилляционные детекторы размещают в специализированных подземных низкофоновых лабораториях (LVD, БПСТ, Borexino), черенковские детекторы, как правило, размещают глубоко под водой (Байкальский нейтринный телескоп, Antares) или глубоко в толще льда (IceCube). На сегодняшний момент можно считать достоверной регистрацию нейтрино только от Сверхновой SN1987A из галактики Большое Магелланово Облако, поскольку гравитационный коллапс звезды был подтверждён оптическими наблюдениями.

Общей целью детекторов LVD и БПСТ является поиск нейтрино от гравитационных коллапсов звёзд. В настоящее время проведён поиск совпадений импульсов в детекторах LVD и БПСТ. Время между совпавшими импульсами не превышает 1 с. Точность привязки регистрации событий в детекторе LVD к абсолютному времени составляла до 2012 года 100 нс, после 2012 года точность привязки была улучшена до 2.5 нс. В детекторе БПСТ точность временной привязки составляет менее 0.2 мс. В детекторах LVD и БПСТ используется одинаковый жидкий сцинтиллятор на основе уайт-спирита. Благодаря использованию данного сцинтиллятор а характеристики детекторов остаются практически неизменными.

В ходе анализа экспериментальных данных были получены значения скоростей счёта в детекторах: 0.0428 c^{-1} в LVD и 0.0096 c^{-1} в БПСТ, соответственно. На основе измеренных скоростей счёта фоновых событий проводилось моделирование набора экспериментальных данных. Результатом каждого шага моделирования является значение временного интервала до предыдущего события. Соответственно, чтобы получить значение временного интервала между текущим событием и началом отсчёта, нужно просуммировать все ранее сгенерированные значения временных интервалов. Абсолютное время событий (время между понадобится началом отсчёта И первым импульсом) для совместного анализа

последовательностей, описывающих регистрацию фоновых событий в детекторах LVD и БПСТ. Абсолютное время последнего промоделированного события соответствует суммарному времени набора статистики в эксперименте, генерация случайных чисел прекращается при превышении порогового значения абсолютного времени. Общее время набора статистики составило 3062 дня (1 день равен 1 суткам), причём, если в течение суток один из детекторов надлежащим образом не работал в штатном режиме (например, из-за профилактики или ремонта отдельных регистрирующих элементов), то данные за эти сутки исключались из анализа. На **рис.1.8, 1.9** представлены распределения рассчитанных методом Монте-Карло и экспериментально измеренных временных интервалов между фоновыми импульсами в детекторах LVD и БПСТ. Как видно из представленных рисунков, экспериментальные и полученные методом Монте-Карло значения временных интервалов не имеют явно выраженных расхождений.



Рисунок 22. Распределения длительности временных интервалов между фоновыми

импульсами в детекторе LVD



Рисунок 23. Распределения длительности временных интервалов между фоновыми импульсами в детекторе БПСТ

После построения распределения временных интервалов был проведён поиск совпадений между фоновыми импульсами в экспериментальных данных и в полученных методом Монте-Карло последовательностях. Длительность интервала между «совпавшими» импульсами не превышает 1 с. В результате, были построены распределения количества совпадений фоновых импульсов в сутки и в час. Исходя из полученных данных о построенных распределениях, можно вычислить их характеристики: математическое ожидание и дисперсию.

На основе данных экспериментального и расчётного распределений, были получены следующие значения математического ожидания и дисперсии: $(M[x])_{3\kappa cn}=70.3, (M[x])_{pacy}=69.8, (D[x])_{3\kappa cn}=71.8, (D[x])_{pacy}=70.1 для суточного интервала и <math>(M[x])_{3\kappa cn}=2.91, (M[x])_{pacy}=2.93, (D[x])_{3\kappa cn}=3.02, (D[x])_{pacy}=3.09 для часового интервала. Математическое ожидание и дисперсия соответствующих распределений примерно совпадают. Это служит признаком того, что измеренное количество совпадений в сутки и в час описывается законом Пуассона. Величина стандартного отклонения в этом случае равна <math>\sqrt{D[x]}$, три стандартных отклонения определяют разброс измеренной случайной величины с вероятностью более 99%. Теперь построим распределения Пуассона, описывающие вероятности количества совпадений в сутки и в час при средних скоростях счёта совпадений, равных 70.1 сутки⁻¹ и 2.92 час⁻¹.

Для величин 70.1 сутки⁻¹ и 2.92 час⁻¹ были рассчитаны вероятности получения различного количества совпадений в сутки и в час. Умножая соответствующие вероятности на общее количество временных интервалов (суточных или часовых), получаем ожидаемые значения количества совпадений. Полученные распределения представлены на **рис. 1.10** совместно с экспериментальными и рассчитанными методом Монте-Карло распределениями. Из данных распределений легко видеть, что экспериментально полученные значения количества совпадений в сутки и вычисленные значения количества совпадений за сутки и вычисленные значения количества совпадений за сутки и вычисленные значения количества совпадений за сутки и рассчитанные значения количества совпадения Пуассона равны в пределах погрешности. Это означает, что экспериментально определённое и рассчитанное методом Монте-Карло количество совпадений фоновых импульсов в сутки распределено по закону Пуассона. Столь хорошее согласие расчёта и эксперимента свидетельствует о стабильном функционировании детекторов LVD и БПСТ на протяжении более 8 лет.



Рисунок 24. Распределения количества совпадений фоновых импульсов в час и в сутки в детекторах LVD и БПСТ

Изучение фона при поиске частиц темной материи на экспериментах в подземной лаборатории Гран-Сассо.

Одной из экспериментальных задач, решаемых на установке LVD, является изучение мюонной компоненты космических лучей под землей. Изучение атмосферных мюонов на больших глубинах позволяет получить информацию о первичном спектре космических лучей и взаимодействиях мюонов при высоких энергиях. С другой стороны, мюоны космических лучей являются основным источником фона в экспериментах по поиску редких событий, проводимых глубоко под землей. На основе данных LVD сделан вывод об отсутствии аномалий в первичном спектре космических лучей в области энергий 10¹³ - 3·10¹⁴ эВ, а также поставлено ограничение на процесс прямой генерации мюонов. С помощью групп мюонов исследуется спектр космического излучения в области энергий 10¹⁵ - 10¹⁶ эВ (область так называемого колена - область изменения показателя спектра космических лучей). Данные LVD позволяют получить угловое распределение мюонов $N_{\mu}(\phi, \cos\theta)$. Угловое распределение и профиль горы Гран Сассо (толщина грунта, которую пересекают мюоны) определяют величину интенсивности мюонов в зависимости от глубины в диапазоне от 3000 до 20000 м.в.э. За 25 лет наблюдений средняя величина интенсивности мюонов составила $I_{\mu}^{0} = (3.31 \pm 10^{-6})$ 0.03) 10⁻⁴ µ м⁻² с⁻¹. За этот же период получены сезонные модуляции потока мюонов космических лучей. Найден период модуляции $T = 367 \pm 15$ дней (~1 год), средняя амплитуда

модуляций 1.5 %, максимум интенсивности приходится на июль месяц ($t_0 = 185 \pm 15$ дней). Температурный коэффициент, определенный из соотношения $\frac{\Delta I_{\mu}}{I_{\mu}^0} = \alpha_T \frac{\Delta T_{eff}}{T_{eff}^0}$, составил $\alpha_T =$

0.95±0.02. На рис.25 представлена зависимость изменения интенсивности мюонов от изменения эффективной температуры. Взаимосвязанные модуляции интенсивности мюонов и эффективной температуры в процентах за период с 1993 по 2017 год показаны на рис.26.



Рисунок 25. Корреляция между потоком мюонов и температурными изменениями, красная линия – линейный фит.



Рисунок 26. Взаимосвязанные модуляции интенсивности мюонов и эффективной температуры за период с 1993 по 2017 год.

Нейтроны, генерируемые мюонами космических лучей. Мюоны, проходя через детектор LVD, генерируют ядерные и электромагнитные ливни, в составе которых рождаются нейтроны за счет процессов π А-взаимодействия (ядерные ливни) и γ А-взаимодействия (электромагнитные ливни). Нейтроны замедляются в сцинтилляционных счетчиках и захватываются либо протонами n + p \rightarrow d + γ , E γ = 2.2 MэB, либо железом n + Fe \rightarrow Fe + γ , $\langle E\gamma \rangle \approx 7$ MэB. Регистрация нейтронов производится по γ – 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 МэB) во временном окне 50 – 550 мкс после прохождения мюона.

Выход нейтронов Y_n (удельное число нейтронов, генерированных 1 мюоном в 1 г/см²) в сцинтилляторе, железе и свинце был измерен с помощью LVD и опубликован в работе [N. Agafonova on behalf the LVD Collaboration "Measurement of the muon-induced neutron yield in Fe and Pb using Large Volume Detector at LNGS" Proceedings of the Seventeenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics "Particle Physics at the Year of Light", Moscow, Russia 20-26 August 2015 (Editor Alexander I. Studenikin World Scientific, Singapore, 2017), p. 374]. Экспериментальные результаты измерений представлены в Табл. 3.

D	Измерение LVD	Моделирование,
Вещество	Y_{n} , $n/\mu/$ г/см ²	Y_n , <i>n</i> /μ/ Γ/см ²
Сцинтиллятор, С _n H _{2n}	3.6 ± 0.01 (стат) ± 0.3 (сист) $\times 10^{-4}$	3.0×10^{-4}
Железо, Fe	15 ± 2 (стат.) ± 1 (сист.) $\times 10^{-4}$	14.9×10^{-4}
Свинец, Рb	55± 20 (стат.) × 10 ⁻⁴	47.6× 10 ⁻⁴

Таблица **3** Измеренные выходы нейтронов, генерируемых мюонами с <E> = 280 ГэВ

Для определения зависимости выхода нейтронов от атомного веса материала было проведено моделирование процесса прохождения мюонов через мишень простой формы с однородным распределением плотности и бесконечными размерами в направлении, поперечном по отношению к направлению движения мюона. Моделирование проводилось для средней энергии 280 ГэВ с помощью программного пакета Geant4. Результаты расчетов для сцинтиллятора, железа и свинца приведены в последней колонке таблицы 3. Выходы нейтронов для других веществ опубликованы в работе [K. V. Manukovsky, O.G.Ryazhskaya, N. M. Sobolevsky and A. V. Yudin,"Neutron Production by Cosmic-Ray Muons in Various Materials" arXiv:1703.06407 [physics.ins-det]].

За 15 лет работы трех башен LVD измерены сезонные вариации потока нейтронов, генерируемых мюонами на глубине LVD [N. Yu. Agafonova (on behalf of the LVD Collaboration) "Measurement of the muon-induced neutron seasonal modulation with LVD" arXiv:1701.04620 (XXV ECRS 2016 Proceedings - eConf C16-09-04.3)]. На рис. 2.3 представлен сезонный ход изменения удельного числа нейтронов, деленного на среднее значение в год. Амплитуда вариаций составила $\delta N_n/N_n = 0.077 \pm 0.008$, период T = 12 мес., фаза – максимум интенсивности – приходится на конец июля $t_0 = 7.0 \pm 0.4$ (стат.) ± 0.5 (сис.) мес.

Измеренные характеристики вариаций нейтронов указывают на сезонные вариации средней энергии мюонов 280 ГэВ на глубине LVD с амплитудой 10%: $\delta E_{\mu} = 28$ ГэВ.

Ранее предполагалось, что поток космогенных нейтронов пропорционален интенсивности мюонов с амплитудой вариации на глубине LVD 1.5%. Нами показано, что

поток нейтронов имеет амплитуду сезонных вариаций в 6 раз большую, так как энергия мюонов также варьируется с амплитудой 10%.



Рисунок 27. Вариации удельного числа нейтронов в месяц. Начало – 1 января 2001 года. Точки – экспериментальные данные LVD, кривая – аппроксимация законом $N(t) = 1 + \delta N_n / N_n \times \cos[2\pi (t - t_0)/T].$

7. ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ И ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ 10¹¹ –

10²⁰ ЭВ

Гамма-астрономия. В 2017 году проведена пробная обработка данных для Крабовидной туманности. Пробная она в том смысле, что обработан выбранный отрезок времени для проверки работо-способности подготовленных на предыдущем этапе работ по гранту программ и использованы разные методы обработки данных. Анализ проводился для временного интервала с 1 января по 20 августа 2017 г. (100 суток чистого времени). Получено число событий в ячейке 6° х 6°/cosô (в экваториальных координатах) вокруг координат источника, а также число событий во всех таких ячейках полосы склонений $22^{\circ} \pm 3^{\circ}$. Всего таких ячеек вдоль траектории источника 55 и среднее число событий для всей полосы склонений (т.е. фон) составляет 10547. Распределение всех ячеек по числу событий неплохо описывается распределением Пуассона. Удивительно, но даже на таком ограниченном материале для ячейки Крабовидной туманности наблюдается некоторое превышение: 10866 событий, так что чистое превышение над средним равно 319 событиям или 3.1 стандартного отклонения. Обработаны данные эксплуатации старой установки Ковер-2 за 9.2 лет чистого времени.

Вариации космических лучей во время гроз и сопутствующие эффекты. Во время грозового сезона 2017 г. проводилась работа по обеспечению регулярного функционирования внешних удалённых наблюдательных пунктов с видеокамерами. Вёлся непрерывный визуальный просмотр видеоматериала.

Научные результаты:

- Получены новые верхние пределы на поток диффузных гамма-квантов космического происхождения при пороговой энергии 1.3 ПэВ.

- На основании теоретического анализа кривой зависимости интенсивности мюонов от напряженности приземного электрического поля определено зарядовое отношение мюонов при пороговой энергии около ста МэВ. Данные о зарядовом отношении в этой области очень немногочисленны. Полученный результат хорошо согласуется с имеющимися экспериментами, хотя получен очень нетрадиционным методом.

8. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ВЫСОКОГОРНОЙ УСТАНОВКИ PRISMA-YBJ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОЕКТА LHAASO

Предложенный нами ранее новый метод исследования ШАЛ и фоновых потоков тепловых нейтронов получил дальнейшее развитие. В 2017 г. проводились организационнометодические работы, а также набор и обработка экспериментальных данных, полученных с помощью разработанных нами нейтронных детекторов (эн-детекторов) по теме «Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO».

- С помощью нашей глобальной сети из эн-детекторов в 2017 г. были получены следующие новые данные по изучению вариаций нейтронных фоновых потоков в различных геофизических условиях:

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

- По данным установки PRISMA-YBJ в Тибете обнаружен долговременный тренд роста природного нейтронного фона на уровне около 4% в год за последние 3 года, который связан, по-видимому, с очередным циклом солнечной активности. Эти результаты были доложены на 35-й Междунапродной конференции по космическим лучам в Корее.

По программе изучения Широких атмосферных ливней (ШАЛ):

- Совместно с ЗАО «Люминофор» разработан новый светосостав ЛРБ-2 (сцинтиллятор) на основе натурального бора для регистрации тепловых нейтронов, с увеличенным световыходом. С использованием этого светосостава изготовлен первый кластер из 16 эн-детекторов будущей установки PRISMA-LHAASO в Тибете. Кластер работает в тестовом режиме. Идет отладка системы сбора данных.

- Совместно с китайской стороной начато создание полноценного прототипа из 4-х кластеров по 16 эн-детекторов на высоте 4400 м над уровнем моря - установки PRISMA-LHAASO, с возможностью ее расширения в дальнейшем.

- Кроме того, была создана вариационная установка из 4-х эн-детекторов для изучения фоновых потоков тепловых нейтронов: в Лхасе (Тибетский университет).

- На установках PRISMA-YBJ и PRISMA-32, эксплуатируемых совместно с китайскими коллегами с сотрудниками МИФИ, проводился непрерывный набор и анализ

данных, по изучению ШАЛ методом регистрации тепловых нейтронов на двух существенно разных уровнях наблюдения. 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, что соответствует степенному первичному спектру с интегральным показателем 1.7-1.75. Восстановленный по этим данным спектр и химический состав космических лучей при энергиях выше 1 ПэВ хорошо согласуется со спектром и химсоставом к. л., полученными в прямых измерениях при энергиях ниже 1 ПэВ. По этим результатам были подготовлены доклады на конференциях и опубликованы 4 статьи.

