

Федеральное агентство научных организаций РФ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123
№ госрегистрации 116012210007
Инв.№



УТВЕРЖДАЮ
директор ИЯИ РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

19 января 2016 года

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА
(промежуточный за 2015 год)
0031-2015-0001

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



М.В.Либанов
19 января 2016 года

Москва 2016

Федеральное агентство научных организаций РФ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123

№ госрегистрации 116012210007

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
директор ИЯИ РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

19 января 2016 года

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА
(промежуточный за 2015 год)
0031-2015-0001

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

М.В.Либанов
19 января 2016 года

Москва 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н.



М.В.Либанов (введение, заключение,
разделы 1-3, 6-12, 14-18)
19.01.2016

Исполнители темы:



д.ф.-м.н. Рязская О.Г. (раздел 4)
19.01.2016



д.ф.-м.н. Гаврин В.Н. (раздел 5)
19.01.2016



д.ф.-м.н. Домогацкий Г.В. (раздел 13)
19.01.2016



к.ф.-м.н. Гангапшев А.М. (разделы 19,20)
19.01.2016

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 62 с., 146 рис.

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЁЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭНЕРГИИ, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, АДРОННЫЙ АКСИОН, ПЕНТАКВАРК, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ.

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2015 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

При участии коллектива ОТФ был построен спектр космических лучей в гибридном наборе данных обсерватории Telescope Array.

Измерено полное протон-протонное сечение при энергии в системе центра масс 95 ТэВ, с результатом 170 миллибарн.

По результатам измерений наземной решетки, собранным за период начиная с 2008 года, был осуществлен поиск возможных стационарных точечных источников нейтральных частиц при энергиях порядка 1 ЭэВ.

Совместно с ЗАО «Люминофор» разработан новый светосостав ЛРБ-1 (сцинтиллятор) на основе натурального бора для регистрации тепловых нейтронов. Полученный светосостав по свойствам не уступает применявшемуся ранее литиевому светосоставу с обогащением по литию-6 до 90%, а по цене в 5 раз ниже. Изготовлена пробная партия этого светосостава и на его основе изготовлены 4 эн детектора, площадью по 0.36 кв. м.

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

По данным работы с 1977 г по 2015 г нейтринных телескопов АСД и LVD получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.5 лет на 90% уровне достоверности. На установках LVD и АНС получено самое сильное ограничение на частоту звездных коллапсов в нашей Галактике.

Потоки нейтронов, образованных мюонами космических лучей под землей, являются основным источником фона в нейтринных экспериментах при поиске редких процессов, предсказываемых теорией. Детектор LVD, расположенный в низкофоновой лаборатории Гран Сассо на глубине 3650 м.в.э., регистрирует также мюоны и нейтроны,

генерируемые мюонами. С помощью детектора LVD измерена величина выхода нейтронов, образованных в LVD мюонами со средней энергией 16 ГэВ, рожденными при взаимодействии нейтринного пучка из ЦЕРНа в грунте Гран Сассо (CNGS) по данным 2008 - 2012гг. Проведено полное моделирование эксперимента методом Монте-Карло с помощью пакета программ Geant4. Учитывая доли генерированных нейтронов в Fe и сцинтилляторе, эффективность регистрации нейтронов и длины треков мюона, было получено, что выход нейтронов в сцинтилляторе равен $Y_n = (3.6 \pm 0.7) \times 10^{-5} \text{ n/muon}/(\text{г}/\text{см}^2)$, в железе - $Y_n = (23.2 \pm 4.6) \times 10^{-5} \text{ n/muon}/(\text{г}/\text{см}^2)$.

После тестовых извлечений с июля месяца было выполнено 4 солнечных измерения на установке с двухзонной галлиевой мишенью, извлечения проводились независимо из каждой зоны, которые поставлены на измерения в счетную систему. Предварительный результат комбинированного анализа измерений $92.4 \pm 27.4 / -24.6 \text{ SNU}$, в пределах ошибки согласуется с результатом за период измерений с 1990 по 2014 год, $64.6 \pm 2.4 \text{ SNU}$, указаны только статистические ошибки измерений.

Из экстракционных растворов получено 3500 кг галлия высокой чистоты, который после предварительной очистки помещен в мишень ГГНТ для поддержания массы мишени телескопа на постоянном уровне.

Завершено создание активной защиты новой счетной системы на основе низкофоновых ФЭУ и детектора антисовпадений NaI. В новой счетной системе выполняются фоновые измерения счетчиков для проведения сравнительного анализ с измерениями фонов этих счетчиков в счетной системе ГГНТ.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	3
Введение	6
Основные результаты	8
1 Исследование космических лучей высоких и сверхвысоких энергий и свойств нейтрино на установке Telescope array.	11
2 Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO	15
3 Исследование свойств нейтрино в экспериментах в Фермилабе: эксперименты E929 (NovA) и E938 (MINERvA)	17
4 Поиск нейтринного излучения от коллапсов звезд и изучение космических лучей, продуктов их взаимодействия на подземных детекторах ИЯИ РАН и Лаборатории LNGS	19
5 Исследование нейтринного излучения Солнца и нестандартных свойств нейтрино	21
6 Поиск новой физики в распадах заряженных каонов в эксперименте NA62 (ЦЕРН). Разработка и создание новых нейтринных детекторов в проекте LBNO DEMO, эксперимент WA105 (ЦЕРН).	24
7 Изучение гравитационных свойств антиматерии на установке AEGIS в ЦЕРНе. Поиск легкой темной материи на установке P348 в ЦЕРНе.	26
8 Исследование CP-нарушения и поиск новой физики в редких распадах B-мезонов в эксперименте БАК-би на Большом адронном коллайдере.	29
9 Исследование энергетической зависимости множественности частиц и плотности их распределения по псевдобыстроте от энергии в pp, p-Pb и в Pb+Pb столкновениях на установке ALICE	31
10 Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН	33
11.Изучение взаимодействий тау-нейтрино и разработка детекторов для поиска новых гипотетических частиц – (эксперимент OPERA).	36
12 Разработка и создание измерителей формы сгустков для линейного ускорителя Linac-4 ЦЕРН и исследование продольного движения в ускорителе.	38
13 Байкальский нейтринный эксперимент	41
14 Поиск всплесков гравитационного излучения на подземном детекторе ОГРАН	43

15. Неускорительная физика частиц: двойной безнейтринный бета распад ядер, осцилляции реакторных нейтрино.	45
16 Осцилляционные эксперименты с интенсивными пучками нейтрино и антинейтрино на протонном ускорителе JPARC (Япония)	48
17 Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов	51
18 Эксперимент Тунка/TAIGA	56
19 Проверка экспериментально наблюдаемого эффекта годовых и суточных вариаций константы распада ядра ^{214}Po на короткоживущем ядре ^{213}Po .	57
20 Исследование первичного космического излучения и поиск астрофизических источников космического излучения на комплексе установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.	58
Заключение.	61

ВВЕДЕНИЕ

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

Работы проводились в следующих направлениях:

в области физики нейтрино и астрофизики:

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

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

поиск стерильных нейтрино в нейтринных осцилляциях, создание с этой целью галлиевого нейтринного детектора для экспериментов с высокоинтенсивными искусственными источниками нейтрино, а также подготовка и проведение экспериментов на исследовательских и промышленных атомных реакторах;

регистрация нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд на подземных нейтринных телескопах, участие в международной системе Super-Nova Early Warning System;

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

в области физики космических лучей:

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

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

поиск и исследование антиматерии в составе космического излучения;

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

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

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

геофизические эффекты космических лучей и их влияние на климат.

Цели исследований в лаборатории ГГНТ на 2015 год:

- создание системы транспортировки жидкометаллической галлиевой мишени между химико-технологической системой экстракции германия ГГНТ и двухзонной облучательной установкой.

- получение первого результата годичного измерения потока солнечных нейтрино на ГГНТ с модернизированной химико-технологической системой телескопа и двухзонной галлиевой мишенью.

- получение 1000 кг галлия высокой чистоты Гл-99,9999 и черного галлия, восстановленного из экстракционных растворов ГГНТ.

- завершение создания активной защиты новой счетной системы на основе низкофоновых ФЭУ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Работы выполнялись по следующим проектам:

Мониторинг нейтринного излучения Солнца;

Калибровочный эксперимент на двухзонной галлиевой мишени;

Исследование природных потоков мюонов и нейтрино высоких энергий, поиск магнитных монополей и частиц темной материи в экспериментах на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе;

Коллапс и физика нейтрино на больших подземных сцинтилляционных установках;

Безнейтринный двойной бета распад ;

Разработка и создание сегментированных сцинтилляционных детекторов для регистрации нейтрино в области энергий ~ 1 ГэВ;

Изучение космических лучей сверхвысоких энергий международной коллаборацией Telescope array;

Измерение сечений взаимодействия нейтрино с ядрами углерода;

Исследование нейтринных осцилляций в потоках нейтрино от реакторов;

Изучение адронной компоненты ШАЛ;

Низкофоновые эксперименты в БНО;

Поиск массы нейтрино прямым методом в бета–распаде трития;

ОГРАН – Опто-акустическая Гравитационная Антенна для поиска и исследования гравитационных волн и слабых сейсмических процессов;

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп;

Тунка;

Исследование содержания изотопа C^{14} в углеводородах;

Теории фундаментальных взаимодействий вне стандартной модели, физика частиц и космология;

Теоретические исследования новой физики за пределами Стандартной Модели;

Экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных свойств и структуры материи на ТэВ-ном масштабе в эксперименте CMS на LHC;

Поиск кварк-глюонной материи при столкновении ультрарелятивистских ядер – эксперимент ALICE на LHC;

Модернизация и исследование характеристик нового волоконного трекера LHCb;

Разработка конструкции нового годоскопа заряженных частиц;

Исследование характеристик прототипов электроники детектора NA62 на тестовых пучках ускорителя и космических мюонах;

Изучение фундаментальных свойств антиматерии в гравитационном поле в эксперименте AEGIS в ЦЕРН;

Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН – эксперимент NA61;

Новые лёгкие частицы за пределами Стандартной модели: поиск солнечных аксионов и фотонов скрытого сектора на установке CAST;

Развитие экспериментальной методики исследования взаимодействий мюонных нейтрино и идентификации рождения тау-нейтрино в детекторе OPERA на пучках нейтрино из ЦЕРН;

Изучение фундаментальных свойств нейтрино в эксперименте ICARUS;

LINAC4 - повышение светимости пучка ускорительного комплекса Большого адронного коллайдера;

Исследование и разработка новых узлов ускорителя Большой адронный коллайдер;

Модернизация системы регистрации адронного калориметра детектора CMS;

Информационно-вычислительное обеспечение исследований ИЯИ РАН с использованием технологии ГРИД.

Далее приведены некоторые результаты.

1 Исследование космических лучей высоких и сверхвысоких энергий и свойств нейтрино на установке Telescope array.