В 2017 г. было опубликовано 12 статей в журналах. Опубликован 1 электронный препринт. Подготовлено 4 доклада на Международные конференции и 1 приглашенный доклад на Российскую конференцию.

9. ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП (ГГНТ) БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Анализ результатов измерения приходящего на Землю интегрального потока солнечных нейтрино с энергией > 0.233 МэВ.

Поиск возможных временных и сезонных вариаций солнечного нейтринного потока. В 2017 году был выполнен анализ по поиску возможных временных и сезонных вариаций скорости захвата нейтрино на галлии в солнечных данных за весь период наблюдений в эксперименте SAGE на ГГНТ. Поиск периодичностей выполнялся методом периодограммы Ломба-Скаргла (LS) для неравномерно распределенных данных.

На Рисунке 1 представлена периодограмма спектра мощности LS, полученная для 266 солнечных измерений за период с 01.1990 по 10.2017. В качестве времени солнечных измерений использовалось среднее время экспозиции. Диапазон частот периодограммы 0.04 – 9.6 /год. Частота 0.04 /год соответствует одному полному периоду – 27.7 лет, а частота 9.6 /год (т.н. две частоты Найквиста), вычисляемая из отношения полного числа наборов данных измерений - 266 к полному интервалу времени измерений - 27.7 лет, соответствует периоду 38.03 дня. В периодограмме найден один пик с максимальной мощностью 6.28 при частоте 8.47 /год, что соответствует периоду 43.1 дня, вероятность, что этот пик является случайным шумом (False Alarm Probability - FAP), составляет 55%.



Рисунок 28. Периодограмма спектра мощности Ломба-Скаргла для данных SAGE за период с 01.1990 по 10.2017. Горизонтальные пунктирные линии обозначают уровень значимости мощности.

В солнечных данных ГГНТ за период с 01.1990 по 10.2017 метод периодограмм LS не выявил каких-либо статистически значимых пиков мощности, соответствующих временным модуляциям в данных.

С целью поиска модуляций в данных, объединенных по годам (Рисунок 2), был применен метод χ^2 в предположении, что данные соответствуют постоянной скорости захвата 64.5^{+2.4}-2.3 SNU. Получена величина χ^2 /DOF=17.52/27 = 0.65, вероятность которой составляет 91.8%, что подтверждает предположение о постоянстве потока солнечных нейтрино с вероятностью 91.8%.

С целью поиска сезонных вариаций был проведен анализ данных объединенных по сезонам (зима, весна, лето, осень), а также по периодам перигелий-афелий (зима-лето). В анализ летнего периода, вошло 242 набора данных, а зимнего – 250; разность скоростей захвата временных периодов зима-лето составила -1.5 ± 4.6 SNU, что говорит об отсутствии в данных вариаций, связанных с эффектом день-ночь.

Анализ по поиску возможных временных модуляций и сезонных вариаций скорости захвата нейтрино на галлии, примененный для 266 солнечных измерений ГГНТ, за период наблюдений 27.7 лет, не выявил в данных каких-либо статистически значимых временных или сезонных вариаций. Данные хорошо согласуются с предположением о постоянстве потока солнечных нейтрино.

Продолжение измерений скорости захвата солнечных нейтрино на установке с двухзонной галлиевой мишенью.

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

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

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

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

- перед солнечной экспозицией вносится в два раза больше носителя, по ~210-250 мкг в галлиевые мишени цилиндра и сферы;

- извлечение проводится раздельно из сферы и цилиндра с использованием раздельных технологических и транспортировочных систем, что несколько удлиняет время процесса;

- извлеченные из галлиевых мишеней цилиндра и сферы атомы ⁷¹Ge помещаются в индивидуальные пропорциональные счетчики, счет проводится раздельно.

В соответствии с программой ежемесячных измерений скорости захвата солнечных нейтрино в 2017 году выполнено на Установке 12 извлечений. Все измерения поставлены на счет в системы регистрации.

Получены предварительные результаты объединенного анализа данных с января по сентябрь 2017 года. В анализ включены измерения, завершенные или имеющие продолжительный счет (в результатах приводятся только статистические ошибки):

53.1^{+18.3}-16.8 SNU - скорость захвата в галлиевой мишени внешнего цилиндра,

65.9^{+78.5}-65.9 SNU - скорость захвата в галлиевой мишени внутренней сферы,

53.8^{+17.8}-_{16.4} SNU - объединенный результат, сфера + цилиндр.

Полученные величины хорошо согласуются между собой.

Объединенный результат анализа скорости захвата солнечных нейтрино на галлии в Установке за 2015 - 2017 годы составляет $64.8^{+9.8}$ -9.3 SNU, что хорошо согласуется с величиной, полученной из данных ГГНТ за период наблюдения с января 1990 года по декабрь 2014 года, 64.6 ± 2.4 SNU.

Величина скорости захвата нейтрино за весь период наблюдения с января 1990 года по октябрь 2017 (266 измерений, измерения из сферы не включены в объединенный анализ солнечных данных) составляет **64.5**^{+2.4}-2.3 SNU (приведены только статистические ошибки).

На Рисунке 29 представлены результаты 266 измерений, объединенных по годам.



Рисунок 29. Результаты 266 солнечных измерений, объединенных по годам. Заштрихованная область соответствует объединенному результату **64.5**^{+2.4}-2.3 (стат.) SNU. Вертикальные линии в каждой точке соответствуют статистической ошибке 68%, горизонтальные – временному интервалу объединенного анализа измерений. Зеленый цвет – предварительный результат измерений 2017 г в цилиндрической мишени Установки: 53.1^{+18.3}-

Регенерация галлия для сохранения чувствительности ГГНТ.

В соответствии с планами НИР в 2017 году проводились работы по регенерации галлия. На участке регенерации металлического галлия из солянокислых растворов хлорида галлия, образующихся в результате работы ГГНТ, получено около 1000 кг чернового галлия (галлиевая мишень №3). Выход чернового галлия составил 94,5%, что соответствует «Нормам технологического выхода чернового галлия из растворов хлорида галлия на установке регенерации».

Разработка и монтаж дополнительного оборудования для безопасного управления и размещения высокоинтенсивного источника в специальной облучательной установке для исследования осцилляционных свойств нейтрино на очень коротких расстояниях.

Продолжались работы по подготовке условий для выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино. Было разработано оборудование, обеспечивающее безопасную работу с интенсивными источниками нейтрино.

В интервалах между облучениями источником галлиевых мишеней Установки (в периоды проведения извлечений) будут проводиться измерения активности источника германиевым ППД. Для обеспечения безопасной и эффективной работы при проведении измерений с ППД разработано оборудование, включающее свинцовую и вольфрамовую защиту с двумя крышками: сверху, чтобы устанавливать и удалять источник из оборудования, и сбоку, чтобы источник был полностью открыт в сторону ППД. Внутри защиты расположена
вращающаяся платформа, дающая возможность поворота источника внутри защиты на фиксированные углы (45⁰, 90⁰, 180⁰) по вертикальной оси.

В настоящее время осуществляется монтаж разработанного оборудования (Рисунок 30).



Рисунок 30. Монтаж оборудования. Вид на вращающуюся платформу для размещения источника внутри защиты

10. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА КОМПЛЕКСЕ УСТАНОВОК БПСТ

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. Полное живое время работы установки в 2017 году (с 01.01 по 31.12) составило 7632 часов (87.1% календарного времени). После восстановления электроснабжения БПСТ на установке были проведены работы по запуску электронных устройств телескопа. Потери во времени набора из-за стихийного бедствия составили 32.4 суток. На рис.31 приведено количество 15-минутных интервалов, в течение которых на БПСТ проводился набор информации, за каждые сутки 2017 года



Рисунок 31. Количество 15-минутных интервалов, в течение которых на БПСТ проводился набор информации, за каждые сутки 2017 года.

За 2017 было отремонтировано 163 сцинтилляционных счетчиков, настроены пороги дискриминаторов и коэффициенты усиления у 92 счетчиков, заменены 3 ФЭУ. Было проведено два сеанса контрольных измерений и подстройки (при необходимости) коэффициентов усиления ФЭУ счетчиков на двух горизонтальных плоскостях и в двух поясах вертикальных плоскостей (всего 1332 счетчика). Проводились работы по поддержанию работоспособности системы сбора информации БПСТ, в том числе ремонт годоскопа импульсных каналов (ГИК) и годоскопа амплитудных каналов (ГАК).

Продолжалась работа по созданию нового годоскопа импульсных каналов (ГИК) для БПСТ. К настоящему времени изготовлены все электронные блоки нового ГИК, именно,

распаяны, собраны в конструктив КАМАК и настроены на физическом уровне 80 кассет приема информации и 4 кассеты управляющих блоков. Для контроля электронных блоков нового ГИК ведется разработка тестового программного обеспечения.

Продолжался набор экспериментальных данных по программе регистрации мюоннных нейтрино из нижней полусферы. В 2017 году чистое время регистрации по нейтринной программе составило 7632 часов (87.1% календарного времени).

При отборе нейтринных событий используется отношение скорости света к скорости мюона пересекающего установку. Для мюонов, идущих сверху вниз, значения этого параметра группируются около величины +1, а мюоны, идущие снизу вверх, имеют значения параметра около -1. Кандидатами на нейтринные события считаются только такие события, когда можно восстановить одну траекторию и этот параметр находится в диапазоне -1.3÷-0.7, хотя любые события с отрицательным значением параметра подвергаются визуальному анализу. Распределение траекторных событий по отношения скорости света к скорости мюона на БПСТ за 2017 года приведено на рис. 32.

За 2017 год выделено 42 кандидата в нейтринные события. Полное живое время набора информации по нейтринной программе за весь период с 1978 года составляет 276383 часа (31.53 года). Всего за это время было зарегистрировано 1658 событий из нижней полусферы.



Рисунок 32. Распределение траекторных событий на БПСТ за 2017 года по параметру с/v – отношению скорости света к скорости мюона, пересекающего установку.

По информации БПСТ за 2017 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, чистое время набора по этой задаче составило 301.0 сутки – 80.5 % от календарного времени за период с 01 января 2017 по 31декабря 2017 года. Потери во времени из-за стихийного бедствия составили 32.4 суток.

БПСТ состоит из 8 плоскостей, на которых расположены 3184 сцинтилляционных счетчика. Метод регистрации нейтринного излучения основан на регистрации антинейтрино в реакции обратного бета-распада. Т.к. средняя энергия позитрона \approx 15 МэВ, то, как правило, будет срабатывать только один счетчик на установке. Ожидаемое событие от коллапса звезды должно выглядеть в установке как серия одиночных срабатываний счетчиков (событие "1 из 3200" на БПСТ) в течение времени нейтринной вспышки (предполагаемая длительность которой составляет 10 – 20 секунд). Поэтому для поиска нейтринной вспышки от коллапсирующей звезды используется метод поиска кластера одиночных срабатываний счетчиков на установке в скользящем окне длительностью 20 секунд. Т.к. используется событие в кластере, и сгусток событий, вызванный нейтринной вспышкой, гарантированно не будет пропущен.

В течение многих лет для поиска нейтринных всплесков использовались только 3 нижние горизонтальные (внутренние) плоскости БПСТ, которые содержат 1200 счетчиков (по 400 на каждой плоскости) общей массой 130 тонн, порог срабатывания счётчика 8 МэВ. Это объясняется хорошей защитой внутренних плоскостей от проникающих мюонов, когда внешняя часть работает как защитный экран, на антисовпадения с внутренними плоскостями. Фоновый темп счета событий, когда срабатывает только один счетчик на установке, на внутренних плоскостях равен 0.02 c^{-1} , в то время как фоновый темп счета одиночных срабатываний на внешних плоскостях составляет 1.4 сек⁻¹. Для данного варианта поиска кандидатом на нейтринную вспышку является событие с 9-ю одиночными срабатываниями на внутренних плоскостях в течение 20 секунд, т.к. скорость образования кластеров из девяти фоновых событий равна 6.9×10^{-3} в год. За все время наблюдения до 2017 года кластеров с такой и большей кратностью на БПСТ обнаружено не было.

Проведена обработка всей набранной в 2017 году информации, обработано 439097995 событий, из них отобрано 597128 одиночных события, из которых удовлетворило критериям отбора 536179 событий. Кластер из 9-и одиночных событий был зарегистрирован 31.10.2017, при этом 8 событий зарегистрировано в течение 1.3554 сек, а девятое отстоит на 19 секунд, то есть практически на границе 20-секундного окна. Все сработавшие счетчики расположены на двух внутренних плоскостях установки из трех. Непосредственно перед этим кластером, за 6.8 мс до него, на БПСТ был зарегистрирован мощный каскад, с энергией ~12 ТэВ. Каскады такой

энергии достаточно редкие, они происходят 3 - 4 раза в год. Подробный анализ информации с БПСТ позволяет утверждать, что кластер из 8 событий генетически связан с мощным каскадом. Именно, эти одиночные срабатывания вызваны распадами нестабильных изотопов, которые были рождены в сцинтилляторе при неупругих взаимодействиях каскадных частиц с ядрами углерода, и поэтому данный кластер не может являться кандидатом на регистрацию нейтринного всплеска. Таким образом, претендентов на кластер нейтринных сигналов от коллапсирующих звёзд по экспериментальным данным 2017 года не было обнаружено. Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2017 года составляет 32.1 года, верхнее ограничение на среднюю частоту коллапсов в Галактике на 90% доверительном уровне по данным БПСТ составляет 0.072 год⁻¹.

С целью увеличения массы мишени (и, следовательно, радиуса чувствительности БПСТ) для задачи регистрации нейтринной вспышки от Сверхновой с коллапсом ядра в 2017 году было выполнено изучение событий "1 из 3200" для пяти внешних плоскостей установки (4 вертикальных и верхняя горизонтальная плоскость). В результате был определен массив из 1012 счетчиков внешних плоскостей, в котором темп счета событий "1 из 3200" достаточно низкий: 0.12 сек⁻¹. Этот массив из 1012 счетчиков (масса 110 т) можно использовать как второй - независимый детектор - который ниже будем называть D2. Детектор, состоящий из 3-х внутренних плоскостей (масса 130 т), назовем D1. Разработан новый алгоритм регистрации нейтринной вспышки, в котором используются совпадения двух независимых детекторов D1 и D2. Именно, поиск сигнала проводится в скользящем 20-секундном окне в детекторе D1 (триггерная масса), а подтверждением реального сигнала является всплеск одиночных событий в детекторе D2 в течение 10-секундного интервала, начало которого совпадает с началом кластера в D1. Интервал длительностью 10 секунд для детектора D2 выбран для уменьшения числа фоновых событий, при этом большинство нейтринных событий от вспышки – ≥80% – будет зарегистрировано (это следует из результатов моделирования и подтверждается временным распределением событий от SN1987 на установках К-II и IMB). Новый алгоритм позволяет понизить порог по числу одиночных срабатываний на внутренних плоскостях в 1.5 раза (с 9 до 6), что приводит к увеличению радиуса чувствительности в $\sqrt{1.5}$ = 1.22 раза, т.е. до ~ 24 кпк.

С апреля 2017 года программа поиска нейтринных вспышек на БПСТ работает в режиме квазиреального времени, в котором обработка набранной за 15-минутный интервал информации проводится сразу после её записи на файл-сервер. В режиме работы реального/квазиреального времени участники эксперимента не имеют возможности провести дополнительный анализ данных, что предъявляет очень жесткие требования к алгоритму поиска возможных нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд. Именно, необходимо

исключить ложные алерты, которые могут появляться из-за работы установки в нештатном режиме. В настоящее время работает вариант программы, в котором для выработки алерта требуется совпадение кластеров в независимых детекторах D1 и D2 БПСТ, при выполнении ряда требований к работе установки (в том числе, анализируется предыстория события – кандидата на нейтринную вспышку).