Руководитель И.И.Ткачёв

Источники космических лучей сверхвысоких энергий до сих пор не идентифицированы, химический состав первичных частиц на этих энергиях остается неопределенным, а физическая природа подавления спектра на высоких энергиях не бесспорна. Соответствующие проблемы являются приоритетными в астрофизике частиц и задача их решения входит в «дорожную карту» развития европейской и мировой науки. Для достижения поставленной цели недавно были построены и вошли в строй две самые крупные в истории обсерватории космических лучей: им. Пьера Оже в южном полушарии Земли, и "Telescope Array" в северном. В составе установки Telescope Array одновременно работают 3 флуоресцентных телескопа и наземная решетка из 507 детекторов, регистрирующие ШАЛ, вызванные космическими лучами сверхвысоких энергий. Также функционирует лидар, центральный лазер и линейный ускоритель электронов с энергией 40 МэВ. Установка стабильно работает в гибридном режиме, собрав к сегодняшнему дню более 5.5 лет гибридных данных. В 2013 году введено в строй низкоэнергетическое расширение обсерватории, TALE. Целью настоящего проекта является исследование всего круга вышеописанных проблем, на основе данных, собранных обсерваторией Telescope Array, и в составе международной коллаборации.

Стоит отметить, что в 2015 г. при участии коллектива ОТФ был построен спектр космических лучей в гибридном наборе данных.

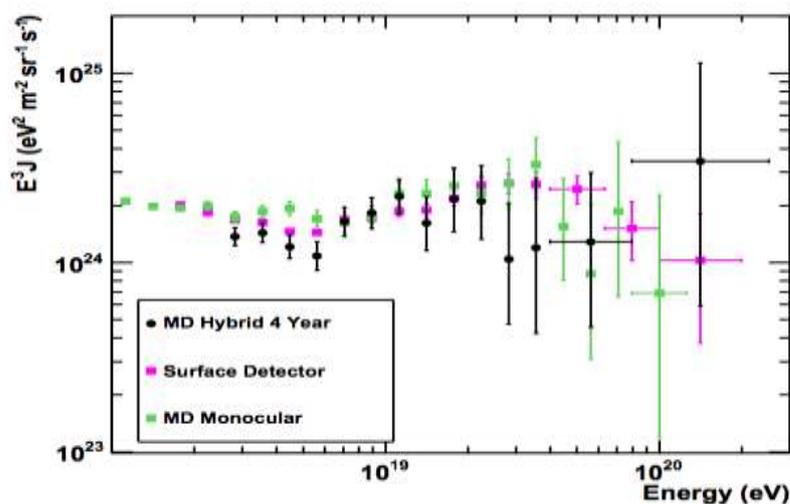


Рисунок 1 - Спектр космических лучей по гибриднему набору данных - чёрные символы. Спектры наземной решетки и флуоресцентного телескопа также представлены для сравнения.

Измерено полное протон-протонное сечение при энергии в системе центра масс 95 ТэВ, с результатом 170 миллибарн. Это измерение соответствует рекордному значению энергии на сегодняшний день.

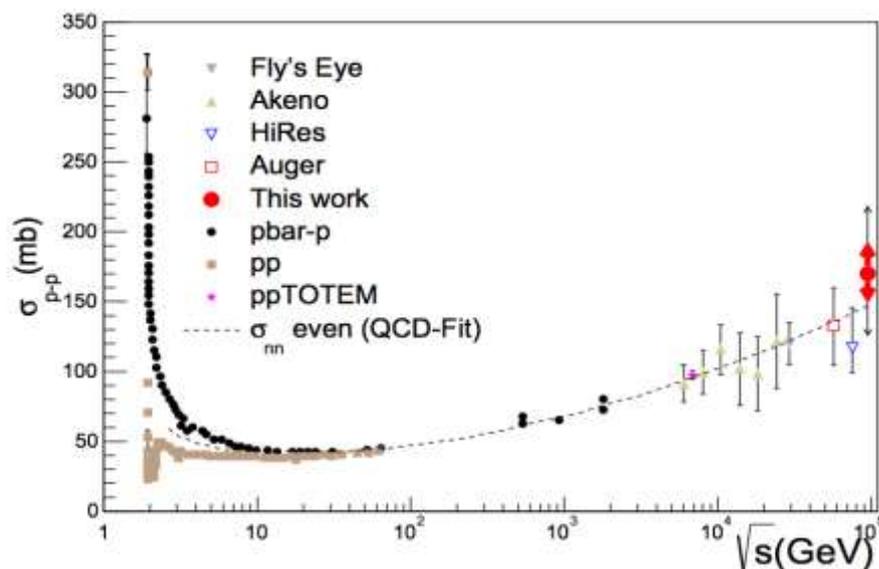


Рисунок 2 - Значения протон-протонного сечения, измеренные разными экспериментами. Крайняя правая точка - наш результат.

Используя набор гибридных событий, т.е. событий зарегистрированных одновременно наземной решеткой и флюоресцентными детекторами, нами было измерено сечение неупругого взаимодействия протонов с ядрами воздуха при энергии в системе центра масс 95 ТэВ. Это сечение оказалось равным 567 миллибарн. Отсюда, используя Глауберовский формализм, было найдено полное протон-протонное сечение, с результатом 170 миллибарн. Этот фундаментальный параметр невозможно измерить на ускорителях при данных энергиях.

Совместное использование данных флюоресцентных телескопов с данными наземной решетки позволяет существенно улучшить восстановление физических наблюдаемых для широких атмосферных ливней, и, в частности, дает более точное определение энергии первичной частицы. Используя такие гибридные данные нами был построен спектр космических лучей при энергиях выше 1 ЭэВ. В целом, и в пределах ошибок, спектр находится в согласии с полученными ранее спектрами по независимым данным флюоресцентных детекторов и по независимым данным наземной решетки,

которые, по отдельности, имеют существенно более высокую статистику, но худшее качество восстановления событий.

По результатам измерений наземной решетки, собранным за период начиная с 2008 года, нами был осуществлен поиск возможных стационарных точечных источников нейтральных частиц при энергиях порядка 1 ЭэВ. Статистически значимого избытка таких событий найдено не было. Исследованы также корреляции с каталогом ярких Галактических источников по данным орбитального телескопа Ферми. В пределах статистических неопределенностей значимые корреляции не найдены. Отсюда нами получено ограничение на средний поток нейтронов на уровне 0.07 на квадратный километр в год с 95% значимостью. Это является наиболее сильным на сегодняшний день ограничением в северном полушарии. В частности, ограничение на поток от источника Лебедь X-3 является на порядок более сильным, чем предыдущие измерения.

Предложен новый метод измерения генерации нейтронов мюонами под землей.

В 2015 году начат прямой эксперимент по измерению генерации нейтронов мюонами в свинце. Для этого внутри ячеистой структуры LVD размещены дополнительные конструкции между четырьмя парами счетчиков и установлены в них трехсантиметровые пластины свинца (полная масса Pb -2040 кг). Набранная статистика по генерации нейтронов в свинце составила 7 месяцев. Получены первые результаты измерений

Публикации в 2015 г. :

- реферируемые журналы

[1] R.U. Abbasi, ..., O. Kalashev, V. Kuzmin, M. Pshirkov, G. Rubtsov, I. Tkachev, S. Troitsky .. et al, Measurement of the proton-air cross section with Telescope Array's Middle Drum detector and surface array in hybrid mode. *Phys.Rev. D*92 (2015) 3, 032007.

[2] R.U. Abbasi, ..., O. Kalashev, V. Kuzmin, M. Pshirkov, G. Rubtsov, I. Tkachev, S. Troitsky .. et al, The hybrid energy spectrum of Telescope Array's Middle Drum Detector and surface array. *Astropart.Phys.* 68 (2015) 27-44.

[3] R.U. Abbasi, ..., O. Kalashev, V. Kuzmin, M. Pshirkov, G. Rubtsov, I. Tkachev, S. Troitsky .. et al, A Northern Sky Survey for Point-Like Sources of EeV Neutral Particles with the Telescope Array Experiment. *Astrophys.J.* 804 (2015) 2, 133.

[4] T. Abu-Zayyad, ..., O. Kalashev, V. Kuzmin, M. Pshirkov, G. Rubtsov, I. Tkachev, S. Troitsky .. et al, Energy Spectrum of Ultra-High Energy Cosmic Rays Observed with the Telescope Array Using a Hybrid Technique. *Astropart.Phys.* 61 (2015) 93-101.

труды конференций

[1] Pierre Auger Observatory and Telescope Array: Joint Contributions to the 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015), Telescope Array and Pierre Auger Collaborations (R.U. Abbasi et al.). e-Print: arXiv:1511.02103 [astro-ph.HE]

[2] The IceCube Neutrino Observatory, the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array: Joint Contribution to the 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015) , IceCube and Pierre Auger and Telescope Array Collaborations (M.G. Aartsen et al.). e-Print: arXiv:1511.02109 [astro-ph.HE]

Доклады на конференциях в 2015 г. :

1. М. Пширков, И. Ткачев, Пленарный доклад "Recent results from the Telescope Array", 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Москва, Россия, 20-26 августа 2015.

2. Г. Рубцов, Пленарный доклад "Multimessenger studies: CR+gamma+neutrino", The International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics", Валдай, Россия, 1-8 февраля 2015,

3. Г. Рубцов, И. Ткачев, С. Троицкий, "Telescope Array anisotropy summary", 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC), Гаага, Нидерланды, 30 июля - 6 августа 2015.

4. Г. Рубцов, "Telescope Array search for photons and neutrinos with the surface detector data", 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC), Гаага, Нидерланды, 30 июля - 6 августа 2015.

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

Руководитель Стенькин Ю.В.

Совместно с ЗАО «Люминофор» разработан новый светосостав ЛРБ-1 (сцинтиллятор) на основе натурального бора для регистрации тепловых нейтронов. Полученный светосостав по свойствам не уступает применявшемуся ранее литиевому светосоставу с обогащением по литию-6 до 90%, а по цене в 5 раз ниже. Изготовлена пробная партия этого светосостава и на его основе изготовлены 4 эн детектора, площадью по 0.36 кв. м.

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

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

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

На установке PRISMA-YBJ проводился непрерывный набор и анализ данных, как по изучению ШАЛ, так и вариаций фоновых потоков тепловых нейтронов. Проведенные монте-карловские расчеты показали хорошее согласие с экспериментом. По этим результатам были подготовлены и посланы в журналы 3 статьи. Были также представлены 4 доклада на международных конференциях: 2 на TAUP-2015 в Турине и 2 на 34й ICRC в Гааге.

Список публикаций за 2015 г.

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

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

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

4. Д.М. Громушкин, В.И. Волченко и др. Спектр энерговыделений в установке ПРИЗМА-32. Известия РАН, серия Физическая, 2015, Vol. 79, No. 3, pp. 414–416.
5. В.В. Алексеенко, Д.М. Громушкин и др. Вариации нейтронного потока во время гроз. Известия РАН, серия Физическая, (2015), Vol. 79, No. 5, pp. 739–741.
6. Yu.V. Stenkin, V.V. Alekseenko, Z.Y. Cai, Z. Cao, C. Cattaneo, E. Giroletti, S.W. Cui, X.W. Guo, D.M. Gromushkin, H.H. He, Y. Liu, X.H. Ma, O.B. Shchegolev, V.I. Stepanov, A.L. Tsyabuk, P. Vallania, C. Vigorito and J. Zhao. Seasonal thermal neutron flux variations at high altitude. Proc. 34th ICRC, Hague, 2015, PoS(ICRC2015) 343.
7. A.A. Petrukhin, D.M. Gromushkin, O.B. Shchegolev, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, I.I. Yashin. EAS spectrum in thermal neutrons measured with PRISMA-32. Proc. 34th ICRC, Hague, 2015, PoS(ICRC2015) 427.
8. B. Bartoli, P. Bernardini, X.J. Bi et al. Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in Extensive Air Showers selected by the ARGO-YBJ experiment. ArXiv:1512.01326v1 [astro-ph.IM] 4 Dec 2015.
9. YU.V.STENKIN, D.M.GROMUSHKIN, A.A.PETRUKHIN, O.B.SHCHEGOLEV, V.I. STEPANOV, V.I.VOLCHENKO, I.I. YASHIN AND E.A. ZADEBA. EAS thermal neutron lateral and temporal distributions. arXiv:1512.02042v1 [astro-ph.IM] 7 Dec 2015.
10. Yu. V. Stenkin, V.V. Alekseenko, D.M. Gromushkin, O.B. Shchegolev and V.P. Sulakov. Barometric pumping effect for radon-due neutron flux in underground laboratories. TAUP-2015, JoP, in press
11. O.B. Shchegolev, V.V. Alekseenko, D.M. Gromushkin, X. Ma, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, J. Zhao. Electron and thermal neutron lateral distribution functions in EAS at high altitude. TAUP-2015, JoP, in press.
12. Yuri Stenkin. The PRISMA project and related questions. 6th WASDHA, Chengdu, 2015. Invited talk. <http://indico.ihep.ac.cn/event/5179/material/slides/27.pdf>

3 Исследование свойств нейтрино в экспериментах в Фермилабе: эксперименты E929 (NOvA) и E938 (MINERvA)

Руководитель А.В.Буткевич

Целью эксперимента NOvA (NuMI Off-axis ν_e Appearance) является изучение $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций нейтрино и определение фазы нарушения CP-инвариантности, иерархии масс нейтрино, а также, уточнение уже измеренных параметров осцилляций нейтрино. В этом эксперименте используется самый мощный нейтринный пучок off axis NuMI (Neutrino Main Injector) мощностью 700 кВт и энергией нейтрино 1-3 ГэВ и два подобных детектора - ближний и дальний, оптимизированные для регистрации взаимодействий электронных нейтрино. Дальний детектор расположен на расстоянии 810 км и на глубине 4 м под землей в районе Аш-Ривер (шт. Миннесота).

В 2015 г. работа группы ИЯИ в эксперименте включала определение эффективности и чистоты регистрации событий обусловленных взаимодействием электронных и мюонных нейтрино в детекторах НОВА и ожидаемого числа сигнальных и фоновых событий на дальнем детекторе.

Результаты 2015.

В международном эксперименте NOvA были получены первые результаты, связанные с исследованием эффектов осцилляций в пучках мюонных нейтрино. В отсутствие осцилляций нейтрино экспериментаторы ожидали зарегистрировать в дальнем детекторе 201 мюонное нейтрино. Реально было зарегистрировано только 33 события от взаимодействия этих нейтрино, Это является неоспоримым доказательством, что мюонные нейтрино исчезли из пучка из-за осцилляционных переходов в тау и электронные нейтрино. Аналогично, если бы мюонные нейтрино не осциллировали в электронные нейтрино, то в дальнем детекторе ожидалось бы зарегистрировать только одно взаимодействие электронного нейтрино. На самом деле было зарегистрировано шесть таких событий, что подтверждает превращение части мюонных нейтрино в электронные нейтрино. Наличие в Фермилабе самого интенсивного в мире пучка нейтрино, а также то, что только этот эксперимент способен, при некоторых условиях, измерить иерархию масс нейтрино, предоставляет эксперименту NOvA конкурентные преимущества.

Публикации за 2015год:

[1] H. Duyang et al. (NOvA Collaboration) " Cosmic ray induced EM shower in the NOvA detektor." [arXiv:1511.00351].

[2] J. Bian et al. (NOvA Collaboration) " First result of $\nu_{\mu e}$ appearance analysis and electron neutrino identification at NOvA' [arXiv:1510.05708].

- [3] R. B. Patterson et al. (NOvA Collaboration) " Oscillation measurements with the NuMI beam" Nucl.Part.phys.Proc. 265-266 (2015) 153-158
- [4] J. Coelho et al. (NOvA Collaboration) " Status of NuMI experiments:MINOS+ and NOvA" Nucl.Part.phys.Proc. 260 (2015) 178-181

Целью эксперимента MINERvA является изучение рассеяния нейтрино на ядрах. Программа эксперимента включает измерение сечений взаимодействия нейтрино с различными ядерными мишенями от протона до свинца в области энергий квази-упругого рассеяния, рождения резонансов и глубоко-неупругого рассеяния. Эксперимент находится в стадии набора и анализа данных.

Результаты 2015.

В 2015 году был завершен анализ двух-частичных событий, обусловленных взаимодействием нейтрино на ядрах углерода и водорода в сцинтилляторе. Получены дифференциальные сечения рассеяния нейтрино, как функции квадрата переданного 4-х импульса. Данные хорошо согласуются с предсказаниями модели фермиевского газа.

Публикации за 2015 год:

- [1] P.A. Rodrigues et al. (MINERvA Collaboration) " Identification of nuclear effects in neutrino-carbon interactions at low three-momentum transfer" [arXiv:1511.05944]
- [2] J. Wolcott et al. (MINERvA Collaboration) " Electron neutrino charged-current quasielastic scattering in the MINERvA experiment" [arXiv:1510.08342]
- [3] J. Wolcott et al. (MINERvA Collaboration) " Measurement of electron neutrino quasielastic and quasielastic-like scattering on hydrocarbon at $E_{\nu}=3.6$ GeV" [arXiv:1509.05729]
- [4] T. Le et al. (MINERvA Collaboration) " Single neutral-pion production by charged-current antineutrino interaction on hydrocarbon at $E_{\nu}=3.6$ GeV" Phys.Lett. B749 (2015) 130-136 [arXiv:1503.02107]
- [5] L.Aliaga et al. (MINERvA Collaboration) " MINERvA neutrino detector response measured with test-beam data" Nucl.Instrum. Meth. A789 (2015) 28-42 [arXiv:1501.06431]
- [6] J. Wolcott et al. (MINERvA Collaboration) " Measurement of electron neutrino CCQE-like quasielastic scattering in the MINERvA experiment" [arXiv:1501.05214]
- [7] J. Wolcott et al. (MINERvA Collaboration) " Implication of recent MINERvA result for neutrino energy reconstruction" [arXiv:1501.05210]
- [8] T. Walton et al. (MINERvA Collaboration) " Measurement of muon plus proton final state in neutrino interactions on hydrocarbon at $E_{\nu} \sim 4.2$ GeV. Phys.Rev. D91, (2015), 7, 071301 [arXiv:1409.4497[hep-ex]].
- [9] B. Eberly et al. (MINERvA Collaboration) " Charged pion production in ν_{μ} interaction on hydrocarbon at $\langle E_{\nu} \rangle \sim 4$. GeV. Phys.Rev. D92 (2015) 9, 092008 [arXiv:1406.6415[hep-ex]]

4 Поиск нейтринного излучения от коллапсов звезд и изучение космических лучей, продуктов их взаимодействия на подземных детекторах ИЯИ РАН и Лаборатории LNGS.

Руководитель: О.Г.Ряжская

Проект направлен на проведение исследований в области нейтринной астрофизики и физики космических лучей. Установки АСД (Артемовской Научной станции) и LVD (Гран Сассо, Италия), построенные сотрудниками Лаборатории электронных методов детектирования нейтрино ИЯИ РАН, работают по программе поиска нейтринного излучения от коллапсов звездных ядер. По данным работы с 1977 г по 2015 г нейтринных телескопов АСД и LVD получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.5 лет на 90% уровне достоверности. На установках LVD и АНС получено самое сильное ограничение на частоту звездных коллапсов в нашей Галактике.

Потоки нейтронов, образованных мюонами космических лучей под землей, являются основным источником фона в нейтринных экспериментах при поиске редких процессов, предсказываемых теорией. Детектор LVD, расположенный в низкофоновой лаборатории Гран Сассо на глубине 3650 м.в.э., регистрирует также мюоны и нейтроны, генерируемые мюонами. С помощью детектора LVD измерена величина выхода нейтронов, образованных в LVD мюонами со средней энергией 16 ГэВ, рожденными при взаимодействии нейтринного пучка из ЦЕРНа в грунте Гран Сассо (CNGS) по данным 2008 - 2012гг. Проведено полное моделирование эксперимента методом Монте-Карло с помощью пакета программ Geant4. Учитывая доли генерированных нейтронов в Fe и сцинтилляторе, эффективность регистрации нейтронов и длины треков мюона, было получено, что выход нейтронов в сцинтилляторе равен $Y_n = (3.6 \pm 0.7) \times 10^{-5} \text{ n/muon}/(\text{г}/\text{см}^2)$, в железе - $Y_n = (23.2 \pm 4.6) \times 10^{-5} \text{ n/muon}/(\text{г}/\text{см}^2)$.

Полученные результаты генерации нейтронов мюонами с энергией 16 ГэВ в сцинтилляторе LVD соответствуют величинам, измеренным в работах Л. Безруков и др., ЯФ 17, 1973 г. для энергии мюонов $E=16.7 \text{ МэВ}$ и F. Boehm и др., 2000 г. для $E=16.5 \text{ ГэВ}$ в пределах ошибок.

Величина выхода нейтронов для железа в LVD получена для энергии 16 ГэВ, в работе Горшкова, 1971 г был измерен выход для энергии 11.0 и 17.8 ГэВ. Новые данные помогают уточнить зависимости генерации нейтронов от энергии мюонов и атомного номера вещества.

Работа доложена на конференциях:

1. V. Ashikhmin et al. "Joint analysis of experimental data on the search for neutrinos from stellar collapses using the LVD and BUST detectors", (poster) 17th Lomonosov

Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Moscow, 20-26 August, 2015

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

Опубликована статья:

Н.Ю. Агафонова и др. "Совместный анализ экспериментальных данных по поиску нейтрино от звездных коллапсов на детекторах LVD и БПСТ", Известия РАН, Сер. физ. 2015, Том 79, N3, с. 442–445

N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, M. M. Boliev, V. V. Volchenko, G. V. Volchenko, V. L. Dadykin, I. M. Dzaparova, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, M. M. Kochkarov, Yu. F. Novoseltsev, R. V. Novoseltseva, A. S. Malgin, V. B. Petkov, O. G. Ryazhskaya, I. R. Shakiryanova, V. F. Yakushev, A. F. Yanin, and LVD Collaboration, "Joint Analysis of Experimental Data to Search for Neutrinos from Collapsing Stars Using the LVD and BUST Apparata", Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol. 79, No. 3, pp. 407–409.