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на ливневой установке "Ковер-2" по всем физическим задачам. После стихийного бедствия были проведены работы по установке поврежденного выносного пункта (ВП) на новое место и ремонту всех коммуникаций. Кроме того, после его подключения пришлось вводить его новые координаты во все программы обработки экспериментальных данных.

Проводился непрерывный мониторинг информации, по результатам которого производилась настройка и ремонт сцинтилляционных счетчиков и регистрирующей электроники. Было отремонтировано и настроено 70 логарифмических LC–преобразователей центральной части установки и 10 RC–преобразователей мюонного детектора. Были отремонтировано 12 детекторов (8 жидкостных и 4 пластических), причиной которых явилось выхода из строя делителей и ФЭУ-49 (заменены 6 ФЭУ). Был проведен ремонт 6-канального временного преобразователя TDC-370.

Чистое время набора информации составляет 93 % календарного времени для задачи регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ; 95% – для задачи регистрации мюонной компоненты ШАЛ на мюонном детекторе (МД); 95% – для регистрации вторичной нейтронной компоненты на нейтронном мониторе (НМ).

Регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ происходит по тригтеру М1, который вырабатывается при совпадение сигналов с 4-х ВП, установленных на расстояниях 30 м от Ковра, с сигналом от Ковра с порогом 150 р.ч. Частота этих событий 1.2 сек⁻¹, пороговая энергия для этих ливней $\approx 5 \times 10^{13}$ эВ.

На рис.33 приводятся среднесуточные значения числа триггеров М1, приведенные к 20 минутам набора, за 343 дня 2017 года. Нет информации с 1-8 суток и 37-42 суток по техническим причинам. Следует заметить, что электроснабжение установки "Ковер-2" было восстановлено уже на пятые сутки после стихийного бедствия, поэтому потери во времени набора информации на установке заметно меньше, чем на других установках комплекса. Но начиная с 270-х суток частота триггера М1 выросла на 5%. Это вызвано уменьшением до 20 метров расстояния между 3-м ВП, который после стихийного бедствия был передвинут на новое место, и центром Ковра (ранее было 30 метров). Новая конфигурация установки увеличивает эффективность регистрации ливней малой мощности.



Рисунок 33. Среднесуточные значения числа ливневых триггеров М1 установки "Ковер-2", приведенных к 20 минутам набора, за 343 дня 2017 года.

В 2017 году на установке "Андырчи" продолжались восстановительные работы после выхода из строя детекторов по причине замыкания фазы на заземлённый корпус в неисправном электрораспределительном щитке. На конец августа в рабочем состоянии были 32 детектора из 36. Устаревшие и вышедшие из строя старые низковольтные источники питания были заменены на современные источники, имеющие защиту от короткого замыкания и управляемую систему ограничения по выходному току.

После стихийного бедствия и возобновления подачи электропитания было обнаружено, что силовой кабель подачи напряжения на установку «Андырчи» поврежден (нарушение изоляции кабеля), что приводило к отсоединению одной фазы 3-фазной сети и к перекосу напряжений на других фазах. Это, в свою очередь, вызывало перенапряжение и выход из строя электронных блоков на установке. После восстановления электроснабжения на установке были проведены работы по запуску электронных устройств, в том числе проведен ремонт 40-канального блока управления высоковольтными источниками и 40-канального блока контроля за управляющими токами высоковольтных источников. С 12 декабря на установке «Андырчи» ведётся набор данных.

11. НИЗКОФОНОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В БНО

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Поиск солнечных адронных аксионов». Научный руководитель к.ф.-м.н. Альберт Мусаевич Гангапшев.

Результаты по ⁸³Кг. Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов ядром ⁸³Кг в зависимости от вероятности излучения аксиона в данном переходе (ω_A/ω_γ), параметра (g₃-g₀)², описывающего аксионнуклонное взаимодействие, и массы аксиона в KSVZ-модели может быть представлена как:

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

Количество зарегистрированных γ-квантов, следующих за поглощением аксиона, определяется массой мишени, временем измерений и эффективностью регистрации детектора, в то время как вероятность наблюдения пика с энергией 9.4 кэВ зависит от уровня

фона экспериментальной установки. Для регистрации рентгеновских и γ -квантов, конверсионных и оже-электронов, возникающих в результате разрядки возбужденного уровня с энергией 9.4 кэВ, используется большой медный пропорциональный счетчик, заполненный криптоном, обогащенным по изотопу ⁸³Кг до 99,9%. Рабочий объем счетчика составляет 8.77 л, давление газа — 1.8ат. Масса изотопа ⁸³Кг в рабочем объеме 58.5 г. Счетчик окружен пассивной защитой из меди (20 см), свинца (20 см) и полиэтилена (8 см). Установка расположена в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900 м.в.э. (НЛГЗ-4900), где поток мюонов космических лучей ниже более чем в 10⁷ раз по сравнению с поверхностью.

На данный момент набрана статистика за ~16000 часов измерений. Идет обработка полученных данных. По результатам за 613 суток получен новый предел на массу адронного аксиона на уровне т_А≤65эВ. Измерения продолжаются.

Результаты по ⁵⁷Fe. Монохроматические аксионы могут излучатся в M1-переходе в ядрах ⁵⁷Fe на Солнце, по аналогии с ⁸³Kr. Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов ядром ⁵⁷Fe в $3.5*10^3$ раз выше, чем для ⁸³Kr. Однако на данный момент нет детекторов ионизирующего излучения, с достаточно хорошим энергетическим разрешением, основанных материале содержащим железо в значительном количестве.

В качестве возможного рабочего материала детектора выбран пирит (FeS₂). Пирит является полупроводником, что может позволить использовать его как материал для полупроводникового детектора или криогенного болометра.

В качестве материала для предполагаемого детектора нами исследовались образцы природного пирита разных размеров от шарика диаметром 1 мм до бруска размером

2.7*2.0*1.5 см³. Чистый пирит является диамагнетиком, однако измерения ферромагнитного резонанса для сферических образцов из исследуемого пирита и эталонного железа дали одинаковую величину внешнего магнитного поля $B_0 = 0.23$ T для резонанса на частоте CBЧ волны n= 9.3 ГГц. Это свидетельствует о том, что в кристаллической решетке изучаемого образца содержатся примесные атомы железа, обуславливающие проводимость п-типа и характеризующиеся термом ${}^{5}D_{4}$, что соответствует спину S=2 для 3d электронов. Удельное нами образцов оказалось равным r=22 Ом*см при сопротивление исследуемых концентрации носителей заряда, равной n=10¹⁵см⁻³. При этом подвижность электронов в пирите равна m=46.8 см²/(B*c). Таким образом, высокая электропроводность природного пирита не позволяет использовать его в качестве детектора из-за аномально больших фоновых токов, на несколько порядков превышающих ток Is полезного сигнала, который, в свою очередь, определяется энергией фотона E₂=14.4 кэВ, шириной запрещенной зоны в пирите D=0.95 эВ и временем сбора заряда t соотношением I_S»еE_g/tD=0.12 нА, где время сбора заряда положено равным 20 мкс. Ситуацию может изменить использование искусственно выращенного пирита с контролируемым допированием атомами примесей, дающими проводимость n-типа, для которой фоновый ток не будет превышать Is. На данный момент нет технологии выращивания чистых синтетических кристаллов пирита размером более 5 мм, в основном все работы связаны с разработкой технологий изготовления тонких пленок для фотовольтаики.

Организовано сотрудничество с Воронежским госудасрственным университетом (химический факультет, кафедра неорганической химии) по вопросу выращивания монокристалоов содержащих железо. Рассматриваются три варианта: Пирит (FeS₂) и два твердых раствора GaS:Fe и Ga₂S₃:Fe с содержанием железо ~5%.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Новый этап эксперимента по поиску 2Кзахвата в 124Хе». Научный руководитель д.ф.-м.н. Валерий Васильевич Кузьминов

Экспериментальная установка состоит из большого медного пропорционального счетчика окруженного составной пассивной защитой, состоящей из 20см меди, 15см свинца и 5см борированного полиэтилена. Рабочий объем счетчика составляет 8.77 л. Установка расположена в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900 м.в.э. (НЛГЗ-4900), где поток мюонов космических лучей сниже более чем в 10^7 раз по сравнению с поверхностью. В 2017г. продолжались измерения с образцом ксенона объемом 50л, обогащенного по изотопу ¹²⁴Хе до 21% (58,6г). За 15427 часов набора данных фон в искомом интервале энергии 52-78 кэВ обнаружено 7 событий-кандидатов. На основании полученных данных установлен предел на период полураспада Хе-124 относительно 2K-захвата, на уровне $7*10^{21}$ лет (90% У.Д.).

Данные результаты были доложены на следующих конференциях: Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", посвященная 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории; Международная конференция "Сверхновая SN 1987A, кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия"; The Mount Elbrus Conference from Deep Underground up to the Sky. На основе докладов готовятся публикации. Набор статистики продолжается.

Работа выполняется при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, грант Мол_а №16-32-00018.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Участие в международном эксперименте АМОRЕ по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа 100Мо». Научный руководитель к.ф.-м.н. Владимир Владимирович Казалов. Основные работы, выполняемые группой лаборатории низкофоновых исследования БНО ИЯИ РАН связанны с измерением радиоактивности материалов, используемых при создании детекторов-болометров для эксперимента по поиску двойного безнейтринного бета-распада изотопа Мо-100. Для данных целей используются низкофоновые полупроводниковые гамма-спектрометры на основе сверхчистого германия. В 2017 году был произведен ремонт одного из имеющихся в наличии дикторов. Ремонт производился совместно сотрудниками БНО ИЯИ РАН и ОИЯИ. После восстановления детектор был установлен в низкофоновую защиту. На данный момент ведется измерение фона установки для определения ее чувствительности при определении активности U-238, Th-232 и K-40.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Изучение вариаций потока тепловых нейтронов природного происхождения в подземной лаборатории с помощью детекторов на основе ZnS(Ag) с добавками ⁶LiF». Научный руководитель к.ф.-м.н. Альберт Мусаевич Гангапшев. Для исследования вариаций потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900, в одном из боксов лаборатории собрана установка, состоящая из четырех детекторов тепловых нейтронов. Каждый детектор представляет собой бак в форме параллелипипеда (70*70*30см) посматриваемого через окно фотоумножителем ФЭУ-49Б. На дне бака уложен тонкий сцинтиллятор толщиной 0.7мм и площадью 0.36м². Сцинтиллятор представляет собой сплав двух компонент ZnS(Ag) и ⁶LiF в соотношении 1/3. ⁶Li — является изотопом, на котором происходит захват нейтрона:

 ${}^{6}\text{Li} + n \rightarrow {}^{3}\text{H} + a.$ (Q = 4.79 MeV, $E_a = 2051 \text{keV}$, $E_H = 2735 \text{keV}$, $\sigma = 945 \text{b}$ at 300 K). На данный момент набрана статистика за ~5 лет измерений. Сезонная вариация потока тепловых нейтронов в НЛГЗ составляет не менее 5% от среднегодового значения. Измерения продолжаются.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Создание воздушной ионной камеры высокого давления (ИКВД) для измерения содержания ²²²Rn в подземных условиях». Научный руководитель д.ф.-м.н. В. В. Кузьминов. Конструкция ЦВИК.

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



Рисунок 34. Вид внутреннего пространства и размещения узлов Rn-монитора

Все блоки расположены и закреплены на 3х уровнях полок, встроенных в рабочий корпус. Порядок размещения узлов показан на фото рис.34.

Рабочие характеристики ЦВИК Для измерения рабочих характеристик камера была подвешена горизонтально на резиновых растяжках внутри металлического корпуса от персонального компьютера. Сигнал снимался самодельным з.ч.у. С выхода з.ч.у. импульсы подаются на вход моноблочного ц.ос. ЛА-н10-12USB. С выхода ц.о. сигналы поступают на USB-порт переносного п.к. типа Net Book, который управляет режимами работы ц.о. и

записывает оцифрованные импульсы. Камера была заполнена с помощью аквариумного насоса фильтрованным атмосферным воздухом обычного лабораторного помещения без дополнительной подготовки. На рис.2а представлен нормированный на 1час. спектр амплитуд импульсов от α-частиц распада радона и его д.п.р. Значения амплитуд считывались в максимуме записанных импульсов. При таком определении амплитуды полученный спектр малопригоден для спектрометрических измерений. На рис.35б представлен спектр амплитуд, построенный из тех же импульсов после восстановления



Рисунок 35. Спектры амплитуд импульсов от распада радона и его д.п.р. в ЦВИК, заполненной воздухом до 620 мм рт.ст. (0.83 Бар), при напряжении (-1.5 кВ): а) амплитуды исходных импульсов; б) амплитуды восстановленных импульсов.

величины полного заряда в результате применения специально разработанной процедуры обработки оцифрованных импульсов. На спектре присутствуют пики α -линий ²¹⁰Po (5297 кэВ), ²²²Rn (5537±6 кэВ), ²¹⁸Po (6003 кэВ), ²¹⁴Po (7687 кэВ). Энергетическое разрешение линии ²²²Rn равно (1.7±0.1)%.

Результаты работы в 2017 году

- Для проведения длительного мониторинга скорости выхода радона из скальных пород предложено создать герметичную полость в породе и продувать её циклическим потоком воздуха по замкнутому контуру, в состав которого включен внутренний объём ЦВИК. В итоге содержание радона в воздухе, заполняющем ЦВИК, будет изменяться в соответствии с изменением скорости выхода радона из стенки полости на фоне накопленного за предыдущее время равновесного количества радона. Для изготовления такой полости была использована

бурильная установка. С её помощью в боковой стенке лаборатории дальнего геофизического комплекса БНО (4000 м от входа в штольню «Вспомогательная») сделана скважина диаметром 10 см, длиной 450 см и объёмом ~14 л.

Ведётся подготовка Rn-монитора и вспомогательного оборудования для создания поста наблюдения.

- В рамках работы по подготовке установки ТАУ-4, предназначенной для проведения долговременных наблюдений за величиной периода полураспада изотопа ²¹²Po, возникли проблемы с материнским источником этого изотопа. В процессе исследования параметров прототипа установки ТАУ-4 было обнаружено, что характеристики импульсов от пластмассового сцинтилляционного детектора, регистрирующего бета- и альфа-частицы распада изотопов ²¹²Ві-²¹²Ро, меняются со временем. Детектор склеен из двух дисков пластмассового сцинтиллятора с размещённым между ними электростатическим фильтром, изготовленным из двух кружков алюминированной пластиковой плёнки толщиной 3.5 мкм. Проводящие слои направлены друг к другу и разделены кольцевым изоляторов толщиной 0.5 мм. К каждому слою на электрическом контакте присоединена медицинская игла с отверстием в боковой стенке, направленным в центральный зазор. Иглы вклеены в сборку на противоположных концах диаметра и направлены штуцерами в одну сторону. Они используются одновременно как электроды и трубки для подвода и отвода проточного газа. На электроды подаётся напряжение 100 В. Под действием электрического поля из проходящего потока газа на поверхность алюминия оседают заряженные ионы ²¹²Pb, образовавшиеся в генераторе. Генератор состоит из сосуда с водным раствором 1 г соли ²³²Th(NO₃)₄. Он продувается пузырьками воздуха, которые выносят дочерний изотоп ²²⁰Rn. Этот изотоп распадается в специальном распадном объёме в ²¹²Pb, который далее и перемещается в электростатический фильтр. Частицы распада попадают в сцинтиллятор через толщу пластиковой плёнки. Было обнаружено, что за несколько месяцев проводящий алюминиевый слой на плёнке сильно истоньшился и местами исчез. Это произошло, предположительно, в результате химической реакции алюминия и микрокапель раствора соли, также переносимых потоком газа. Для устранения этого явления было решено повторно исследовать возможности получения ²¹²Pb в «сухом» генераторе. Для этого соль из раствора была нанесена на воздухопроницаемую подложку, в качестве которой использован капроновый детский бант длиной 3 м. После просушки бант свёрнут спиралью на оправку. Оправка продувается газом через внутреннюю цилиндрическую полость наружу. Сборка помещена в нержавеющий кожух с входным и выходным фланцами. По первым испытаниям количество осаждённых атомов ²¹²Pb значительно упало. Причин может быть несколько: 1) плохой выход ²²⁰Rn из рулона; 2) осаждение ²¹²Pb на поверхности транспортных трубопроводов; 3) различие характеристик

«сухого» и «мокрого» продувочных газов и др. Для исследования этих факторов предложено использовать в качестве детектора ЦВИК. Детектор позволяет одновременно измерять распады ²²⁰Rn и ²¹²Po. Предполагается, что сравнение активности этих изотопов в зависимости от типа продувочного газа, скорости продувки, материала и длины транспортных трубопроводов и др. позволит решить проблему и создать надёжную установку ТАУ-4. Выполнены предварительные измерения, ведётся обработка информации.

- По заказу коллег из Института физики и математики вселенной (Токио, Япония) были изготовлены две ЦВИК и почтовой посылкой переправлены в Японию в лабораторию KamLAND. Для наладки детекторов был командирован сотрудник. Установлено, что детекторы успешно выдержали пересылку. При проверке характеристик в малоприспособленных по шумовым параметрам лабораторных условиях было получено разрешение ~3% для энергии α-частиц 5.5 МэВ. Окончательные настроечные работы запланировано провести после окончания изготовления сотрудниками лаборатории KamLAND специальных шумоизолирующих корпусов для Rn-мониторов.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Экспериментальная проверка стабильности периода полураспада альфа-активного ядра ²¹⁴Ро». Научные руководители: д.ф.м.н. В.В. Кузьминов и д.ф.-м.н. Е.Н. Алексеев

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН с 2008 года проводится экспериментальное исследование поведения во времени периода полураспада (τ) ядра ²¹⁴Ро. Для определения этого параметра измеряются задержки между моментом рождения ядра (бета-электрон от распада ²¹⁴Ві + гамма-квант) и его распадом (альфа-частица от распада ²¹⁴Ро). Измерения выполнены на низкофоновой установке ТАУ-2 в подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900 на глубине 4900 м в.э. (973 дня) и на установке ТАУ-1 в подземной низкофоновой лаборатории КАПРИЗ на глубине 1000 м в.э. (354 дня). Временной интервал измерений на установке ТАУ-2 соответствует концу интервала измерений на установке ТАУ-2. Объектами дальнейшего анализа являются временные ряды значений τ с различным временным шагом. Из данных установки ТАУ-2 усреднённое значение периода полураспада ²¹⁴Ро составило величину τ =163.47±0.03 мкс. В ряду значений τ обнаружены годовая вариация с амплитудой А=(9.8±0.6)·10⁻⁴, солнечно-суточная вариация с амплитудой А₂=(7.5±1.2)·10⁻⁴.

Для обретения полной уверенности в том, что наблюдаемые вариации временного ряда значений τ имеют неслучайную природу, его необходимо сравнить с аналогичным рядом данных, полученным независимо на другой установке с другим ядром. Такая возможность была реализована на установке TAУ-3 с источником ²²⁹Th, являющимся материнским изотопом

для рабочей пары изотопов ²¹³Bi-²¹³Po (T_{1/2}=4.2 мкс). Ниже приводятся результаты работы, полученные в 2017 году.

Основные результаты:

- В 2017 году на установке ТАУ-3 с источником ²²⁹Th, расположенной в низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900, набрана статистика за 812 дней (июль 2015–декабрь 2017), обработана статистика за 622 дня (09.07.2015-29.03.2017). В результате обработки временного ряда значений периода полураспада дочернего изотопа ²¹³Po обнаружены солнечно-суточная вариация константы распада с усреднённой амплитудой $A_C = (5.3 \pm 1.1) \cdot 10^{-4}$, лунно-суточная с $A_{\Lambda} = (4.8 \pm 2.1) \cdot 10^{-4}$ и звёздно-суточная с $A_3 = (4.2 \pm 1.7) \cdot 10^{-4}$. Набор статистики и обработка данных продолжается.

В осенний период 2017 г. в течение ~двух месяцев на установке и в лаборатории проводились ремонтно-восстановительные работы по устранению последствий аварийного отключения электроэнергии в подземном комплексе БНО ИЯИ РАН из-за катастрофического наводнения 01.09.2017.

- При построении ряда значений периода полураспада, усреднённых за неделю (длительность набора 742 дня) обнаружилось, что начиная с ~45 недели величина периода полураспада начала расти и в конце обработанного интервала значение τ увеличилось на ~0.6% по сравнению со средним значением за первые 320 суток (т=(3.6993±0.0014) мкс). Причины такого изменения в данное время не установлены. Для их понимания требуется дальнейшее наблюдение за поведением периода полураспада ²¹³Ро. Это может быть эффект от старения аппаратуры или реальный неизвестный физический эффект. Спрогнозировать дальнейший ход кривой не представляется возможным, поэтому ответ на вопрос может быть получен только в результате продолжения измерений. Присутствие в ряду недельных данных импульсного выброса значений на интервале времени, сопоставимом с годом, препятствует использованию метода скользящего внутреннего среднего для поиска годовой вариации периода полураспада. Поэтому для получения представления о возможном присутствии годовой вариации было проверено предположение, что годовая вариация периода полураспада, обнаруженная в ряду недельных значений периода полураспада изотопа ²¹⁴Ро, продолжается с той же амплитудой и фазой в ряду данных ²¹³ Po. Нормированные к единице данные для этих изотопов в шкале непрерывного времени приведены на рис. 36. Нормировка данных для ²¹³Ро проводилась с использованием среднего значения т за 320 суток. Видно, что присутствие в данных ²¹³Ро годовой вариации с похожей амплитудой и фазой, что и в данных ²¹⁴Po, не исключается. После уточнения формы вновь возникшего отклонения его можно будет устранить из ряда данных ²¹³Ро и исследовать остаток на наличие годовой вариации.



Рисунок 36. Распределение во времени периодов полураспада 214Po (\blacktriangle) и 213Po (\bigstar) при длине шага набора данных 1 неделя. (·) - τ (t)/ τ 0 = [1+9.8·10-4·sin((2 π /365)·(t+70))].

Для оценки возможного влияния температурной нестабильности параметров ²¹²Ро было сделано специальное установки ТАУ-3 на величину периода полураспада измерение. В настоящий момент представляется, что наиболее чувствительным элементом установки является амплитудно-цифровой преобразователь ЛА-н20-12РСІ, входящий в состав управляющего компьютера. Если предположить, что частота опорного генератора АЦП может испытывать некоторые вариации, связанные с вариациями температуры, то длительность задержек между зарегистрированными в оцифрованном виде импульсами также будет испытывать температурные вариации. С целью определения коэффициента температурной нестабильности АЦП ему на вход был подан с генератора прямоугольный сигнал, длительность которого определялась в результате обработки записанного оцифрованного импульса. Измерения проводились для нескольких значений температуры воздуха внутри ящика, одетого на компьютер. В итоге этой работы было установлено, что коэффициент температурной нестабильности равен 6.8·10⁻⁸ (град.С^о)⁻¹. Суточные и годовые вариации температуры в помещении, где стоит аппаратура, не превышают ±1 град.С°, следовательно наблюдаемые вариации периода полураспада не имеют отношения к температурным вариациям параметров АЦП.

В процессе исследования параметров прототипа установки TAУ-4 с изотопом ²¹²Ро было обнаружено, что характеристики импульсов от пластмассового сцинтилляционного детектора, регистрирующего бета- и альфа-частицы распада изотопов ²¹²Bi-²¹²Po, меняются

со временем. Детектор склеен из двух дисков пластмассового сцинтиллятора с размещённым электростатическим фильтром, изготовленным ИЗ межли ними двух кружков алюминированной пластиковой плёнки толщиной 3.5 мкм. Проводящие слои направлены друг к другу и разделены кольцевым изоляторов толщиной 0.5 мм. К каждому слою на электрическом контакте присоединена медицинская игла с отверстием в боковой стенке, направленным в центральный зазор. Иглы вклеены в сборку на противоположных концах диаметра и направлены штуцерами в одну сторону. Они используются одновременно как электроды и трубки для подвода и отвода проточного газа. На электроды подаётся напряжение 100 В. Под действием электрического поля из проходящего потока газа на поверхность алюминия оседают заряженные ионы ²¹²Pb, образовавшиеся в генераторе. Генератор состоит из сосуда с водным раствором 1 г соли ²³²Th(NO₃)₄. Он продувается пузырьками воздуха, которые выносят дочерний изотоп ²²⁰Rn. Этот изотоп распадается в специальном распадном объёме в ²¹²Pb, который далее и перемещается в электростатический фильтр. Частицы распада попадают в сцинтиллятор через толщу пластиковой плёнки. Было обнаружено, что за несколько месяцев проводящий алюминиевый слой на плёнке сильно истонышился и местами исчез. Это произошло, предположительно, в результате химической реакции алюминия и микрокапель раствора соли, также переносимых потоком газа. Для устранения этого явления было решено повторно исследовать возможности получения ²¹²Pb в «сухом» генераторе. Для этого соль из раствора была нанесена на воздухо-проницаемую подложку, в качестве которой использован капроновый детский бант длиной 3 м. После просушки бант свёрнут спиралью на оправку. Оправка продувается газом через внутреннюю цилиндрическую полость наружу. Сборка помещена в нержавеющий кожух с входным и выходным фланцами. По первым испытаниям количество осаждённых атомов ²¹²Pb значительно упало. Причин может быть несколько: 1) плохой выход ²²⁰Rn из рулона; 2) осаждение ²¹²Pb на поверхности транспортных трубопроводов; 3) различие характеристик «сухого» и «мокрого» продувочных газов и др. Для исследования этих факторов предложено использовать в качестве детектора Импульсную Ионную Ионизационную Камеру, разработанную и созданную в БНО. В этой камере одновременно можно измерять распады ²²⁰Rn и ²¹²Po. Предполагается, что сравнение активности этих изотопов в зависимости от типа продувочного газа, скорости продувки, материала и длины транспортных трубопроводов и др. позволит решить проблему и создать надёжную установку ТАУ-4.

12. ПРОЕКТ ГЕРДА (GERMANIUM DETECTOR ARRAY)

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

Современный эскиз установки GERDA с изображен на рис. 1.

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

Проект включает три последовательные фазы. К настоящему моменту полностью закончена подготовка второй фазы эксперимента и начаты изменения и их анализ. Целью второй фазы является достижение индекса фона на уровне 10⁻³ /кэВ.кг.год на основании полученных результатов начать разработку крупномасштабного проекта с массой ~ 200 кг ⁷⁶Ge.

Вторая фаза эксперимента

1. Изготовлены, испытаны и введены в строй 30 кристаллов нового типа (кристаллы с точечным анодом, так наз. ВЕС детекторы) из обогащенного 76 Ge.

2. Модернизированы и введены в строй коаксиальные детекторы, используемые в первой фазе эксперимента, которые используются во второй фазе эксперимента в параллель с новыми детекторами.

3. Создана система светосбора сцинтилляционного света от жидкого аргона на основе оптических волокон. Сцитилляционый сигнал от жидкого аргона используется в антисовпадении с сигналом германиевых детекторов для дальнейшего подавления фона.

4. В течение 2016 г полностью введена в строй вторая фаза эксперимента Герда Установка включает 7 коаксиальных германиевых детекторов улучшеной конструкции (с

общей массой 15,8 кг) и 30 новых детекторов с точечным анодом (BEG детекторы с общей массой 20 кг)-

В результате использования анализа формы сигнала детекторов и антисовпадений с сцинтилляционным сигналом от окружающего жидкого аргона индекс фона понижен в 10 раз по сравнению с фазой 1 и достигнут величины 10⁻³ /кэВ.кг.год, что является уникальным достижением. К настоящему моменту на основе экспозиции 23.2 кг.год для периода двойного безнейтринного бета распада изотопа Ge-76 получен верхний предел

T_{1/2}>8·10²⁵ лет,

что является наилучшим мировым достижением.

Полученные результаты представлены на рис. 2 отдельно для коаксиальных детекторов и BEG детекторов в сравнении с результатами первой фазы (верхний график на рис. 2)

Набор статистики продолжается .

Результат представлен на международной конференции "Neutrino Physics and Astrophysics" (Neutrino 2016), TAUP2017 и опубликованы в журнале Nature.

Большое значение для поиска 0vββ распада германия является увеличение исследуемой массы германия. Для этого коллаборация планирует закупить в Росии новую партию обогащённого германия и очистить накопившиеся отходы от производства германиевых детекторов. Технология очистки германиевых отходов разработана в ИЯИ РАН совместно с Университетом Тюбингена (Германия). В 2017 году в Лаборатории Гран-Сассо смонтирована установка на основе этой технологии. На рисунке 3 ниже приведена фотография этой установки в момент монтажа в Лаборатории Гран-Сассо.

На базе эксперимента GERDA создаётся новая коллаборация: LEGEND. Российские физики из ИЯИ РАН, ИТЭФ, КИ и МИФИ примут участие в работе этой новой коллаборации.



Рисунок 37. Современный эскиз установки GERDA



Рисунок 38. Энергетические спектры в области 0v2β распад 76Ge

Верхний график фаза I, Средний график фаза II –коаксиальные детекторы, нижний график фаза II ВЕG детекторы



Рисунок 39 Установка для очистки германия.

13. РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА СОЗДАНИЯ БОЛЬШОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА В БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЯИ РАН

Научные руководители: д.ф.-м.н. В. В. Синев, д.ф.-м.н. Л.Б.Безруков

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

Создание сцинтиллятора, принципиально не содержащего ¹⁴С позволяет измерить вклад от потока калиевых антинейтрино (⁴⁰К).

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

Однако, этого недостаточно для изучения низкоэнергетических событий (< 150-200 кэВ), где в качестве фона выступает радиоактивный изотоп углерода 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.

Была разработана модель фона для детектора, которая включает 8 компонент и учитывает, что фон естественной радиоактивности не находится в равновесии продуктов распада в цепочках. На рисунке показано измерение за 322.9 часа. Модель фонов очень хорошо описывает представленное измерение.



Рисунок 40. Измерения образца сцинтиллятора на основе ЛАБ китайского производства за 322.9 часа. Точки с погрешностью – эксперимент. Показаны вклады от фонов детектора.

Подгонка фонами измеренного спектра позволяет определить загрязненность сцинтиллятора.

Содержание урана и тория определялось путем подгонки измеренного спектра модельными спектрами фона. Внутренний фон от урана обрывается изотопом ²³⁴U, так как период полураспада следующего за ним ²³⁰Th составляет 75400 лет, и последующие продукты не успели накопиться за время после очистки сцинтиллятора (примерно 3-4 года). Коэффициент для интеграла спектра фона ²³⁸U получился из подгонки 2990 за 322.9 часов измерения. Это составляет 6.4 x 10⁻⁴ событий в сек. Пересчет в массу ядер урана получается 2.2×10^{-13} г/г. То же для тория 1276 за 322.9 часов или 1.3 x 10⁻¹³ г/г.