5 Исследование нейтринного излучения Солнца и нестандартных свойств нейтрино

Руководитель проекта: В.Н. Гаврин

Объявленные цели по Программе исследований на 2015 г

- Будет создана система транспортировки жидкометаллической галлиевой мишени между химико-технологической системой экстракции германия ГГНТ и двухзонной облучательной установкой.

- Будет получен первый результат годичного измерения потока солнечных нейтрино на ГГНТ с модернизированной химико-технологической системой телескопа и двухзонной галлиевой мишенью.

- Будет получено 1000 кг галлия высокой чистоты Гл-99,9999 и чернового галлия, восстановленного из экстракционных растворов ГГНТ.

- Будет завершено создание активной защиты новой счетной системы на основе низкофоновых ФЭУ.

В рамках программы модернизации ГГНТ для нового эксперимента (BEST) по исследованию стерильных переходов электронных нейтрино на очень короткой базе создана система для транспортировки жидкометаллической галлиевой мишени между химико-технологической системой экстракции германия ГГНТ и двухзонной облучательной установкой. Система содержит 2 изолированные независимые линии для транспортировки облученной мишени из каждой, внутренней и внешней, зоны облучательной установки в отдельные независимые системы экстракции германия.





На фотографиях представлены отдельные узлы системы для транспортировки жидкометаллической галлиевой мишени между химико-технологической системой экстракции германия ГГНТ и двухзонной облучательной установкой

С целью оценки фонового счета в измерениях на новом комплексе установок ГГНТ было проведено 8 тестовых извлечений, которые имели короткий период счета (~ 1 месяц).

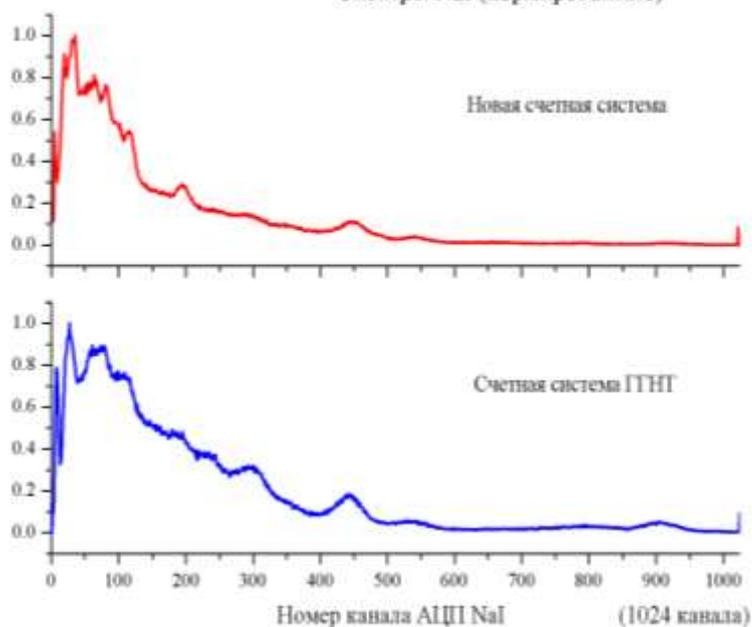
После тестовых извлечений с июля месяца было выполнено 4 солнечных измерения на установке с двухзонной галлиевой мишенью, извлечения проводились независимо из каждой зоны, которые поставлены на измерения в счетную систему. Предварительный результат комбинированного анализа измерений $92.4 \pm 27.4 / -24.6$ SNU, в пределах ошибки согласуется с результатом за период измерений с 1990 по 2014 год, 64.6 ± 2.4 SNU, указаны только статистические ошибки измерений.

Из экстракционных растворов получено 3500 кг галлия высокой чистоты, который после предварительной очистки помещен в мишень ГГНТ для поддержания массы мишени телескопа на постоянном уровне.

Завершено создание активной защиты новой счетной системы на основе низкофоновых ФЭУ и детектора антисовпадений NaI. В новой счетной системе выполняются фоновые измерения счетчиков для проведения сравнительного анализ с измерениями фонов этих счетчиков в счетной системе ГГНТ.



Спектры NaI (нормированные)



Слева – детектор антисовпадений NaI новой счетной системы в медной защите, справа - спектры с детектора NaI: новая счетная система - красный цвет, счетная система ГНТ - синий цвет.

Публикация: V. Gavrin, B. Cleveland, S. Danshin, S. Elliott, V. Gorbachev, T. Ibragimova, A. Kalikhov, T. Knodel, Yu. Kozlova, Yu. Malyskin, V. Matveev, I. Mirmov, J. Nico, R.G.H. Robertson, A. Shikhin, D. Sinclair, E. Veretenkin, and J. Wilkerson. Current status of new SAGE project with ^{51}Cr neutrino source. *Physics of Particles and Nuclei*. Vol. 46, No. 2. pp. 131-137.

6 Поиск новой физики в распадах заряженных каонов в эксперименте NA62 (ЦЕРН).

Разработка и создание новых нейтринных детекторов в проекте LBNO DEMO, эксперимент WA105 (ЦЕРН).

Руководитель Ю.Г.Куденко

Важнейшие результаты, полученные в 2015 года:

1. Полностью запущена установка и проведен первый физический сеанс с каонным пучком низкой интенсивности в эксперименте NA62 с июля по декабрь 2015 г. Набрано примерно 10% от полной статистики. Начат анализ данных.

2. Группами ИЯИ РАН, ИФВЭ (Протвино) и Университетом Пизы (Италия) разработан и создан новый детектор заряженных частиц, состоящий из 320 сцинтилляционных детекторов с оптоволоконным съемом сигнала и 600 микропиксельных лавинных фотодиодов. В ИЯИ РАН разработана и изготовлена электроника детектора, протестированы все фотодетекторы и оптимизированы их параметры. Завершена сборка детектора в ЦЕРНе, который показан на рис.1



Рис.1. Нижняя половина детектора NtwCHOD во время сборки в ЦЕРНе.

3. В рамках проекта LBNO DEMO создан полностью активный детектор нейтрино AIDA, состоящий из 9000 сцинтилляционных детекторов. Завершена разработка магнитного детектора нейтрино Baby-MIND, массой около 40 тонн и имеющий около 3000 активных детекторов. Завершено изготовление 310 вертикальных детекторов заряженных частиц и начато изготовление горизонтальных детекторов длиной 3 метра каждый. В октябре 2015 года такие детекторы были протестированы на пучке заряженных

частиц T9 в ЦЕРНе. Полученные результаты (световыход, эффективность, временное разрешение) полностью удовлетворяют требованиям эксперимента с длинной базой.

Публикации:

1. K. Massri... A. Khotjansev, Y. Kudenko et al. Precision tests of the Standard Model with

Kaon decays at CERN. *Journal of Physics*, 631 (2015) 012040.

2. F. Hahn... Y. Kudenko et al. Prospects for $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ observation at CERN in NA62. *Journal of Physics*, 631 (2015) 012041.

3. A. V. Mefodiev and Y. G. Kudenko, The design of the totally active scintillator detector, *J. Phys. Conf. Ser.* **653** (2015) 1, 012016.

4. M. Anelli.. Y. Kudenko, O. Mineev et al. A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SP, arXiv:1504.04956 [physics.ins-det].

- доклады на конференциях и школах

1. S. Fedotov, A. Kleymenova, O. Mineev et al. 3X3 MM² SENSL SiPM CHARACTERIZATION FOR THE NEW CHOD DETECTOR OF THE NA62 EXPERIMENT, CERN, poster at Conference PD15, July 2015, Moscow, Russia.

2. A. Kleymenova, Experiment NA62 for measurement of $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ decay talk at 58 MPTI Conference, November 2015 Moscow, Russia

7 Изучение гравитационных свойств антиматерии на установке AEGIS в ЦЕРНе.
Поиск легкой темной материи на установке P348 в ЦЕРНе.

Руководители: В.А.Матвеев, С.Н.Гниненко

В эксперименте АЕГИС в международном центре ЦЕРН предполагается впервые в мире провести измерения ускорения свободного падения свободных атомов антиводорода, а также получить данные по спектроскопии возбужденных состояний этих атомов с целью проверки СРТ-теоремы об эквивалентности свойств материи и антиматерии. В настоящее время АЕГИС является единственной в мире установкой, предназначенной для изучения гравитационных свойств и спектроскопии антиводорода.

Обнаружение отличия в величинах ускорения свободного падения атома водорода и атома антиводорода было бы важнейшим открытием в фундаментальных исследованиях в области физики элементарных частиц. Такое открытие было бы краеугольным камнем в построении квантовой теории гравитации.

Работы, предусмотренные очередным этапом по эксперименту АЕГИС, выполнены. Этот этап в основном был связан с дальнейшей проработкой и доведением основных узлов установки, с пониманием, исследованием и моделированием ключевых процессов по формированию пучка холодных атомов антиводорода, а также с анализом результатов проводки в 2012 г. первого пучка холодных антипротонов в экспериментальный зал и началом монтажных и пусконаладочных работ установки в экспериментальном зале. В результате конструкторской и научной работы в течение 2010–2015 гг. удалось получить результаты, существенно продвигающие проект к проведению первых измерений и получению первых результатов. Так, сотрудники ИЯИ РАН:

- предложили дальнейшее усовершенствование метода формирования холодных атомов позитрония;
- предложили улучшенную схему накопления позитронов;
- участвовали в работах по получению проектных значений интенсивности и времени накопления позитронов;
- предложили дальнейшее усовершенствование метода формирования коллимированного пучка холодных атомов антиводорода;
- предложили дальнейшее развитие программы экспериментов по поиску новой физики в редких процессах с позитронием.

В течение лета 2015 г. коллаборация AEGIS провела успешный запуск установки, в ходе которого была улучшена эффективность ввода позитронов в сверхпроводящий магнит с полем 5 Тл, протестированы и оптимизированы возможные схемы детектирования атомов антиводорода (кремниевые детекторы, эмульсии). По окончании этих успешных тестов основные усилия были сконцентрированы на завершении сборки аппарата. Состояние детектора на сегодняшний день:

- центральные секции доставлены в ЦЕРН и установлены в аппарат 5 Тл;
- центральный детектор антипротонов (волоконно-оптический сцинтилляционный детектор) установлен в ловушку 1 Тл;
- все периферийные сцинтилляционные детекторы собраны и установлены;
- позитронный аккумулятор собран и протестирован, позитроны от криогенного модератора проведены в ловушку и затем в аккумулятор;
- магнит с полем 5 Тл и с соответствующей ловушкой антипротонов готов и установлен в зоне эксперимента;
- ловушка 1 Тл (в т. ч. мишени для производства атомов позитрония и лазерной оптики) усовершенствована ;
- канал транспортировки позитронов из накопителя в установку установлен и готов для ввода в эксплуатацию.