Другой метод – метод измерения парных событий от продуктов цепочки 232 Th 212 Bi- 212 Po во временном окне 3334 нс что равняется 10 периодам полураспада 212 Po. При этом первые 450 нс вырабатывалась блокировка для исключения послеимпульсов. Тогда эффективность регистрации событий пары 212 Bi- 212 Po составляет 0.648. За 322.9 часов было зарегистрировано 5 событий в районе пика от альфа-частиц 212 Po. Это приводит к величине 1.7 х 10- 12 г/г для содержания 232 Th. Различие в один порядок величины объясняется тем, что метод подгонки спектра фона не является точным и может рассматриваться как приблизительный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача «Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал». Работы по теме, предусматривавшиеся планом НИР на 2017 год, в основном выполнены. Выполнен монтаж и запуск в режиме тестирования и постоянного набора данных второго кластера детектора в составе восьми гирлянд глубоководных оптических модулей (по 36 модулей на каждой). Запущенная в середине апреля 2017 года установка в составе двух кластеров обладает эффективным объемом близким к 0.1 км³ для событий от нейтрино с энергией порядка 100 ТэВ, что позволяет вести на ней поиск событий от внеатмосферных нейтрино высоких и сверхвысоких энергий.

К сожалению, начиная с ноября 2017 года началось заметное отставание от графика работ в связи с задержкой поставок комплектующих элементов (высоковольтных источников питания) фирмой TRACO POWER (Япония), передвинувшей, в нарушение условий контракта, сроки поставок с ноября 2017 года на январь-февраль 2018 года. К настоящему времени завершена подготовка примерно половины ОМ третьего кластера, и мы сохраняем надежду на то, что нам удастся развернуть третий кластер в период зимней экспедиции на оз. Байкал в 2018 г., что позволит увеличить детектирующий объем установки до 0.15 км³.

По мере накопления и первичного анализа данных формируется банк экспериментальных событий для последующего физического анализа, и в частности, в задаче выделения мюонных событий от нейтрино астрофизической природы. В задаче поиска каскадов, вызванных нейтрино астрофизической природы, был проведен анализ 686 млн. событий соответствующий 182 дням живого времени набора данных. В результате применения критериев отбора и процедуры восстановления параметров ливней выделено 57 событий с восстановленной энергией ливней выше 10 ТэВ и 5 событий с энергией выше 100 ТэВ, удовлетворяющих всем критериям отбора. Все выделенные события с энергией выше 100 ТэВ, кроме одного, имеют множественность сработавших оптических модулей меньше 15 и их число соответствует ожидаемому числу фоновых событий от атмосферных мюонов. Одно событие имеет множественность сработавших ОМ равное 38.

Результаты развития материально-технической базы ИЯИ РАН и инфраструктуры Байкальской нейтринной обсерватории обеспечивают необходимые условия для производства всех элементов телескопа и их монтаж во время зимних экспедиций на озеро Байкал.

Задача «Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных ср и т симметрий в распадах каонов».

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 редких распадов положительно заряженных каонов на четыре фермиона,

запрещенных в первом порядке в Стандартной Модели и возможных только в более высоких порядках слабого взаимодействия. В этом анализе использовались методы, разработанные при поиске тяжелых нейтрино на основе данных E949. Эта методика выделения редких каонных распадов использовались при анализе данных эксперимента NA62 (ЦЕРН).

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и два нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, в 2017 году были проведены длительные сеансы по набору статистики, в которых активное участие принимали сотрудники ИЯИ РАН. Продолжается анализ полученных данных как по поиску тяжелых нейтрино в распадах каонов на лету, так и по поиску различных редких мод каонного распада.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведены сеансы в нейтринной и антинейтринной модах (январь – апрель, ноябрь – декабрь 2017 года), в которых сотрудники ИЯИ РАН принимали активное участие. Проводится дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2010-2017 гг., по измерению как осцилляционных параметров нейтрино и антинейтрино, так и по сечений взаимодействий нейтрино с веществом. Важной вехой всей физики элементарных частиц является тот факт, что в настоящее время эксперимент Т2К выходит на изучение нарушения СР симметрии в нейтринных взаимодействиях (в лептонном секторе), которое до сих пор было обнаружено только в кварковом секторе.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой завершено создание магнитного нейтринного детектора Baby-MIND, состоящего из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами (сцинтилляционные детекторы разработаны и собраны в ИЯИ РАН). Детектор Baby-MIND был протестирован на пучке Т9 в ЦЕРН и в декабре 2017 года был доставлен в J-PARC.

В рамках Нейтринной платформы ЦЕРН проводятся НИОКР работы по созданию вето- и триггерных счетчиков для модернизации ближнего детектора ND280 эксперимента T2K, а также нового детектора – активной мишени – для регистрации нейтринных взаимодействий. К концу 2017 года в ИЯИ РАН изготовлена пробная партия из около 10 тысяч сцинтилляционных кубиков размером 1см, которые будут составлять активную мишень. В ИЯИ РАН продолжаются измерения этих счетчиков с использованием лавинных фотодиодов – с помощью космических лучей.

В рамках темы "Разработка и создание компактных детекторов ядерных излучений для учебно-исследовательских работ в школах и учебных институтах" силами студентов и

аспирантов МФТИ, МИФИ, НОЦ ИЯИ РАН проведена сборка прототипов детектора из кубиков и сделаны измерения на космических лучах на испытательном стенде в ИЯИ РАН, а также проводится анализ полученных данных.

В задаче «Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов ШАЛ и взаимодействий адронов при энергиях 10¹⁵ – 10¹⁸ эВ».

Усовершенствован программный пакет FANSY 2.0 для моделирования взаимодействий адронов в широком интервале энергий $(10^{11} - 10^{20} \text{ зB})$, воспроизводящий основные характеристики взаимодействий протон-протон, генерацию основных типов вторичных частиц, оказывающих влияние на развитие ШАЛ и содержащих u,d,s,c кварки (заряженные и нейтральные пионы, каоны, нуклоны и барионы, чармированные частицы, мезонные и барионные резонансы), а также экспериментальные данные при низких энергиях ускорителей и высоких энергиях LHC.

Результаты сравнения данных LHC и моделирования компланарности энергетически выделенных частиц требуют введения новой концепции объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности. Предложена концепция эксперимента на LHC для проверки явления компланарности энергетически выделенных вторичных частиц при сверхвысоких энергиях.

Проведены расчеты образования т.н. гало – области потемнения в центре. Сравнение результатов расчетов образования гало в γ-семействах с экспериментальными данными показывает, что доля протонов и ядер гелия в спектре ПКИ при энергиях E₀ ~ 10 – 100 ПэВ остается существенной (~15%) на всем протяжении энергетического интервала.

Проведена предварительная оценка сечения генерации чармированных частиц в фрагментационной области во взаимодействиях адронов (в основном, мезонов) космических лучей с ядрами свинца при энергиях ~ 10¹⁴ эВ. Получено значение σ_{inel} ~ 5 – 8 мб/нуклон [Публикации.3.6], что заметно выше теоретических предсказаний.

В задаче «Нейтринные эксперименты ИЯИ РАН во ФНАЛ» на дальнем детекторе зарегистрировано 78 событий (включая 7 фоновых событий), рожденных мюонными нейтрино. В отсутствии осцилляций ожидалось зарегистрировать 473 события.

Кроме того, на дальнем детекторе зарегистрировано 33 события кандидата (ожидаемый фон 8 событий), рожденных электронными нейтрино v_e,которые появились в пучке мюонных нейтрино из-за v_µ-> v_e осцилляций.

В задаче «Регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах» предварительные результаты проведенных измерений на мультикатодном счетчике с медным катодом показали, что наблюдается рост скорости эмиссии одиночных электронов, эмитируемых из катода по мере понижения его температуры. Наблюдаемый эффект находится в качественном согласии

с ранее проведенными измерениями на ФЭУ и пока не находит удовлетворительного объяснения. Недавно проведенные измерения на ФЭУ для установки ProtoDUNE также подтверждают наличие этого эффекта. Для независимого подтверждения эффекта нами разработан и изготовлен мультикатодный счетчик с алюминиевым катодом усовершенствованной конструкции на котором в настоящее время проводятся исследования с целью поиска оптимального режима работы. По результатам работы подготовлена к публикации статья [Публикации.5.6]. Результаты работы изложены в препринтах [Публикации.5.1, 4, 5] и опубликованы в научных журналах [Публикации.5.2, 3]

В задаче «Поиски нейтринного излучения от коллапсов звёзд в Галактике на детекторе КОЛЛАПС АНС и на детекторе LVD» сотрудники принимали участие в работах по выполнению Государственного задания на 2017 год, опубликовали 13 научных работ и сделали 17 докладов, см. Публикации.6.

План НИР по теме «Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории» на 2017 год выполнен в полном объеме.

Анализ по поиску возможных временных модуляций и сезонных вариаций скорости захвата нейтрино на галлии, примененный для 266 солнечных измерений на ГГНТ, за период наблюдений 27.7 лет, не выявил в данных каких-либо статистически значимых временных или сезонных вариаций. Данные хорошо согласуются с предположением о постоянстве потока солнечных нейтрино.

Величины скорости захвата, полученные из объединенного анализа данных зон Установки, хорошо согласуются между собой и с предыдущими измерениями на ГГНТ.

За отчетный период из солянокислых растворов хлорида галлия, образующихся в результате работы ГГНТ, получено около 1000 кг чернового галлия.

Разработано дополнительное оборудование для безопасного управления и размещения высокоинтенсивного источника. В подземном комплексе ГГНТ продолжается монтаж разработанного оборудования.

В задаче «Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ» в течение 2017 года на установках комплекса БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации всем физическим задачам, и проводились работы по модернизации установок. Проводились восстановительные работы после стихийного бедствия. 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.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Создание воздушной ионной камеры высокого давления (ИКВД) для измерения содержания ²²²Rn в подземных условиях».

В заключении приведём основные результаты работы, полученные в 2017 году.

- По программе создания постоянного поста наблюдения за скоростью выхода ²²²Rn из скальной породы в лаборатории дальнего геофизического комплекса БНО (4000 м от входа в штольню «Вспомогательная») сделана скважина диаметром 10 см, длиной 450 см и объёмом ~14 л. Ведётся подготовка Rn-монитора и вспомогательного оборудования для создания поста наблюдения.

- Изготовлены и доставлены в лабораторию KamLAND две камеры ЦВИК. Проведена предварительная проверка в неоптимальных шумовых условиях. Достигнуто разрешение ~3% при энергии α-частиц 5.5 МэВ.

- В рамках задачи создания комбинированного детектора-источника ²¹²Ро предложена методика и с помощью ЦВИК проведены предварительные измерения поведения атомов ²²⁰Rn и его заряженных дочерних продуктов в трубопроводах системы транспортировки газа от генератора ²²⁰Rn к камере-накопителю детектора-источника.

Задача «Низкофоновые исследования в БНО. Экспериментальная проверка стабильности периода полураспада альфа-активного ядра ²¹⁴Ро».

Как показали представленные выше результаты мониторинга константы распада изотопа ²¹³Ро, этот параметр испытывает солнечно-суточные, звёздно-суточные и лунносуточные вариации с амплитудами $A_C = (5.3 \pm 1.1) \cdot 10^{-4}$, $A_{II} = (4.8 \pm 2.1) \cdot 10^{-4}$, $A_3 = (4.2 \pm 1.7) \cdot 10^{-4}$ соответственно. Фаза солнечно-суточной волны в установке ТАУ-3 отличается от значения такого параметра, полученного ранее на установке ТАУ-2. Возможно, что различие связано с тем, что фаза со временем «плывёт». На существование такого эффекта указывают результаты предварительного анализа данных установки ТАУ-2, где использован интервал длительностью 1 год, перемещаемый с шагом 2 месяца по полному набору данных длительностью 973 дня. Возможно, что солнечно-суточная волна является суперпозицией нескольких близких по длительности волн. При построении ряда значений периода полураспада, усреднённых за неделю (длительность набора 742 дня) обнаружилось, что начиная с ~45 недели величина периода полураспада начала расти и в конце обработанного интервала значение т увеличилось на ~0.6% по сравнению со средним значением за первые 320 суток (τ =(3.6993±0.0014) мкс). Причины такого изменения в данное время не установлены. Присутствие в данных ²¹³Ро годовой вариации, подобной по амплитуде и фазе годовой вариации периода полураспада²¹⁴Po, не исключается. Для выяснения этих вопросов необходимо продолжить набор статистики с источником ²¹³Ро и совместный анализ данных со всех установок ТАУ-1, ТАУ-2 и ТАУ-3. Представляется, что окончательный ответ на вопрос о природе наблюдаемых вариаций может быть получен при сравнении результатов наблюдений, выполненных на одном и том же изотопе разными группами. Широкому распространению подобных исследований препятствует необходимость наличия в исследовательском коллективе хороших подземных низкофоновых условий и детекторов, а также технологические и финансовые возможности изготовления материнских источников. Для устранения этих препятствий начаты исследования возможностей создания подобной установки с изотопом ²¹²Po, в качестве генератора которого может быть использована соль природного тория. Этот элемент не является дефицитным и вполне доступен. Для работы такой установки наличие низкофоновых условий и детекторов не является обязательным.

По проекту создания большого сцинтилляционного детектора в баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Разработана модель фона детектора, которая позволяет надежно выделить сигнал от спектра ¹⁴С. На рисунке показано измерение фона за 322.9 часа и смоделированный фон от внешнего и внутреннего излучения от источников естественной радиоактивности.

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

Продолжались работы по развитию научного обоснования и технического предложения по созданию большого сцинтилляционного детектора с использованием Гидридной модели Земли. Как тест справедливости Гидридной модели Земли развита Гидридная модель земного электричества. Написана статья, которая представлена ак. И.И.Ткачёвым в журнал «Доклады академии наук».

ПУБЛИКАЦИИ

1. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ГЛУБОКОВОДНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МЮОНОВ И НЕЙТРИНО НА ОЗ. БАЙКАЛ»

1. A.D. Avrorin et al.. "Status of the Baikal-GVD Project: First Cluster Dubna", DOI: 10.1142/9789813224568 0025, Conference: C15-08-20, p.160-163 Proceedings.

2. N.M. Budnev et al.. "Acoustic Search for High Energy Neutrinos in Lake Baikal: Status and Perspectives", EPJ Web Conf. 135 (2017) 06004, DOI: 10.1051/epjconf/201713506004.

3. A.D. Avrorin et al.. "Dark matter constraints from an observation of dSphs and the LMC with the Baikal NT200". J.Exp.Theor.Phys. 125 (2017) no.1, 80-90, Zh.Eksp.Teor.Fiz. 152 (2017) no.1, 97-109, DOI: 10.1134/S1063776117070135.

4. A.D. Avrorin et al.. "Gigaton Volume Detector (GVD) in Lake Baikal: status of the project", PoS(NEUTEL2017) 063, https://pos.sissa.it/307/063/.

5. A.D. Avrorin et al.. "Status of the Baikal-GVD experiment - 2017", PoS(ICRC2017)1034, https://pos.sissa.it/301/1034/pdf.

6. A.D. Avrorin et al.. "Data management and processing system for the Baikal-GVD telescope", PoS(ICRC2017)1046, https://pos.sissa.it/301/1046/pdf.

7. A.D. Avrorin et al.. "Calibration and monitoring units of the Baikal-GVD neutrino telescope", PoS(ICRC2017)1032, https://pos.sissa.it/301/1032/pdf.

8. A.D. Avrorin et al.. "Baikal-GVD: Time Calibrations in 2016", PoS(ICRC2017)1036, https://pos.sissa.it/301/1036/pdf.

9. A.D. Avrorin et al.. "Hydroacoustic Positioning System for the Baikal-GVD", PoS(ICRC2017)1033, https://pos.sissa.it/301/1033/pdf.