Работы по позитронному аккумулятору и лазерной системе возбуждения будут осуществляться параллельно с работами по антипротонам. Эта программа является уже довольно амбициозным проектом, и вполне вероятно, что сформировать атомы антиводорода посредством перезарядки ридберговского позитрония в этом году не получится, поскольку слишком многие этапы этого сложного процесса, осуществляемого впервые в мире, еще не опробованы. Вследствие этого в первой половине 2016 г., в отсутствие антипротонов, особое внимание будет уделяться работам с позитронами и эффективным формированием ридберговского позитрония, необходимого для формирования атомов антивод

Публикации

1. Aghion S. et al. (AEgIS Collaboration). Positron bunching and electrostatic transport system for the production and emission of dense positronium clouds into vacuum Nucl.Instr.Meth.A. 2015. B362 P. 86.

2. Testera G. et al. (AEgIS Collaboration). The AEGIS experiment // Hyperfine Interactions. 2015. V. 233. P. 13-19.

3. Aghion S. et al. (AEgIS Collaboration). Particle tracking at cryogenic temperatures: the Fast Annihilation Cryogenic Tracking (FACT) detector for the AEgIS antimatter gravity experiment // JINST. 2015. V. 10. P. C02023.

Доклады и сообщения

N.V.Krasnikov. Search for light dark matter and (g-2) muon anomaly // International conference on calculations at the LHC, Dubna 25 July - 3 August 2015.

В настоящее время установка P348 является единственной в мире, предназначенной для прямого обнаружения невидимых распадов новой элементарной частицы – массивного векторного бозона (фотона), который является переносчиком возможного нового взаимодействия между материей нашей Вселенной и темной материей.

Сотрудниками российских институтов – членами коллаборации P348 разработана и предложена концепция эксперимента по поиску легкой темной материи на новой установке на ускорителе SPS с уровнем планируемой чувствительности, который превосходит уровень, достигнутый на сегодняшний день в экспериментах, проводимых и планируемых в США, Японии и Италии. Проект эксперимента был подан на рассмотрение в комитет SPSC CERN и получил рекомендацию по проведению в 2015 г. первых тестовых измерений. Результаты первого тестового сеанса получили высокую оценку членов комитета SPSC на заседании в октябре 2015 г. Комитет SPSC CERN рекомендовал проведение следующих двух сеансов по набору данных в течение 2016 г. и вынес вопрос о дальнейшем рассмотрении статуса эксперимента на заседание комитета SPSC CERN в январе 2016 г.

Публикации

1. Test Run Report of the P348 Collaboration. *A.V. Dermenev, S.V. Donskov, S.N. Gninenko, S.B. Kuleshov, V.A. Matveev, V.V. Myalkovskiy, V.D. Peshekhonov, V.A. Poliakov, A.A. Savenkov, V.O. Tikhomirov, et al.*, CERN-SPSC-2015-057/ SPSC-SR-172, Oct. 2015 .
2. On detection of narrow angle e+e- pairs from dark photon decays. *A.V. Dermenev, S.V. Donskov, S.N. Gninenko, S.B. Kuleshov, V.A. Matveev, V.V. Myalkovskiy, V.D. Peshekhonov, V.A. Poliakov, A.A. Savenkov, V.O. Tikhomirov*, arXiv:1503.05687[physics.ins-det]
3. The K_L invisible decays as a probe of new physics
S.N. Gninenko and N.V. Krasnikov , Phys. Rev. D92 (2015) 034009;
4. Search for invisible decays of π^0 , η , η' , K_S and K_L: A probe of new physics and test using the Bell-Steinberger relation. *S.N. Gninenko*, Phys. Rev. D91 (2015) 015004;
5. Muon g-2 and searches for a new leptophobic sub-GeV dark boson in a missing-energy experiment at CERN. *S.N. Gninenko, N.V. Krasnikov, V.A. Matveev*, Phys. Rev. D91 (2015) 095015

СПИСОК ДОКЛАДОВ

1. *S.N. Gninenko*, P348: Search for new physics in missing energy events , SHIP Simposium, 8th October 2015, CERN.
2. *N. V. Krasnikov*, The muon g-2 and search for new gauge boson in missing-energy experiment, ИФВЭ Семинар, Январь 2015, Протвино

8 Исследование CP-нарушения и поиск новой физики в редких распадах B-мезонов в эксперименте БАК-би на Большом адронном коллайдере.

Руководитель Е.Н. Гущин

Основная цель эксперимента LHCb – исследование CP-нарушения и поиск Новой Физики в редких распадах B-мезонов. В 2013-2014 г.г. на ускорителе LHC проведены работы, в результате которых энергия пучков увеличена до 6.5 ТэВ. Эксперимент LHCb в 2015 г. продолжил обработку набранных данных (всего за 2011-2013 г.г. принято $>3/\text{fb}$ интегральной светимости), получен ряд новых результатов, превосходящих по точности лучшие мировые измерения.

Измерение вероятности распада $B^0 \rightarrow \mu\mu$ [1].

Величины вероятностей распадов $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ и $B^0 \rightarrow \mu\mu$ представляют большой интерес с точки зрения эксперимента, так как являются особенно чувствительными к теориям расширения Стандартной модели (СМ). После обработки полного набора данных, полученных в 2011 и в 2012 г.г., эксперименты LHCb и CMS выполнили совместный анализ и опубликовали результат по первому в мире наблюдению распада $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ и по первому в мире экспериментальному измерению вероятности распада $B^0 \rightarrow \mu\mu$ со статистической достоверностью 6σ и 3σ соответственно. **Полученные результаты являются самыми точными в мире, статистически не противоречат предсказаниям Стандартной модели (СМ) и позволяют ограничить возможные параметры расширения СМ.**

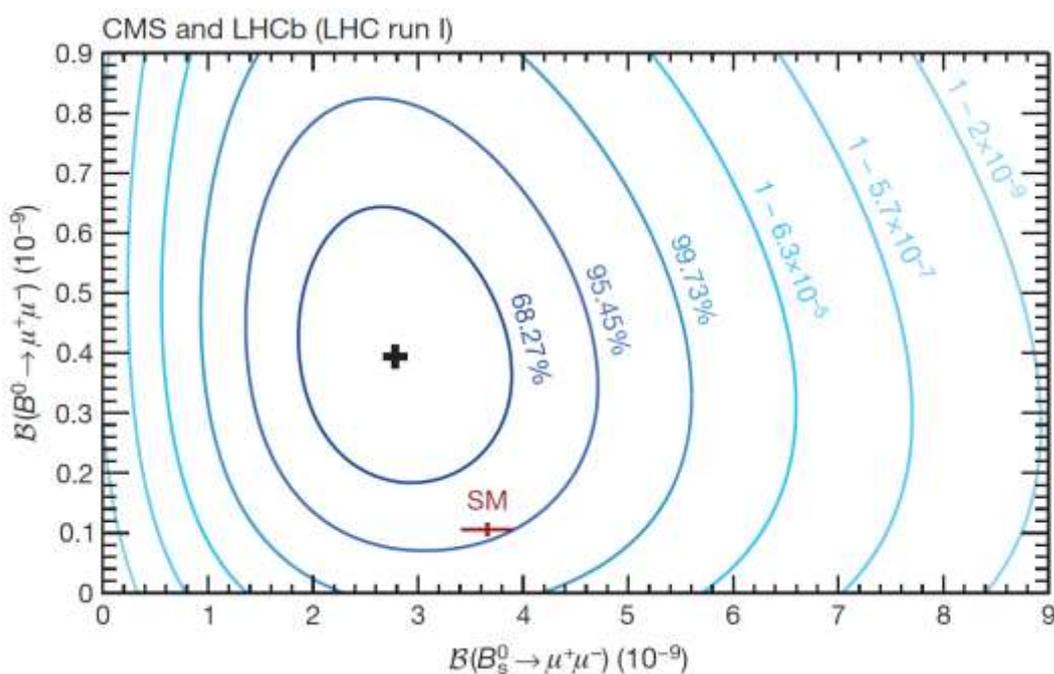


Рисунок 1. Показаны контуры функции правдоподобия величин вероятностей распадов $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu\mu$ в сравнении с предсказаниями Стандартной модели: черный крест обозначает максимально правдоподобные значения, красный крест (SM) обозначает предсказания СМ и их неопределенность.

Измерение угла V_{ub} матрицы смешивания СКМ [2].

В LHCb закончен анализ данных 2011-2012 г.г. по измерению отношения вероятностей эксклюзивных распадов $B_b^0 \rightarrow p\mu^+\nu$ и $B_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+\mu^+\nu$, что позволило измерить отношение углов $|V_{ub}|/|V_{cb}|$. Эти моды распадов не были доступны на B-фабриках, в то время как на БАК предоставляется возможность использовать большое количество сигнальных событий, до 20% от производимых b -адронов. Кроме этого, измерение относительной вероятности распадов позволяет избежать многих экспериментальных неопределенностей. Используя мировое среднее для величины $|V_{cb}|$, было получено прецизионное значение для угла $|V_{ub}| = (3.27 \pm 0.15 \pm 0.16 \pm 0.06) \times 10^{-3}$, где первая неопределенность связана с экспериментальной ошибкой, вторая - с теоретической неточностью, а третья – с ошибкой нормализации к углу $|V_{cb}|$. Полученное значение $|V_{ub}|$ хорошо согласуется с условиям унитарности матрицы смешивания. **Полученный результат является наиболее точным единичным измерением в мире и дает важный вклад в глобальный фит параметров СКМ матрицы.**

Первое наблюдение очарованного пентакварка [3].

В рамках кварковой модели, созданной более 50-ти лет назад, предполагается существование частиц, в кварковый состав которых к минимальным мезонным и барионным конфигурациям добавлены кварк-антикварковые пары. В 2015 г. LHCb коллаборация опубликовала результаты анализа распадов $B_b^0 \rightarrow J/\psi K p$, в которых в спектре инвариантной массы $(J/\psi, p)$ пар были обнаружены резонансные структуры $P_c(4380)^+$ и $P_c(4450)^+$, с уровнем значимости 9 и 12 стандартных отклонений. Их состав может быть объяснен только минимальным набором из пяти кварков $c\bar{c}uud$, это так называемый очарованный пентакварк. **Таким образом предсказанные более 50 лет назад частицы наконец находят свое подтверждение. Этот результат уже нашел признание и вошел в «топ-10» наиболее интересных по физике за 2015 г., по версии журнала «[Physics World](#)».**

1) By CMS and LHCb Collaborations (Vardan Khachatryan et al.) “Observation of the rare $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ decay from the combined analysis of CMS and LHCb data”, *Nature* **522** (2015) 68-72.

2) By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.) “Determination of the quark coupling strength $|V_{ub}|$ using baryonic decays”, *Nature Phys.* **11** (2015) 743-747.

3) By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). “Observation of $J/\psi p$ Resonances Consistent with Pentaquark States in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^+ p$ Decays”, *Phys.Rev.Lett.* **115** (2015) 072001.