10. A.D. Avrorin et al.. "Cascades in GVD", PoS(ICRC2017)962, https://pos.sissa.it/301/962/pdf.

2. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРИННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ И НАРУШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СР И Т СИММЕТРИЙ В РАСПАДАХ КАОНОВ»

1. A.T. Shaikhiev / Search for the rare decays K+->mu+ X in E949 experiment // J.Phys.Conf.Ser. 800 (2017) no.1, 012020, WOS:000403471300020;

 C. Lazzeroni,..., V. Bolotov, V. Duk, E. Gushchin et al. (NA62 Collaboration) / Measurement of the pi[^]0 electromagnetic transition form factor slope // Phys.Lett. B768 (2017) 38-45, WOS:000400677700007;

3. C. Lazzeroni,..., V. Bolotov, V. Duk, E. Gushchin et al. (NA62 Collaboration) / Search for heavy neutrinos in K+-> mu+ nu_mu decays // Phys.Lett. B772 (2017) 712-718, WOS:000411369700101;

4. E.C. Gil,..., S. Fedotov, E. Gushchin, A. Khotyantsev, A. Khudyakov, A. Kleymenova,
Y. Kudenko, A. Shaikhiev et al. (NA62 Collaboration) / The Beam and detector of the NA62 experiment at CERN // JINST 12 (2017) no.05, P05025, WOS:000405076000025;

A. Shaikhiev / NA62 experiment at CERN, status and recent results // Доклад на конференции The XXIII International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory June 26– July 3, 2017 Yaroslavl, Russia, https://qfthep.sinp.msu.ru/programme/june-28-2017;

5. С.А. Федотов / Мюонное гало в эксперименте NA62 (CERN). Доклад на конференции III Межинститутская молодежная конференция «Физика элементарных частиц и космология», Долгопрудный, Россия, 27-28 апреля 2017 года // Сборник трудов III Межинститутской молодежной конференции «Физика элементарных частиц и космология»;

6. С.А. Федотов / The New CHOD detector for the NA62 experiment at CERN // Доклад на конференции Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РФН «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории, Нальчик, Россия, 6-8 июня 2017 года (<u>http://icssnp.inr.ac.ru/ru/</u>)

7. O. Mineev,..., Yu. Kudenko,..., N. Yershov et al. / The design and basic performance of a Spiral Fiber Tracker for the J-PARC E36 experiment // Nucl.Instrum.Meth. A847 (2017) 136-141, WOS:000394396800020;

8. М.М. Хабибуллин / Недавние результаты Т2К // Журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра», 2017, т. 48, вып. 6, с. 958-961, WOS:000415657500045;

9. Yu. Kudenko / Experimental study of neutrino oscillations and search for sterile neutrinos // Доклад на конференции Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РФН «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории, Нальчик, Россия, 6-8 июня 2017 года (<u>http://icssnp.inr.ac.ru/ru/</u>)

10. S. Suvorov / Recent oscillation results from the T2K experiment // Доклад на конференции Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РФН «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории, Нальчик, Россия, 6-8 июня 2017 года (http://icssnp.inr.ac.ru/ru/)

11. K. Abe,..., M. Antonova,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., V. Matveev,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,..., S. Suvorov,..., N. Yershov, et al. (T2K Collaboration) / Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillations at T2K // Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.15, 151801, WOS:000399957800006;

K. Abe,..., M. Antonova,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., V. Matveev,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,...,
 S. Suvorov,..., N. Yershov, et al. (T2K Collaboration) / First measurement of the muon neutrino

charged current single pion production cross section on water with the T2K near detector // Phys.Rev. D95 (2017) no.1, 012010, WOS:000400774700003;

13. K. Abe,..., M. Antonova,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., V. Matveev,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,..., S. Suvorov,..., N. Yershov, et al. (T2K Collaboration) / Search for Lorentz and CPT violation using sidereal time dependence of neutrino flavor transitions over a short baseline // Phys.Rev. D95 (2017) no.11, 111101, WOS:000404472700001;

14. K. Abe,..., M. Antonova,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., V. Matveev,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,..., S. Suvorov,..., N. Yershov, et al. (T2K Collaboration) / Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 1.5 x10^{21} protons on target // Phys.Rev. D96 (2017) no.1, 011102, WOS:000406639300001;

15. K. Abe,..., M. Antonova,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., V. Matveev,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,..., S. Suvorov,..., N. Yershov, et al. (T2K Collaboration) / Measurement of $\lambda \left[\sum_{nu} \right]$ and $\lambda_n \left[\sum_{nu} \right]$ charged current inclusive cross sections and their ratio with the T2K off-axis near detector // Phys.Rev. D96 (2017) no.5, 052001, WOS:000409257900001;

16. K. Abe,..., M. Antonova,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Yu. Kudenko,..., V. Matveev,..., A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsyannikova,..., A. Shaikhiev,..., S. Suvorov,..., N. Yershov, et al. (T2K Collaboration) / Measurement of neutrino and antineutrino oscillations by the T2K experiment including a new additional sample of \$\nu_e\$ interactions at the far detector // Phys.Rev. D96 (2017) no.9, 092006. WOS:000415904300001;

17. Akmete,..., D. Gorbunov,..., M. Khabibullin,..., A. Khotyantsev,..., Y. Kudenko,..., V. Kurochka,..., A. Mefodev,..., O. Mineev,... et al. (SHiP Collaboration) / The active muon shield in the SHiP experiment // JINST 12 (2017) no.05, P05011, WOS:000405076000011;

18. W. Baldini,..., A. Khotjantsev, Y. Kudenko, V. Kurochka, ..., A. Mefodiev, O. Mineev / Measurement of parameters of scintillating bars with wavelength-shifting fibres and silicon photomultiplier readout for the SHiP Muon Detector // JINST 12 (2017) no.03, P03005, WOS:000406997600005;

19. Yu. Kudenko / Neutrino detectors for oscillation experiments // JINST 12 (2017) no.06, C06003, WOS:000405090200003;

20. A.V. Mefodiev, Yu.G. Kudenko, O.V. Mineev, A.N. Khotjantsev / Baby-MIND neutrino detector // Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 48 (2017) вып. 6 (англ. версия: Phys.Part.Nucl. 48 (2017) по.6, 1002-1004), WOS:000415657500051;

21. M. Antonova, ..., S. Fedotov,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, M. Khotyantsev, A. Kleymenova, ..., A. Kostin, Y. Kudenko, V. Likhacheva,..., M. Medvedeva, A. Mefodiev,..., O. Mineev,..., T. Ovsiannikova,..., A. Shaikhiev,..., S. Suvorov, N. Yershov / Baby MIND: A Magnetized Segmented Neutrino Detector for the WAGASCI Experiment // JINST 12 (2017) no.07, C07028, WOS:000406420100028;

22. T. Ovsiannikova, M. Antonova, A. Izmaylov, Y. Kudenko, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, A. Mefodiev, O. Mineev, S. Suvorov, N. Yershov / New experiment WAGASCI to measure cross sections of neutrino interactions in water and hydrocarbon using J-PARC beam // Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 48 (2017) вып. 6 (англ. версия: Phys.Part.Nucl. 48 (2017) по.6, 1014-1017), WOS:000415657500055.

3. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ВЫСОКОГОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРО- И ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКОГО АСПЕКТОВ ШАЛ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ АДРОНОВ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 10¹⁵ – 10¹⁸ ЭВ»

1. R.A. Mukhamedshin. LHC data and cosmic ray coplanarity at superhigh energies. EPJ Web of Conferences 145 (2017) 13003

2. A.S. Borisov, V.G. Denisova, Z.M. Guseva, E.A. Kanevskaya, S.E. Pyatovsky, M.G. Kogan, A.E. Morozov, R.A. Mukhamedshin, V.S. Puchkov, S.B. Shaulov, G.P. Shoziyoev and M.D. Smirnova. Gamma-ray families with halos: Main characteristics and possibilities of using them to estimate the p+He fraction in the mass composition of cosmic rays at energies 1–100 PeV. EPJ Web of Conferences 145 (2017) 19008

3. V.A. Ryabov, A.M. Almenova, V.P. Antonova, R.U. Beisembayev, S.P. Bezshapov, A.S. Borisov, A.P. Chubenko, O.D. Dalkarov, A.V. Gurevich, A.N. Karashtin, O.N. Kryakynova, G.G. Mitko, R.A. Mukhamedshin, A.M. Mukhashev, R.A. Nam, N.F. Nikolaevsky, V.P. Pavlyuchenko, V.V. Piscal, M.O. Ptitsyn, V.S. Puchkov, N.O. Saduev, T.Kh. Sadykov, N.M. Salikhov, S.B. Shaulov, A.L. Shepetov, Yu.V. Shlyugaev, A.V. Stepanov, W.M. Thu, L.I. Vildanova, M.I. Vildanova, N.N. Zastrozhnova, V.V. Zukhov and K.P. Zybin. Modern status of the Tien Shan cosmic ray station. EPJ Web of Conferences 145 (2017) 12001

4. S.B. Shaulov, P.F. Beyl, R.U. Beysembaev, E.A. Beysembaeva, S.P. Bezshapov, A.S. Borisov, K.V. Cherdyntceva, M.M. Chernyavsky, A.P. Chubenko, O.D. Dalkarov, V.G. Denisova, A.D. Erlykin, N.V. Kabanova, E.A. Kanevskaya, K.A. Kotelnikov, A.E. Morozov, R.A. Mukhamedshin, R.A. Nam, N.M. Nesterova, N.M. Nikolskaya, V.P. Pavluchenko, V.V. Piskal, V.S. Puchkov, S.E. Pyatovsky, V.A. Ryabov, T.Kh. Sadykov, A.L. Schepetov, M.D. Smirnova, A.V. Stepanov, A.V. Uryson, Yu.N. Vavilov, N.G. Vildanov, L.I. Vildanova, I.S. Zayarnaya, J.K. Zhanceitova and V.V. Zhukov. Investigation of EAS cores. EPJ Web of Conferences 145 (2017) 17001

5. Р.А. Мухамедшин, С.Е.Пятовский, В.С. Пучков, С.Б.Шаулов. γ-семейства с «гало» при наблюдении ШАЛ в РЭК и оценка доли р+Не в ПКЛ при Е0=1 – 100 ПэВ. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 12 (2017) 64-72

Доклады на конференциях:

6. A.S.Borisov, V.I.Galkin, E.A.Kanevskaya, M.G. Kogan, R.A.Mukhamedshin, V.S.Puchkov. On the origin of abnormal absorption of hadron component of EAS cores in lead. Proc. 35th ICRC, 12-20 July 2017 (Busan) CRI305

4. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «НЕЙТРИННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ИЯИ РАН ВО ФНАЛ»

1. P. Adamson et al. Phys. Rev. Lett. 118, 151802 (2017)

2. P. Adamson et al. Phys. Rev. Lett. 118, 231801 (2017)

5. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «РЕГИСТРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРИНО НА ЯДРАХ»

1. 1. A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov The Study of a Temperature Dependence of the Dark Rate of Single Electrons Emitted from a Cathode of a Multi-Cathode Counter as a Method to Search for Hidden Photons of CDM arXiv: 1608.06073

2. А.В. Копылов, И.В. Орехов, В.В. Петухов Метод регистрации скрытых фотонов с помощью мультикатодного счетчика Письма в Журнал Технической Физики, 2016, т.42, вып.16, с.102

3. Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V. On a Search for Hidden Photon CDM by a Multicathode Counter Advances In High Energy Physics, Volume 2016 (2016), Article ID

4. Anatoly Kopylov, Igor Orekhov, Valery Petukhov New results of the search for hidden photons by means of a multicathode counter arXiv: 1706.03933 [physics.ins-det]

5. Anatoly Kopylov, Igor Orekhov, Valery Petukhov The Measurement of a Temperature Dependence of the Count Rate of Single Electrons Emitted From Copper by Means of a Multicathode Counter arXiv: 1706.04359 [physics.ins-det]

6. А.В.Копылов, И.В.Орехов, В.В.Петухов Новые результаты поиска скрытых фотонов с помощью мультикатодного счетчика (находится в стадии доработки для публикации в Журнале технической физики).

6. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ПОИСКИ НЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ КОЛЛАПСОВ ЗВЁЗД В ГАЛАКТИКЕ НА ДЕТЕКТОРЕ КОЛЛАПС АНС И НА ДЕТЕКТОРЕ LVD»

Оригинальные статьи за 2017

1. K. V. Manukovsky, O.G.Ryazhskaya, N. M. Sobolevsky and A. V. Yudin,"Neutron Production by Cosmic-Ray Muons in Various Materials" arXiv:1703.06407 [physics.ins-det]

2. А.С. Мальгин «Об энергетическом спектре космогенных нейтронов» ЖЭТФ, Том 152, Вып. 5, стр. 863 (2017)

3. A.S. Malgin "Phenomenology of muon-induced neutron yield" PHYSICAL REVIEW C 96, 014605 (2017), arXiv:1704.04993

4. О.Г. Ряжская «Создание лаборатории нейтрино ФИАН и подземных лабораторий» О.G. Ryazhskaya "Creating the Neutrino Laboratory FIAN and underground laboratories", Phys. Usp., 2017 issue 8, DOI: 10.3367/UFNe.2017.05.038186 (в печати)

5. N. Agafonova et al, "Discovery potential for directional Dark Matter detection with nuclear emulsions" arXiv:1705.00613 [astro-ph.CO]

6. N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration) "Study of charged hadron multiplicities in charged-current neutrino-lead interactions in the OPERA detector" arXiv:1706.07930

Опубликованные Труды конференций

 N. Yu. Agafonova (on behalf of the LVD Collaboration) "Measurement of the muoninduced neutron seasonal modulation with LVD" arXiv:1701.04620 (XXV ECRS 2016 Proceedings - eConf C16-09-04.3)

8. G. Bruno, A. Molinario, W. Fulgione, C. Vigorito for the LVD Collaboration "The core collapse supernova rate from 24 years of data of the Large Volume Detector" arXiv:1701.06765 (XXV ECRS 2016 Proceedings - eConf C16-09-04.3)

9. Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, В.Л. Дадыкин, Е.А. Добрынина, Р.И. Еникеев, А.С. Мальгин, О.Г. Ряжская, И.Р. Шакирьянова, В.Ф. Якушев и Коллаборация LVD "Сезонные вариации потока нейтронов, генерируемых мюонами, и фона естественной радиоактивности в подземной Лаборатории Гран Сассо" Известия РАН. Сер. Физ., 2017, т.81 №4, с. 551-554

10. N. Agafonova on behalf the LVD Collaboration "Measurement of the muon-induced neutron yield in Fe and Pb using Large Volume Detector at LNGS" Proceedings of the Seventeenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics "Particle Physics at the Year of Light", Moscow, Russia 20-26 August 2015 (Editor Alexander I. Studenikin World Scientific, Singapore, 2017), p. 374

11. O.G. Ryazhskaya "Some remarks on the experiments for dark matter search" Proceedings of the Seventeenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics "Particle Physics at the Year of Light", Moscow, Russia 20-26 August 2015 (Editor Alexander I. Studenikin World Scientific, Singapore, 2017), p. 371

12. L. Patrizii (for the OPERA Collaboration) "Results from the OPERA Experiment" Poster presented at NuPhys2016 (London, 12-14 December 2016), arXiv:1705.02454 [hep-ex].

13. A. M. Guler, for the NEWSdm Collaboration "Discovery potential for directional dark matter detection with nuclear emulsions" IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 869 (2017) 012048 doi :10.1088/1742-6596/869/1/012048

Выступление на конференциях и семинарах

1. Добрынина Е.А. (ИЯИ РАН) «Изучение вариаций концентрации радона в подземной лаборатории Гран Сассо с помощью детектора LVD» 10 февраля 2017 г., 1137-й семинар "Нейтринная и ядерная астрофизика" им. Г.Т.Зацепина

2. Ряжская О.Г. "Проблема нейтринного излучения от SN 1987А. Тридцать лет спустя" Симпозиум "30 лет вспышки Сверхновой SN1987А" (Пленарный доклад), 2-3 марта 2017 г., ФИАН, Москва

3. Ряжская О.Г. "LVD-эксперимент", Симпозиум "30 лет вспышки Сверхновой SN1987A" (Пленарный доклад), 2-3 марта 2017 г., ФИАН, Москва

4. Мальгин А.С. и Экс-Коллаборация LSD "О регистрации детектором LSD редкого события во время Чернобыльской аварии" Симпозиум "30 лет вспышки Сверхновой SN1987A" (Постер), 2-3 марта 2017 г., ФИАН, Москва

5. Мальгин А.С. и Экс-Коллаборация LSD "О регистрации редкого события детектором нейтринного излучения под монбланом 23 февраля 1987 года." Симпозиум "30 лет вспышки Сверхновой SN1987A" (Постер), 2-3 марта 2017 г., ФИАН, Москва

6. Ашихмин В.В. "Поиск совпадений возможных взаимодействий нейтрино в детекторах LVD и БПСТ" Симпозиум "30 лет вспышки Сверхновой SN1987A" (Постер), 2-3 марта 2017 г., ФИАН, Москва

7. Еникеев Р.И. от имени группы АСД "Сорок лет Артемовскому Сцинтилляционному Детектору" Симпозиум "30 лет вспышки Сверхновой SN1987A" (Постер), 2-3 марта 2017 г., ФИАН, Москва

8. Агафонова Н.Ю. от имени коллаборации LVD "Поиск нейтрино от коллапсов звездных ядер и физика космических лучей на эксперименте LVD" LIII Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники, Россия, РУДН, г. Москва, 15-19 мая 2017 г. (Пленарный доклад)
9. Ряжская О.Г. "Создание Лаборатории нейтрино ФИАН и подземных лабораторий" Выступление на научной сессии ОФН РАН, посвященной 100-летию Г.Т. Зацепина 24 мая 2017 г.