9 Исследование энергетической зависимости множественности частиц и плотности их распределения по псевдобыстроте от энергии в pp, p-Pb и в Pb+Pb столкновениях на установке ALICE

Руководитель А.Б.Курепин

Создан стартовый и триггерный детектор T0, который является одним из важнейших компонентов триггерной системы эксперимента АЛИСА (ЦТП). Триггерные сигналы детектора T0 используются для эффективного отбора протон-протонных событий по положению вершины на L0-уровне, а также в качестве minimum-bias триггера. Вершинный триггерный сигнал T0 (сигнал генерируется, если вершина столкновения находится в заданном интервале по оси Z) оказывается малочувствительным к столкновениям пучка с газом, поэтому используется для определения светимости в протон-протонных столкновениях, также его можно использовать для отбора событий по центральности в ядро-ядерных столкновениях. Кроме того, данные детектора T0 используются для точного вычисления времени столкновения, которое используется время-пролетной системой (TOF).

Разработаны и интегрированы в быструю электронику детектора T0 дополнительные модули QTC с временем преобразованием менее 25 нс. Завершено производство нового модуля управления лазером и разветвителя сигналов синхронизации в стандарте VME (Laser Control and Clock Distribution VME Module (LCC), который позволяет также позволяет работать на частоте 40 МГц.

Проведена модернизация системы управления и контроля детекторами детектора T0 с целью включения в нее возможности управления, контроля и конфигурирования модуля LCC. В соответствии с планом эксперимента ALICE по модернизации триггерной системы, обеспечивающей дополнительный новый триггерный уровень LM, и необходимости работать при выводе пучков в 2015 году с расстоянием 50 нс и 25 нс между сгустками протонов на БАК были выполнены работы по перемещению всей электроники в зону размещения ЦТП. Совместно с оптимизацией электроники детектора T0 это позволило сократить время прихода триггерных сигналов на ЦТП и формировать новый триггерный сигнал LM для TRD детектора через 390 нс после столкновения протонов. Новое положение электроники потребовало создание защиты от влияния на работу электроники и лазерной системы калибровки детектора T0 остаточного магнитного поля соленоида и дипольного магнита установки ALICE

Для определения светимости, которая необходима для измерения абсолютных сечений произведен анализ данных сканирования по методу Ван дер Меера, для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 8$ TeV и 13 TeV с использованием передних детекторов T0, V0 и AD. В качестве основного сигнала для оценки светимости на установке ALICE использовался триггерный сигнал детектора T0 OTVX (сигнал генерируется, если вершина столкновения находится в заданном интервале). Выполнен предварительный анализ данных для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV, который показал, что триггерные сечения детекторов T0 и V0 согласуются с данными симуляции и равняются $29,9 \pm 0,01$ мб и $57,4 \pm 0,025$ мб.

В 2015 году на установке АЛИСА продолжен набор физических данных для р-р столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV. За отчетный период выполнена калибровка и реконструкция данных детектора T0 для всех периодов LHC15. Время-пролетная система с использованием стартового сигнала T0 детектора позволяет идентифицировать пионы, протоны при значениях поперечного импульса от 0.5 до 2,5 GeV/c, а для каонов и протонов до 3 - 4 GeV/c (рис.1). Временное разрешение детектора T0 составляет 45 пикосек. Для постоянного контроля параметров детектора разработана система автоматической публикации в интернете трендов данных детектора T0 как функции номеров измерений (по адресу <http://aliquat0.web.cern.ch/aliquat0/data/2015/>).

Для изучения множественности рождения заряженных частиц, вычисления плоскости реакции и для коррекции зависимости временных параметров детектора от множественности зарегистрированных заряженных частиц требуется стабильное амплитудное разрешение. Для этих целей были разработаны дополнительные модули QTS, осуществляющие преобразование заряда во время с временем преобразования 25 нс. Были изготовлены и интегрированы в быструю электронику детектора T0 два типа модулей QTS. Первый тип модуля предназначен для измерения заряда индивидуального канала

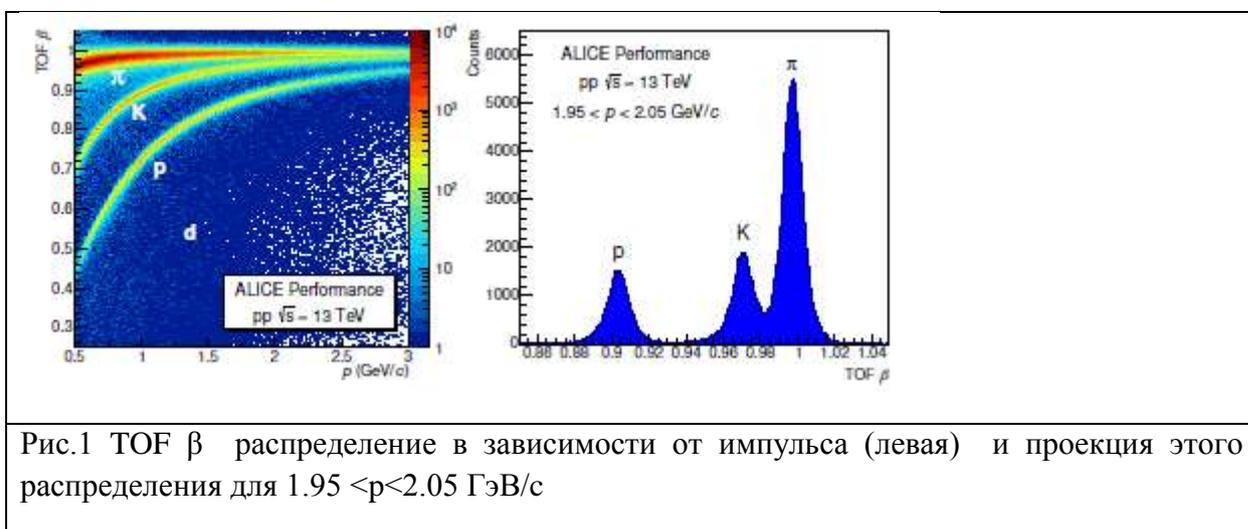


Рис.1 TOF β распределение в зависимости от импульса (левая) и проекция этого распределения для $1.95 < p < 2.05$ ГэВ/с

детектора T0, второй тип – для измерения суммарной амплитуды сигналов с каждой из сторон детектора и предназначен для контроля выработки триггерных сигналов по множественности. Разработан программный модуль, позволяющий по физическим данным проводить время-амплитудную коррекцию по вычислению зависимости времени срабатывания модуля CFD от амплитуды исходного сигнала. Данная коррекция может улучшить временное разрешение детектора T0 в режиме “offline” на десятки пикосекунд..

Публикации

1. Measurement of electrons from semileptonic heavy-flavor hadron decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV, ALICE collaboration, (B.Abelev ..., F.Guber, T.Karavicheva, O.Karavichev, A.Kurepin, A.Maevskaya, A.Reshetin, I.Pshenichnov et al) Phys. Rev. D 91 (2015) 012001
2. Measurement of pion, kaon and proton production in proton–proton collisions at $s\sqrt{=}7$ TeV, ALICE collaboration 2015. 33 pp. Published in Eur.Phys.J. C75 (2015) 5, 226
3. Quarkonium Production and Proposal of the New Experiments on Fixed Target at the LHC, (Review Article) A. B. Kurepin and N. S. Topilskaya, 13 pp. Published in Advances in High Energy Physics, Volume 2015, Article ID 760840

4. Inclusive photon production at forward rapidities in proton-proton collisions at $s\sqrt{= 0.9, 2.76, \text{ and } 7 \text{ TeV}$ ALICE collaboration, (B.Abelev ...,F.Guber, T.Karavicheva, O.Karavichev,A.Kurepin, A,Maevskaya A.Reshetin, I.Pshenichnov... et al) Eur.Phys.J. C75 (2015)4, 146
5. Performance of the Fast Interaction Trigger for the ALICE Upgrade, Poster, Quark Matter, 2015,Kobe, Japan

10 Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН

Руководитель Ф.Ф. Губер

Одной из основных задач эксперимента NA61(SHINE) в ЦЕРНе является поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи и детальное исследование начала деконфаймента. Для поиска критической точки необходимы измерения наблюдаемых, чувствительных к исследуемым эффектам. Такими наблюдаемыми являются множественность рождения и спектральные характеристики вторичных адронов, включая странные барионы/антибарионы, и пособытийные флуктуации некоторых физических величин, таких как множественность, заряды, поперечные импульсы, отношения выхода странных и нестранных мезонов. Резкое увеличение величины флуктуаций может являться отличительной чертой физических явлений вблизи критических областей. Программа исследований NA61 включает проведение измерений выходов заряженных частиц в центральных столкновениях ядер ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$, $\text{Ar} + \text{Sc}$ и $\text{Xe} + \text{La}$ при энергиях 13, 20, 30, 40, 80, 158 ГэВ на нуклон и рассчитана до 2018 г. (Рис.1, слева).

В 2015г. на установке NA61 состоялся целый ряд физических и тестовых сеансов. В феврале-апреле 2015 г. был проведен сеанс по набору данных в реакции $\text{Ar} + \text{Sc}$ при энергия ускоренных в SPS ядр аргона 13А, 19А, 30А, 40А, 75А и 150А ГэВ/с. В октябре 2015г. был завершен набор данных для $p + \text{Pb}$ взаимодействий при 158 ГэВ/с. Первые данные для этой реакции были получены еще в 2012г. В октябре 2015г. был проведен тестовый сеанс по калибровке переднего адронного калориметра. В ноябре 2015г. состоялся тестовый сеанс на выведенном пучке ядер свинца с энергией 30 АГэВ, на котором проводилась отладка детекторных систем установки. Группа ИЯИ РАН принимала участие во всех этих сеансах. На пучке протонов была проведена калибровка переднего адронного калориметра и проведены тесты разных типов электроники для считывания сигналов с одного из модулей калориметра, в котором существующий тип фотодиодов был заменен на МРРС. Эти тесты крайне важны для планирования дальнейшей модернизации калориметра. Кроме этого, перед основным калориметром был установлен и протестирован дополнительный короткий

модуль, который был в 2015г. разработан и изготовлен в ИЯИ РАН при финансовой поддержке новой российской группы из МИФИ в коллаборации NA61 (Рис.1, справа).



Рисунок 1. Слева - диаграмма набора данных для ионной программы эксперимента NA61/SHINE. Зелеными квадратами показаны уже законченные измерения, красными - программа измерений на период 2016-2018 г.г. Серыми квадратами показаны планируемые измерения Pb + Pb, но которые уже подано предложение, но еще пока не утверждено программным комитетом ЦЕРНа. Справ - фото переднего адронного калориметра с расположенным передним дополнительным коротким модулем.

В сеансе на пучке ядер свинца, группа ИЯИ РАН исследовала энергетическое разрешение и линейность отклика калориметра с дополнительным модулем. Были также проведены измерения, необходимые для определения угла плоскости реакции в столкновениях ядер свинца с помощью переднего адронного калориметра, а также для исследования азимутальных потоков всех заряженных частиц в этой реакции при энергии 30 АГэВ при выключенном магнитном поле в вершинном детекторе (из-за поломки сверхпроводящего магнита).

В течение года группа ИЯИ занималась также калибровкой калориметра, изучением корреляции измеренной в калориметре энергии с множественностью заряженных частиц в ТРС для полученных данных Ar+Sc. Проведено моделирование точности определения угла плоскости реакции для Pb+Pb при энергии 30АГэВ.

Список статей в научных журналах, опубликованных в 2015г.

- 1) Production of Λ hyperons in inelastic p+p interactions at 158 GeV/c
 NA61 Collaboration, N. Abgrall, ..., O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky, T.Drozhdzova, G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al.)
 CERN-PH-EP-2015-274
 e-Print: arXiv:1510.03720 [hep-ex] , отправлено в Eur. Phys. J. C

- 2) Measurements of π^\pm , K^\pm , K^0_S , Λ and proton production in proton-carbon interactions at 31 GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS

NA61 Collaboration, N. Abgrall, ,...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber,
A.Ivashkin,

A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky,
T.Drozhhzova,G.A.Feofilov,

S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al.)

CERN-PH-EP-2015-278

e-Print: arXiv:1510.02703 [hep-ex] , отправлено в Eur. Phys. J. C

3) Multiplicity and transverse momentum fluctuations in inelastic proton-proton
interactions at the CERN Super Proton Synchrotron

NA61 Collaboration, N. Abgrall, ,...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber,
A.Ivashkin,

A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky,
T.Drozhhzova,G.A.Feofilov,

S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al.)

CERN-PH-EP-2015-273, отправлено в Eur. Phys. J. C

4) Report from the NA61/SHINE experiment

NA61 Collaboration, N. Abgrall, ,...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber,
A.Ivashkin,

A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky,
T.Drozhhzova,G.A.Feofilov,

S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al.)

CERN-PH-EP-2015-273; CERN-SPSC-2015-036 ; SPSC-SR-171

5) Addendum to the the NA61/SHINE Proposal SPSC-P-330

Beam momentum scan with Pb+Pb collisions

NA61 Collaboration, N. Abgrall, ,...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber,
A.Ivashkin,

A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky,
T.Drozhhzova,G.A.Feofilov,

S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al.)

CERN-SPSC-2015-038 ; SPSC-P-330-ADD-8

11. Изучение взаимодействий тау-нейтрино и разработка детекторов для поиска новых гипотетических частиц – (эксперимент OPERA).

Руководитель О.Г.Ряжская

На уровне 5.1σ обнаружены осцилляции нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

В сентябре 2015 года коллаборацией OPERA объявлено об открытии осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Работа выполнена с использованием гибридного детектора OPERA, расположенного в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия), использующего пучок мюонных нейтрино из ЦЕРНа и состоящего из электронных сенсоров, мюонных спектрометров и ядерных эмульсий, прослоенных пластинами свинца. Пространственное разрешение эмульсий (~ 1 мкм) позволило идентифицировать часть взаимодействий ν_τ в канале заряженного слабого тока. Поиск этих событий основан на наблюдении признаков распада короткоживущей частицы. Основным источником фона являются события от ν_μ с рождением очарованных адронов, которые также содержат трек короткоживущей частицы и, тем самым, похожи по топологии распада на взаимодействия ν_τ . Экспозиция эксперимента OPERA проводилась в 2008-2012 гг. Наблюдение 4-х кандидатов на взаимодействие ν_τ в эмульсионном детекторе было показано ранее на части экспериментального материала. В работе [1] приводятся результаты анализа 5408 событий (что на 15% больше выборки, использованной при наблюдении 4-х кандидатов). Разработанное в ФИАН программное обеспечение, позволившее увеличить скорость сканирования с 20 до 80 см²/час оказалось настолько удачным, что уже используется и в европейских лабораториях, в частности, в Неаполе.

Участниками коллаборации OPERA была проведена и новая оценка фона. В результате, статистическая значимость, соответствующая гипотезе только фона, составила 5.1σ . Характеристики всех 5 событий-кандидатов не противоречат ожидаемым для взаимодействий ν_τ . Тем самым, в эксперименте OPERA совершено открытие осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. **Этот главный результат эксперимента OPERA включен в физическое обоснование Нобелевской премии по физике 2015 года.**

Публикации:

1. Discovery of tau neutrino appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment. Phys.Rev.Lett. v.115, 121802 (1-7) 2015, (ArXiv e-prints. n. arXiv1507014170, pp. 1-7, 2015) (The OPERA Collaboration) DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.121802>
2. Limits on muon-neutrino to tau-neutrino oscillations induced by a sterile neutrino state obtained by OPERA at the CNGS beam. Journal of High Energy Physics. vol. 2015, n. 6, 2015. (ArXiv ePrint n.arXiv:: 1503.01876, pp. 1-8, 2015) (The OPERA Collaboration)

3. CERN Courier, v.55, Number 6, 2015, p.6
4. CERN Courier, v.55, Number 9, 2015, p.25-26
5. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/press.html;
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/advanced-physicsprize2015.pdf

12 Разработка и создание измерителей формы сгустков для линейного ускорителя Linac-4 ЦЕРН и исследование продольного движения в ускорителе.

Руководитель А.В.Фещенко

Целью данного проекта является разработка и создание измерителей продольного распределения заряда в сгустках для сооружаемого в ЦЕРН в рамках программы модернизации Большого адронного коллайдера линейного ускорителя Linac-4 и для канала транспортировки из ускорителя в бустер.

Данный проект является продолжением работ начатых в 2009 году. Ранее в период 2009-2013 годов был разработан, изготовлен, поставлен и испытан на пучке первый детектор данного типа непосредственно для ускорителя (Измеритель №1). После его успешных испытаний в 2013 году было принято решение о создании второго детектора с увеличенной апертурой для канала транспортировки из ускорителя Linac-4 в бустер (Измеритель №2). В 2014 году была завершена его разработка и начато изготовление.

В 2015 году было завершено изготовление измерителя №2 и проведены его лабораторные испытания в ИЯИ РАН. Летом 2015 года измеритель был отправлен в ЦЕРН. Осенью 2015 года состоялся визит специалистов ИЯИ РАН в ЦЕРН, во время которого была проведена сборка измерителя и его лабораторные испытания (рис. 1). Также была смонтирована электроника измерителя в клистронной галерее ускорителя.

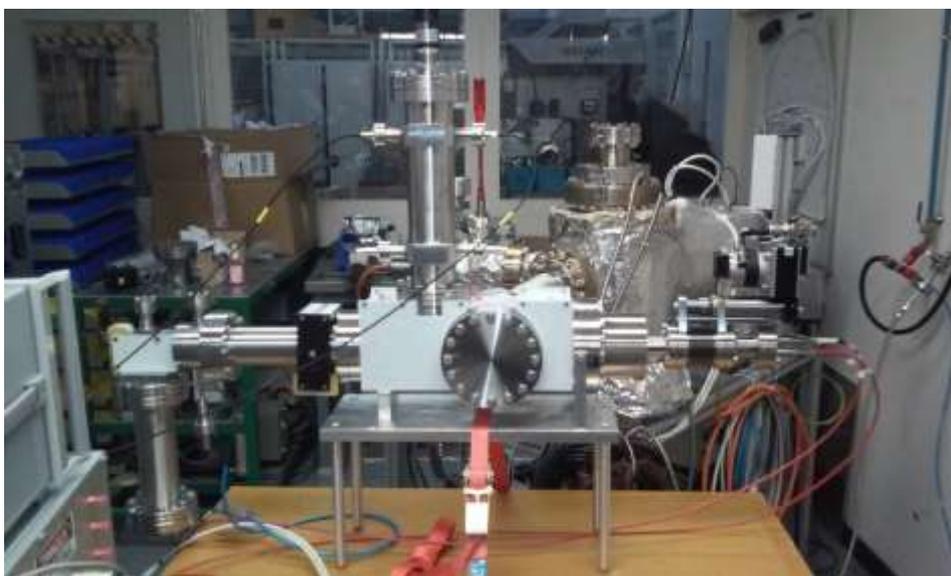


Рис. 1: Лабораторные испытания измерителя на стенде.

Выполнен монтаж электроники, а также проверка и подключение кабелей к измерителю №1, который в настоящее время установлен на выходе третьего ускоряющего

резонатора с трубками дрейфа при энергии 50 МэВ. Выполнена дистанционная проверка измерителя №1 по термоэлектронам.

В декабре 2015 года после получения энергии 50 МэВ проведены измерения продольных характеристик пучка с помощью измерителя №1. На рис. 2 показано окно программы управления измерителем после завершения измерений. В нижней части окна показано измеренное продольное распределение заряда в сгустке. Фазовое разрешение при измерениях составляет величину менее 1° на частоте 352,2 МГц, что эквивалентно временному разрешению менее 8 пикосекунд. Видно, что фазовая протяженность сгустка ускоренного пучка составляет примерно 6° на полувысоте.

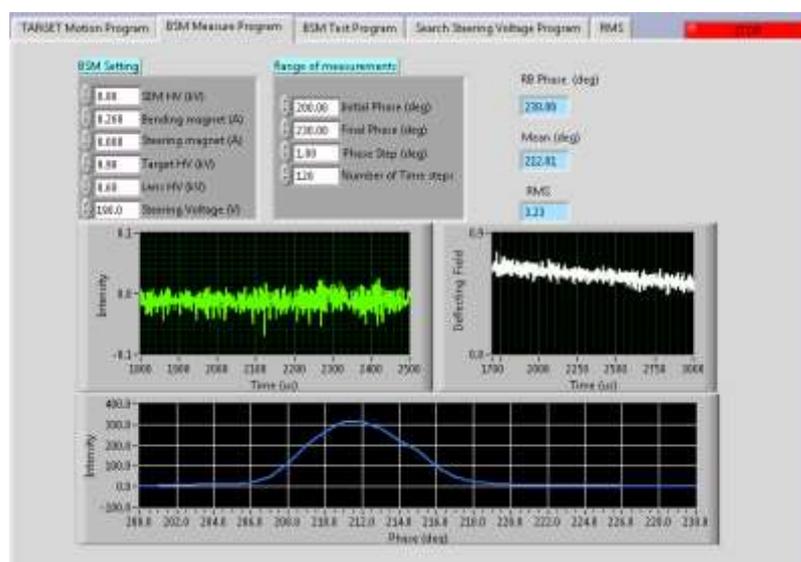


Рис. 2 Вид окна программы управления измерителем после завершения измерения.

На рисунке 3 приведена расчетная зависимость среднеквадратического продольного размера сгустков от фазы поля в третьем ускоряющем резонаторе с трубками дрейфа, найденная методом численного моделирования (зеленые точки), а также зависимости, найденные путем обработки результатов измерений формы сгустков. Следует отметить идеальное согласие результатов моделирования и результатов эксперимента при обработке пакетом Matlab.