10. Ряжская О.Г. "Вводное слово" к 8-мым Зацепинским чтениям, ФИАН, Москва, 26 мая 2017г.

11. Agafonova N.Yu. "Monte Carlo Simulation of the muon-induced neutron experiment using LVD", (poster) ISCRA2017, Moscow, MEPhI, 20-22 June, 2017.

12. Ashikhmin V.V., Agafonova N.Yu. on behalf the LVD Collaboration "Search for supernova neutrino bursts with the LVD experiment" 18th Lomonosov Conference, Moscow State University, Moscow, 24 – 30 August, 2017.

13. Ryazhskaya O.G. "Underground physics" The Borexino Collaboration celebrates in L'Aquila (Italy) the 10th anniversary of data-taking, 4 - 7 September 2017.

14. C. Vigorito on behalf of the LVD Collaboration "Modulation of the underground muon flux in the last 25 years with the LVD experiment at LNGS". (Oral) 35th ICRC 12-20 July, 2017 Bexco, Busan, Korea.

15. G. Bruno, W. Fulgione, A. Molinario & C. Vigorito on behalf of the LVD Collaboration "Search for Supernova Neutrino Bursts with the LVD experiment: the 2017 update". 35th ICRC 12-20 July, 2017 Bexco, Busan, Korea.

16. Семенов С.В., Ряжскя О.Г. "Железо как детектор нейтрино от коллапсирующих звёзд" Симпозиум "30 лет вспышки Сверхновой SN1987A" (Пленарный доклад), 2-3 марта 2017 г., ФИАН, Москва.

17. Antonia Di Crescenzo for NEWSdm Collaboration "NUCLEAR EMULSIONS FOR WIMP SEARCH directional measurement" U.S. Cosmic Visions: New Ideas in Dark Matter, University of Maryland, College Park, 23-25 March 2017

6. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ И ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ 10¹¹ – 10²⁰ ЭВ»

1. Джаппуев Д.Д., Петков В.Б., Лидванский А.С., Волченко В.И., Горбачева Е.А., Дзапарова И.М., Куджаев А.У., Клименко Н.Ф., Куреня А.Н., Михайлова О.И., Птицына К.В., Хаджиев М.М., Янин А.Ф. Эксперимент «Ковер-3» – поиск диффузного гаммаизлучения с энергией свыше 100 ТэВ // Известия РАН. сер. физ. 2017. Т. 81, № 4. стр. 461-464.

2. М.Н.Хаердинов, Н.С.Хаердинов, А.С.Лидванский, Метод определения основных параметров грозового поля по вариациям мюонов регистрируемых горизонтальной установкой, Известия РАН, сер. физ., 2017, т. 81, № 2, стр. 246–249.

3. К.Х. Канониди, А.Н.Куреня, А.С.Лидванский, М.Н.Хаердинов, Н.С.Хаердинов, Грозовые эффекты по данным комплексного исследования вариаций вторичных частиц космических лучей, Известия РАН, сер. физ., 2017, т. 81, № 2, стр. 242–245.

4. A.S. Lidvansky, Burst Activity of the Crab Nebula and Its Pulsar at High and Ultra-High Energies, 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions 22 - 27 August 2016, Moscow. EPJ Web of Conferences: 145, 04003 (2017), DOI: 10.1051/epjconf/201714504003

5. A.S. Lidvnsky, Similarity and Difference in Time Structures of Gamma-Ray Flares in the Crab Nebula at Drastically Differing Energies, PoS(ICRC2017)726

6. A.S. Lidvansky, V.B. Petkov, D.D. Dzhappuev, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, E.A. Gorbacheva, I.M. Dzaparova, N.F. Klimenko, A.N. Kurenya, O.I. Mikhailova, M.M. Khadzhiev, A.F. Yanin, Search for diffuse gamma radiation with energy > 100 TeV at the Carpet-3 experiment, PoS(ICRC2017)702

7. D D Dzhappuev, V B Petkov, A S Lidvansky, V I Volchenko, G V Volchenko, E A Gorbacheva, I M Dzaparova, N F Klimenko, A U Kudzhaev, A N Kurenya, O I Mikhailova, K V Ptitsyna, M M Khadzhiev, and A F Yanin, Search for diffuse cosmic gamma rays of energy $E\gamma >$ 100 TeV with the Carpet-3 air shower array, Journal of Physics: Conference Series, vol. 798 (2017) 012028

Доклады на конференциях:

1. А.С. Лидванский, Г.Т. Зацепин как пионер гамма-астрономии, 3 Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники, секция «Ядерная и нейтринная астрофизика», 15-19 мая 2017 г. Росс. Университет Дружбы народов (РУДН) (устный доклад).

2. А.С. Лидванский, Г.Т. Зацепин и начало гамма-астрономии, Научная сессия ОФН РАН «100-летие Г.Т. Зацепина», ФИАН им. П.Н. Лебедева, 24 мая 2017 г. (приглашенный доклад)

3. M.N. Khaerdinov, N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky, Maximal possible potential difference in the stratosphere as derived from ground-based measurements of variations of

secondary cosmic rays, International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics (ISCRA 2017), 20-22 June, MEPhI, Moscow, Russia

4. N.S. Khaerdinov, M.N. Khaerdinov, A.S. Lidvansky, Local continuous luminosity of the mid-latitude night sky in thunderstorm periods, International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics (ISCRA 2017), 20-22 June, MEPhI, Moscow, Russia

3. A.S. Lidvansky, They were the first (a retrospective look at some Baksan experiments on the jubilee day), Международная юбилейная сессия-конференция БНО-50, Нальчик, 5-9 июня 2017 г. (приглашенный доклад)

4. A.S. Lidvansky, A.E. Chudakov as a scientist and one of the founding fathers of underground physics, Intern. Conf., "SN 1987A, Quark Phase transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy", KChR, Nizhnij Arkhys (SAO) and KBR, Terskol (BNO), July 1-8, 2017 (приглашенный доклад)

5. A.S. Lidvansky, Similarity and Difference in Time Structures of Gamma-Ray Flares in the Crab Nebula at Drastically Differing Energies, 35th ICRC, Busan, South Korea, 12-20 July 2017 (постерный доклад)

6. A.S. Lidvansky, M.N. Khaerdinov, N.S. Khaerdinov, Charge Ratio of Low Energy Muons Derived from the Data on Variations of Muons during Thunderstorms, 35th ICRC, Busan, South Korea, 12-20 July 2017 (устный доклад)

7. A.S. Lidvansky for the Carpet-3 Collaboration, Search for diffuse gamma radiation with energy $E\gamma > 100$ TeV in the Carpet-3 experiment, 35th ICRC, Busan, South Korea, 12-20 July 2017. (постерный доклад)

8. A.S. Lidvansky, The Carpet-3 experiment: Status and prospects, APPEC Mt. Elbrus Conference: from deep underground up to the sky, September 11-16, 2017, Pyatigorsk (устный доклад)

7. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ВЫСОКОГОРНОЙ УСТАНОВКИ PRISMA-YBJ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОЕКТА LHAASO»

1. Victor Alekseenko, Anastasia Bagrova, Yayun He, Bingbing Li, Shuwang Cui, Xinhua Ma, Yuri Stenkin and Vladimir Stepanov. Exotic geophysical phenomena observed in an

environmental neutron flux study using EAS PRISMA detectors. ISVHECRI-2016. EPJ Web of Conferences 145, 15003 (2017) DOI: 10.1051/epjconf/201714515003

2. Victor Alekseenko, Anastasia Bagrova, Shuwang Cui, Xinhua Ma, Yuri Stenkin and Vladimir Stepanov. The PRISMA - LHAASO project: status and overview. ISVHECRI-2016. EPJ Web of Conferences 145, 07001 (2017). DOI: 10.1051/epjconf/201714507001

3. Victor Alekseenko, Anastasia Bagrova, Shuwang Cui, Xinhua Ma, Yuri Stenkin and Vladimir Stepanov. Study of the EAS size spectrum in thermal neutrons measured by PRISMA-YBJ array. EPJ Web of Conferences **145**, 19021 (2017), DOI : 10.1051 / epjconf / 201714519021

4. Ю.В. Стенькин, О.Б. Щеголев от имени коллаборации PRISMA. Новый метод изучения химического состава космических лучей. Известия РАН. Серия физич. (2017), Т. 84. №4, с. 541-543.

5. Ю. В. Стенькин, В. В. Алексеенко, А. С. Багрова и др. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПРИРОДНОГО ПОТОКА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА ВЫСОТЕ 4300 м НАД УРОВНЕМ МОРЯ. ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2017, том 81, № 2, с. 179–180. DOI: 10.7868/S0367676517020405

6. Ю. В. Стенькин, В. В. Алексеенко, Д. М. Громушкин, В. П. Сулаков, О. Б.Щеголев. ПОДЗЕМНАЯ ФИЗИКА И ЭФФЕКТ ВЛИЯНИЯ БАРОМЕТРИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОДЗЕМНЫЙ ФОНОВЫЙ ПОТОК ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ. ЖЭТФ, 2017, том 151, вып. 5, стр. 845–849.

 Yuri Stenkin, Victor Alekseenko, Zeyu Cai, Zhen Cao, et al. Seasonal and Lunar Month Periods Observed in Natural Neutron Flux at High Altitude. Pure and Applied Geophysics.
(2017), Volume 174, Issue 7, pp 2763–2771.

8. Gromushkin, D.M., Ampilogov, N.V., Barbashina, N.S., Bogdanov, F.A., Kokoulin, R.P., Ovchinnikov, V.V., Petrukhin, A.A., Shulzhenko, I.A., Yu.V. Stenkin1, 2, I.I. Yashin1, Yurin, K.O. The array for investigations of EAS neutron component. European Physical Journal, Web of Conferences. 145, 19013 (2017). DOI: 10.1051/epjconf/201714519013

9. Gromushkin D.M., Bogdanov F.A., Petrukhin A.A., Stenkin Yu.V., Yashin I.I., Yurin K.O., Shchegolev O.B., Stepanov V.I. TEMPORAL AND LATERAL DISTRIBUTIONS OF EAS NEUTRON COMPONENT MEASURED WITH PRISMA-32. Journal of Physics: Conference Series. 2017. T. 798. № 1. C. 012202. DOI: 10.1088/1742-6596/798/1/012202

10. Yurin, K.O., Bogdanov, F.A., Gromushkin, D.M., Semov, P.V., Stenkin, Yu.V. The recording system of the new EAS neutron component array (URAN). JoP: Conference Series, (2017), 798 (1) 012048. DOI: 10.1088/1742-6596/798/1/012048

11. D.M. Gromushkin, F.A. Bogdanov, S.S. Khokhlov, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, A.A. Petrukhin, I.A. Shulzhenko, Yu.V. Stenkin, I.I. Yashin and K.O. Yurin. The

array of scintillation detectors with natural boron for EAS neutrons investigations. *JINST* 12 (2017), C07029.

12. К.О. Юрин, Ф.А. Богданов, Д.М. Громушкин, Ю.В. Стенькин, О.Б. Щеголев. Спектр космических лучей, полученный на установке ПРИЗМА-32. Краткие сообщения по физике, №10, (2017), сс. 30-34.

Препринты

1. Yu.V. Stenkin and O.B. Shchegolev. On soil activation by cosmic rays at different altitudes. arXiv:submit/2018427 [astro-ph.HE] 25 Sep 2017.

Доклады на конференциях:

35 International Cosmic Ray Conference (Busan-2017):

1. Stenkin Yu.V., Primary cosmic ray energy spectrum above 1 PeV as measured by the PRISMA-YBJ array. (ICRC2017), ID488.

2. Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Cui S.W., He Ya.Yu., Li B.B., Ma X.H., Shchegolev O.B., Stepanov V.I., Zhao J. Primary cosmic ray mass composition above 1 PeV as measured by the PRISMA-YBJ array. (ICRC2017), ID485.

3. Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Cui S.W., He Ya.Yu., Li B.B., Ma X.H., Shchegolev O.B., Stepanov V.I., Zhao J. Natural thermal neutron flux long-term variations at 4300 m a.s.l. . (ICRC2017), ID094

4. S. H. Feng, X. H. Ma, ... Yu.V. Stenkin, et. al. EAS thermal neutron detection with the PRISMA-LHAASO-16 experiment. (ICRC2017), ID403.

LIII Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники (Москва-2017)

5. Стенькин Ю.В. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ: ОТ Г.Т. ЗАЦЕПИНА ДО СЕГОДНЯШНИХ ДНЕЙ. (http://web-local.rudn.ru/weblocal/kaf/rj/index.php?id=97&p=5636)

9. ПУБЛИКАЦИИ К ПРОЕКТУ «ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП (ГГНТ) БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ»

 V.N. Gavrin, B.T. Cleveland, V.V. Gorbachev, T.V. Ibragimova, A.V. Kalikhov, Yu.P. Kozlova, I.N. Mirmov, A.A. Shikhin and E.P. Veretenkin. Search for sterile neutrinos in gallium experiments with artificial neutrino sources. Physics of Particles and Nuclei, 2017, Vol. 48, No. 6, pp. 967–969.

- A A Shikhin, V N Gavrin, V V Gorbachev, T V Ibragimova, A V Kalikhov and V E Yants. Registration of ⁷¹Ge rare decays in radiochemical gallium experiments SAGE and BEST. J. Phys.: Conf. Ser, 2017, 798 012201
- V N Gavrin, B T Cleveland, V V Gorbachev, T V Ibragimova, A V Kalikhov, Yu P Kozlova, Yu A Malyshkin, I N Mirmov, A A Shikhin and E P Veretenkin . Search for sterile neutrinos on the Gallium Germanium Neutrino Telescope with artificial neutrino sources in the BEST experiment. J. Phys.: Conf. Ser, 2017, 798 012113
- Vladislav Barinov, Bruce Cleveland, Vladimir Gavrin, Dmitry Gorbunov, Tatiana Ibragimova. Revised neutrino-gallium cross section and prospects of BEST in resolving the Gallium anomaly. arXiv:1710.06326 [hep-ph]

10. ПУБЛИКАЦИИ К ЗАДАЧЕ «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА КОМПЛЕКСЕ УСТАНОВОК БПСТ»

1. Ю.Ф. Новосельцев, М.М. Болиев, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, И.М. Дзапарова, М.М. Кочкаров, Р.В. Новосельцева, В.Б. Петков, А.Ф. Янин. Поиск нейтринных вспышек в Галактике; 36 лет экспозиции. ЖЭТФ, т. 152, в. 1 (7), стр. 89–96, 2017.

2. А.Ф. Янин, И.М. Дзапарова, В.И. Волченко, Е.А. Горбачева, А.Н. Куреня, В.Б. Петков. Многоканальная измерительная система для сбора данных с матриц из кремниевых фотоумножителей. Измерительная техника, № 3, стр. 8 – 11, 2017.

3. I. Alikhanov, E. A. Paschos, Distributions for tau neutrino interactions observed through the decay $\tau \rightarrow \mu vv$. Phys. Lett. B 765 (2017) 272.

4. М.М. Болиев, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, И.М. Дзапарова, М.М. Кочкаров, Ю.Ф. Новосельцев, Р.В. Новосельцева, В.Б. Петков, А. Ф. Янин. Поток нейтронов на глубине 850 м.в.э. по данным БПСТ. Известия РАН, сер. физ., т. 81, № 4, с. 547–550, 2017.

5. Д.Д. Джаппуев, В.Б. Петков, А.С. Лидванский, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, Е.А. Горбачева, И.М. Дзапарова, А.У. Куджаев, Н.Ф. Клименко, А.Н. Куреня, О.И. Михайлова, К.В. Птицына, М.М. Хаджиев, А.Ф. Янин. Эксперимент «Ковер-3» – поиск диффузного гаммаизлучения с энергией свыше 100 ТэВ. Известия РАН, сер. физ., т. 81, № 4, с. 461–464, 2017.

M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva,
V.B. Petkov, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko and A.F. Yanin. Measuring Muon-Induced Fast
Neutrons at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Journal of Physics: Conf. Series 798
(2017) 012111

7. D.D. Dzhappuev, V.B. Petkov, A.S. Lidvansky, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, E.A. Gorbacheva, I.M. Dzaparova, N.F. Klimenko, A.U. Kudzhaev, A.N. Kurenya, O.I. Mikhailova,

K.V. Ptitsyna, M.M. Khadzhiev, and A.F. Yanin. Search for diffuse cosmic gamma rays of energy E > 100 TeV with the Carpet-3 air shower array. Journal of Physics: Conf. Series 798 (2017) 012028

8. A.F. Yanin, I.M. Dzaparova, E.A. Gorbacheva, A.N. Kurenya, M.M. Kochkarov, V.B. Petkov and A.V. Sergeev. Development of a scintillation detector with a photosensor based on matrices of silicon photomultipliers. Journal of Physics: Conf. Series 798 (2017) 012169

9. A.S. Lidvansky, V.B. Petkov, D.D. Dzhappuev, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, E.A. Gorbacheva, I.M. Dzaparova, N.F. Klimenko, A.U. Kudzhaev, A.N. Kurenya, O.I. Mikhailova, M.M. Khadzhiev, A.F. Yanin. Search for diffuse gamma radiation with energy > 100 TeV at the Carpet-3 experiment. PoS(ICRC2017)702

10. M.M. Kochkarov, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, A.N. Kurenya, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, P.S. Striganov, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, A.F. Yanin. The search for neutrino bursts from supernovae at the Baksan Underground Scintillation Telescope; 36 years of exposure. PoS(ICRC2017)960

 M.M. Boliev, A.V. Butkevich, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, R.V. Novoseltseva,
V.B. Petkov, P.S. Striganov, V.V. Volchenko, A.F. Yanin. Search for astrophysical sources of muon neutrinos with 38 years of data from the BUST detector. PoS(ICRC2017)943

12. M.M. Boliev, M.M. Kochkarov, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov. Neutron flux measurement using fast-neutron activation of 12B and 12N isotopes in hydrocarbonate scintillators. PoS(ICRC2017)216

Доклады на конференциях.

 В.Б. Петков, Р.В. Новосельцева. Эксперимент на БПСТ по поиску нейтринных вспышек от взрывов Сверхновых. Международный симпозиум "30-летие Сверхновой 1987А". Москва, 2-3 марта 2017. Устный доклад.

 М.М. Болиев. Поиск электронных нейтрино от гравитационных всплесков и космических гамма-всплесков на БПСТ. Международный симпозиум "30-летие Сверхновой 1987А". Москва, 2-3 марта 2017. Стендовый доклад.

 М.М. Кочкаров. Отклик сцинтилляционного счетчика БПСТ на нейтринный сигнал от коллапса Сверхновой. Международный симпозиум "30-летие Сверхновой 1987А". Москва,
2-3 марта 2017. Стендовый доклад.

4. В.Б. Петков. Astroparticle physics experiments in the Baksan Neutrino Observatory. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

5. I. Alikhanov. Lepton pair production in neutrino-nucleus scattering. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

6. М.М. Болиев. Поиск локальных источников нейтрино на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

7. И.М. Дзапарова. An experimental sample of a scintillation detector with a photodetector based on SiPM matrices. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

8. D.D. Dzhappuev. Search for diffuse gamma-ray emission with energy above 100 TeV. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

9. М.М. Кочкаров. Study of Cosmic-ray Muon-induced Neutrons at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

10. М.Г. Костюк. Аналитически решаемая модель ядерного каскада в атмосфере. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

11. A.U. Kudzhaev. The "Carpet-2" multipurpose air shower array of the Baksan Neutrino Observatory INR of RAS. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

12. M.N. Khaerdinov, N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky. Diagnosis of the electrical state of the atmosphere from variations in cosmic rays. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

13. N.S. Khaerdinov, M.N. Khaerdinov, A.S. Lidvansky. Geophysical phenomena accompanying the electrical breakdown of the stratosphere during thunderstorms. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

14. А.Н. Куреня. The hardware and software implementation of the data acquisition systems for air shower facilities "Andyrchy" and "Carpet-3". Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

15. Р.В. Новосельцева. The search for neutrino bursts from supernovae with the Baksan Underground Scintillation Telescope (BUST.. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

116

16. А.Ф. Янин. Development of a scintillation track detector based on multichannel photodetectors. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Нальчик, 6 – 8 июня 2017 г. Устный доклад.

17. M.N. Khaerdinov, N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky. Maximal possible potential difference in the stratosphere as derived from ground-based measurements of variations of secondary cosmic rays. International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics, 20-22 June, MEPHI, Moscow, Russia. Стендовый доклад.

18. N.S. Khaerdinov, M.N. Khaerdinov, A.S. Lidvansky. Local continuous luminosity of the mid-latitude night sky in thunderstorm periods, International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics, 20-22 June, MEPHI, Moscow, Russia. Стендовый доклад.

19. М.М. Boliev. Search for astrophysical neutrino sources at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Международная конференция "Сверхновая SN 1987A, кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия". КБР, Терскол (БНО); КЧР, Нижний Архыз (САО), 2 - 8 июля 2017 г. Устный доклад.

20. D.D. Dzhappuev. The Carpet-3 EAS array to search for cosmic diffuse ultra-high energy gamma-rays. Международная конференция "Сверхновая SN 1987A, кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия". КБР, Терскол (БНО); КЧР, Нижний Архыз (САО), 2 - 8 июля 2017 г. Устный доклад.

21. М.М. Kochkarov. Fast neutron background in BUST for core-collapse supernova searches. Международная конференция "Сверхновая SN 1987A, кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия". КБР, Терскол (БНО); КЧР, Нижний Архыз (САО), 2 - 8 июля 2017 г. Устный доклад.

22. А.Н. Куреня. Real-time multimessenger observation system for the search of optical counterparts of the high energy events. Международная конференция "Сверхновая SN 1987A, кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия". КБР, Терскол (БНО); КЧР, Нижний Архыз (САО), 2 - 8 июля 2017 г. Устный доклад.

23. В.Б. Петков. SN 1987A: the first observation of neutrino emission from supernovae. Международная конференция "Сверхновая SN 1987A, кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия". КБР, Терскол (БНО); КЧР, Нижний Архыз (САО), 2 - 8 июля 2017 г. Устный доклад.

24. В.Б. Петков. Multimessenger search for evaporating primordial black holes. Международная конференция "Сверхновая SN 1987A, кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия". КБР, Терскол (БНО); КЧР, Нижний Архыз (САО), 2 - 8 июля 2017 г. Устный доклад.

117

25. Р.В. Новосельцева. A search for neutrino bursts in the Galaxy at the Baksan Underground Scintillation Telescope; 37 years of exposure. Международная конференция "Сверхновая SN 1987A, кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия". КБР, Терскол (БНО); КЧР, Нижний Архыз (САО), 2 - 8 июля 2017 г. Устный доклад.

26. А.Ф. Янин. Development of a scintillation detectors based on the SiPM matrices: current status and prospects for the large volume neutrino detectors. Международная конференция "Сверхновая SN 1987A, кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия". КБР, Терскол (БНО); КЧР, Нижний Архыз (САО), 2 - 8 июля 2017 г. Устный доклад.

27. М.М. Boliev, М.М. Kochkarov. Search for astrophysical sources of muon neutrinos with 38 years of data from the BUST detector. 35th International Cosmic Ray Conference, Busan, Korea, 12 – 20 July 2017. Стендовый доклад.

28. M.M. Kochkarov. Neutron flux measurement using fast-neutron activation of 12B and 12N isotopes in hydrocarbonate scintillators. 35th International Cosmic Ray Conference, Busan, Korea, 12 – 20 July 2017. Стендовый доклад.

29. М.М. Kochkarov, Ю.Ф. Новосельцев. Search for Neutrino Bursts from Supernovae at the Baksan Underground Scintillation Telescope; 36 years of exposure. 35th International Cosmic Ray Conference, Busan, Korea, 12 – 20 July 2017. Стендовый доклад.

30. A.S. Lidvansky, D.D. Dzhappuev. Search for diffuse gamma radiation with energy

> 100 TeV at the Carpet-3 experiment. 35th International Cosmic Ray Conference, Busan, Korea, 12 – 20 July 2017. Стендовый доклад.

31. М.М. Болиев. Muon neutrino search from astrophysical sources. Международная конференция «Взрывающаяся Вселенная глазами роботов», Москва, 14 - 18 Августа 2017. Устный доклад.

32 М.М. Болиев, Ю.Ф. Новосельцев. Neutrino events search from SNe sources. Международная конференция «Взрывающаяся Вселенная глазами роботов», Москва, 14 - 18 августа 2017. Устный доклад.

33. I.M. Dzaparova. Application of matrices of silicon photomultipliers as multichannel photosensors fot the scintillation detectors. The Mount Elbrus Conference: from Deep Underground up to the Sky. Pyatigorsk, 11-15 September 2017. Устный доклад.

34. V.B. Petkov. Baksan Neutrino Observatory: 50th anniversary. History, current state and prospects. The Mount Elbrus Conference: from Deep Underground up to the Sky. Pyatigorsk, 11-15 September 2017. Устный доклад.

35. R.V. Novoseltseva. The search for neutrino bursts from supernovae with the Baksan Underground Scintillation Telescope (BUST). The Mount Elbrus Conference: from Deep Underground up to the Sky. Pyatigorsk, 11-15 September 2017. Устный доклад.

36. И.М. Дзапарова. Создание системы реального времени для проведения оперативного поиска и последующего изучения астрофизических объектов в оптическом и высокоэнергичном гамма диапазонах. Всероссийская астрономическая конференция - 2017 «Астрономия: познание без границ». Ялта, Крым, 17 - 22 сентября 2017 г. Устный доклад.

37. В.Б. Петков. Нейтринное излучение от взрывов Сверхновых с коллапсом ядра. SN 1987А и поиск нейтринного сигнала от Сверхновых в Галактике. Всероссийская астрономическая конференция - 2017 «Астрономия: познание без границ». Ялта, Крым, 17 - 22 сентября 2017 г. Приглашенный доклад.

38. A.U. Kudzhaev. The Carpet-3 air shower array to search for diffuse gamma rays with energy E>100 TeV. 3rd International Conference of Particle Physics and Astrophysics, Moscow, October 2 – 5, 2017. Устный доклад.

11. ПУБЛИКАЦИИ К ЗАДАЧЕ «НИЗКОФОНОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В БНО»

 A.V. Derbin, I.S. Drachnev, A.M. Gangapshev et al., "Recent Results of Search for Solar Axions Using Resonant Absorption by ⁸³Kr nuclei", Journal of Physics: Conference Series 934 (2017) 012018.

2. Gavrilyuk Y.M., Gangapshev A.M., Kazalov V.V., Kuzminov V.V., Tekueva D.A., Yakimenko S.P., Panasenko S.I., Ratkevich S.S., "The origin of the background radioactive isotope 127Xe in the sample of Xe enriched in 124Xe", Physics of Particles and Nuclei 48 (2017) № 1. pp. 42-46.

3. Gavrilyuk Y.M., Gangapshev A.M., Kazalov V.V., Kuzminov V.V., Panasenko S.I., Ratkevich S.S., Tekueva D.A., Yakimenko S.P., "Search for *2K*(2*v*)-capture of 124Xe", Physics of Particles and Nuclei 48 (2017) № 1. pp. 38-41.

4. S. S. Ratkevich, A. M. Gangapshev, Yu. M. Gavrilyuk, F. F. Karpeshin, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenko, M. B. Trzhaskovskaya and S. P. Yakimenko, "Comparative study of the double--shell-vacancy production in single- and double-electron-capture decay", Phys. Rev. C 96, 065502.

5. Alekseenko V.V., Gavrilyuk Y.M., Gangapshev A.M., Gezhaev A.M., Dzhappuev D.D., Kazalov V.V., Kudzhaev A.U., Kuzminov V.V., Tekueva D.A., Yakimenko S.P., Panasenko S.I., Ratkevich S.S., "The study of the thermal neutron flux in the deep underground laboratory DULB-4900", Physics of Particles and Nuclei 48 (2017) № 1. pp. 34-37.

6. Kuzminov V.V., Alekseenko V.V., Barabanov I.R., Etezov R.A., Gangapshev A.M., Gavrilyuk

Y.M., Gezhaev A.M., Kazalov V.V., Khokonov A.K., Panasenko S.I., Ratkevich S.S., "Some features and results of thermal neutron background measurements with the [ZnS(Ag)+6LiF] scintillation detector", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 841 (2017) pp. 156-161

7. E. N. Alexeev, Yu. M. Gavrilyuk, A. M. Gangapshev, A. M. Gezhaev, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenko, S. S. Ratkevich. "Observation of daily and annular variations in the 214Po half-life". Physics of Particles and Nuclei, November 2017, Volume 48, Issue 6, pp 873–875

 8. E. N. Alexeev, Yu. M. Gavrilyuk, A. M. Gangapshev, A. M. Gezhaev, V. V. Kazalov,
V. V. Kuzminov, S. I. Panasenko, S. S. Ratkevich. "Search for variations of the decay half-life of 213Po". Доклад на Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", посвященной 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории, [ICS SNP-2017 (Nalchik, June 06-08, 2017)].

9. E.N. Alexeev, Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich. "Results of two years search for the 213Po half-life variations". The talk at the Mount Elbrus Conference: from Deep Underground up to the Sky. – 2017 (Pyatigorsk, September 11-15, 2017).

11. ПУБЛИКАЦИИ ПО ПРОЕКТУ ГЕРДА (GERMANIUM DETECTOR ARRAY)

1. GERDA Col." Background free search for neutrinoless double- β decay with GERDA" Nature 544, 47-52, (06 April 2917)

 GERDA Col "Limits on uranium and thorium bulk content in Gerda Phase I detectors" Astroparticle Physics 91 (2017) 15-21

13. ПУБЛИКАЦИИ ПО ПРОЕКТУ СОЗДАНИЯ БОЛЬШОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА В БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЯИ РАН

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

2. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А.В. Вересникова и др., Детектор большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН для исследования природных потоков нейтрино для целей гео- и астрофизики, Ядерная физика, т. 80, № 3, с. 230, 2017.

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

4. T. Enqvist, I. Barabanov, L. Bezrukov, et al. Towards ¹⁴C-free liquid scintillator, J. Phys.

Conf. Ser. 888 (2017) no.1, 012098.

5. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А.В. Вересникова и др., Измерение содержания 14С в жидких сцинтил-ляторах с помощью де-тектора малого объема в низкофоновой камере Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, Ядерная физика, т. 80, № 6, с., 2017.