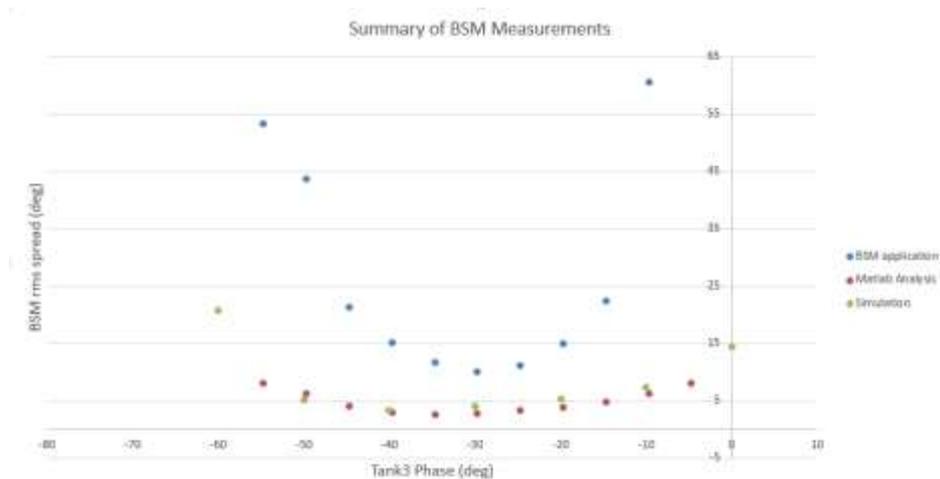


Рис. 3 Изменение среднеквадратического продольного размера сгустков при регулировании фазы поля в третьем ускоряющем резонаторе с трубками дрейфа.

Таким образом, в результате выполнения проекта завершено изготовление второго измерителя, проведены его лабораторные испытания в ИЯИ РАН, измеритель поставлен в ЦЕРН. Проведены сборка измерителя и его лабораторные испытания, а также собрана и смонтирована электроника измерителя в клистронной галерее ускорителя Linac-4. Измеритель подготовлен к монтажу в канале транспортировки из ускорителя в бустер. Восстановлена работоспособность измерителя №1 и выполнена его дистанционная проверка по термоэлектронам после его установки *на участке после третьего ускоряющего резонатора с трубками дрейфа при энергии 50 МэВ*. Проведены *первые измерения характеристик пучка*.

13 Байкальский нейтринный эксперимент

Руководитель Г.В.Домогацкий

Основным результатом работ за отчетный период является монтаж и запуск на оз.Байкал в режиме постоянного набора данных кластера из восьми гирлянд оптических модулей (по 24 ОМ на каждой), представляющего собой первую версию базового структурного элемента создаваемого глубоководного нейтринного телескопа NT1000 (Baikal-GVD) кубокилометрового масштаба. При работе в автономном режиме эффективный объем кластера составляет 0.04 км^3 для событий от нейтрино с энергией порядка 100 ТэВ, что позволяет рассматривать его как одного из трех крупнейших в мире действующих нейтринных телескопов в области высоких и сверхвысоких энергий и позволило начать на нем поиск событий от астрофизических нейтрино, зарегистрированных впервые в эксперименте на детекторе IceCube (ИЯИ РАН, ОИЯИ).

В 2015 году в период зимней экспедиции на оз. Байкал группой российских институтов (головная организация - ИЯИ РАН) в сотрудничестве с международным центром ОИЯИ (Дубна) выполнены работы по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной аппаратуры и подводных линий кабельной связи Байкальского нейтринного телескопа. Развернут и введен в эксплуатацию в режиме долговременного набора данных первый демонстрационный кластер нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD на оз. Байкал. Демонстрационный кластер, создание которого осуществлялось в течение 2013–2015 г.г., является мультимегатонным глубоководным детектором нейтрино, способным вести исследование потока нейтрино астрофизической природы обнаруженного в экспериментах на нейтринном телескопе IceCube. Демонстрационный кластер содержит 192 фотодетектора размещенных на 8 вертикальных гирляндах и включает в себя образцы всех элементов и функциональных систем телескопа Baikal-GVD. Оптические модули (ОМ) включают в себя фотоэлектронные умножители Hamamatsu R7081HQ с повышенной квантовой чувствительностью и сопутствующую электронику, а также по два калибровочных светодиода. Каждая из гирлянд содержит 24 ОМ, расположенных на расстоянии 15 м друг от друга и формирующих две секции по 12 ОМ в каждой. Системы сбора, обработки и передачи данных измерительных каналов расположены в электронных блоках каждой секции и позволяют регистрировать временную форму сигнала. Демонстрационный 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 световой вспышкой от калибровочного светодиодного источника излучения, расположенного на одной из 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 2015 года осуществлялась эксплуатация демонстрационного кластера в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и выделен банк событий от атмосферных мюонов, проведено уточнение относительных временных сдвигов измерительных каналов из анализа событий от атмосферных мюонов. Исследованы вариации уровня собственного свечения водной среды и временное поведение параметров оптических модулей и других функциональных систем установки в течение 2015 года. Выполнен мониторинг интенсивности водных течений на глубине постановки регистрирующей аппаратуры по результатам обработки данных акустической системы позиционирования установки и акустических детекторов инструментальной гирлянды.

В течение 2015 года были продолжены работы по разработке и усовершенствованию программного обеспечения моделирования отклика и анализа данных демонстрационного кластера и нейтринного телескопа Baikal-GVD в задачах исследования природных потоков нейтрино, поиска нейтринного сигнала от аннигиляции темной материи в астрофизических объектах, поиска гипотетических частиц. Продолжена разработка и тестирование комплекса вычислительных и служебных программ BARS включающего в себя модули чтения и предварительного анализа и отбора экспериментальных данных, обработки калибровочных данных, модули выделения и восстановления событий от разных источников, модули МК-моделирования отклика установки.

В течение 2015 года выполнена комплектация сборка и испытание в лабораторных условиях оптических модулей и измерительных систем восьми новых секций телескопа Baikal-GVD содержащих в общей сложности 96 ОМ. Новые секции будут

смонтированы на 8 гирляндах демонстрационного кластера в 2016 г., что позволит в полтора раза увеличить детектирующий объем установки.

В 2015 году завершен анализ экспериментальных данных нейтринного телескопа NT200 в задаче поиска нейтринного сигнала от аннигиляции частиц темной материи в центре Галактики. Получены новые ограничения на величину дополнительных потоков мюонов и нейтрино в направлении из Галактического центра.

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.

Работу над проектом вела группа российских институтов –Институт ядерных исследований РАН (головная организация), НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, Нижегородский государственный политехнический университет, НИИ ядерной физики Московского государственного университета, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет с участием специалистов международного центра ОИЯИ (г.Дубна) и EvoLogics (Германия).

1. A.D. Avrorin et al., “Status and recent results of the BAIKAL-GVD project”,
Physics
of Particles and Nuclei, V.46, pp.211-221 (2015).

2. Ж.-А.М.Джилкибаев, Г.В.Домогацкий, О.В.Суворова, “Черенковские детекторы в нейтринной астрофизике высоких энергий”, УФН, Т.185, с.с.531-539 (2015).

3. A.D. Avrorin et al., “Sensitivity of the Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of the galactic dark matter halo” JETP Lett., V.101, pp.298-294 (2015).

4. G.V. Domogatsky, “A new neutrino telescope for Lake Baikal”, CERN Courier, v.55, #6 p.23-24 (2015)

14 Поиск всплесков гравитационного излучения на подземном детекторе ОГРАН

Руководители Безруков Л.Б., Руденко В.Н.

Результаты 2015 г

Осуществлен монтаж нового гравитационного детектора ОГРАН на пикете ПК-14 - месте постоянной подземной дислокации данной установки. Проведены тесты функционального соответствия конструктивных узлов и блоков установки проектным характеристикам после её передислокации с московской базы. Зафиксированы эффекты деградации ряда параметров как вакуумно – механической откачной системы, так и

электронно- оптических компонент детектора, подлежащие устранению. Тем не менее в заданном состоянии установка была выведена на рабочий режим с измерением её основных характеристик. Измерена спектральная плотность шума детектора и проведен тест силовой калибровки, снятый с сигнала, имитирующего гравитационно-волновое воздействие. Данные демонстрируют достижение чувствительности приближающейся к проектной, которая, однако, может быть улучшена при устранении дефектов передислокации. Среди них а) недостаточность вакуума в камере опто - акустического детектора (10^{-3} вместо 10^{-6} торр), б) недостаточность резкости оптических ФП резонаторов как детекторного, так и опорного(величина фазового сдвига 10^3 на порядок ниже запроектированной – загрязнение зеркал при передислокации), в) недостаточность мощности питающего излучения (0.1 вт вместо 0.5 вт в каждом резонаторов) – разюстировка лазерного комплекса. Работа над устранением этих погрешностей – основная цель первого квартала в 2016 г.

Вскрылась серьезная экспериментальная проблема обеспечения режима непрерывного мониторинга ГВ фона на детекторе ОГРАН – необходимость активной стабилизации температуры акустического детектора на уровне 0.01 град. Пути решения изучаются, но потребуются материальные вложения также как и временные затраты.

Публикации

1. С. Н. Багаев, Л. Б. Безруков, Н. Л. Квашнин, А. М. Мотылев, С. И. Орешкин, С. М. Попов, В. Н. Руденко, А. А. Самойленко, М. Н. Скворцов, И. С. Юдин.
Оптоакустическая гравитационная антенна Приборы и техника эксперимента № 2, с. 95–105 2015,
2. S. N. Bagaev, L. B. Bezrukov, N. L. Kvashnin, V. A. Krysanov, A. M. Motylev, S. I. Oreshkin, S. M. Popov, V. N. Rudenko, A. A. Samoilenka, M. N. Skvortsov, and I. S. Yudin.
An Optoacoustical Gravitational Antenna Instruments and Experimental Techniques, Vol. 58, No. 2, pp. 257–267, 2015 © Pleiades Publishing, Ltd., ISSN 0020-4412
3. V. A. Krysanov, A. M. Motylev, S. I. Oreshkin, V. N. Rudenko
A Helium Cryostat for Investigating the Properties of Massive Solid Resonators with Deep Cooling. Measurement Techniques: Volume 57, Issue 12 (2015), Page 1416-1422
4. Rudenko V.N., Popov S.B.

15 Неускорительная физика частиц: двойной безнейтринный бета распад ядер, осцилляции реакторных нейтрино.

Руководители Л.Б.Безруков, В.В.Синёв

Эксперимент GERDA . Поиск безнейтринного двойного бета-распада ядер является в настоящее время одной из центральных задач экспериментальной физики низких энергий.

Международный эксперимент GERDA, расположенный в подземной лаборатории Национальной лаборатории Гран-Сассо Национального института ядерной физики Италии (LNGS INFN), продолжался в течение 2015 года и был одобрен к продолжению в 2016 году учёным советом LNGS INFN. Российские учёные из ИЯИ РАН, ИТЭФ и Курчатовского Института участвовали в работах Международного эксперимента GERDA и имеют согласованные планы участия на 2016 год. Основными результатами 2015 года является окончание разработки и монтажа второй фазы эксперимента и подготовка эксперимента к физическому запуску в 2016 году. Была продолжена обработка экспериментального материала, полученного в первой фазе эксперимента, результаты опубликованы в печати.

Результаты 2015 года:

1. В течение 2015 года закончена вся необходимая подготовительная работа для начала второй фазы эксперимента. Основная цель второй фазы эксперимента снижение уровня фона на порядок по сравнению с результатом первой фазы до уровня 10^{-3} /кэВ.кг.год
2. На основе экспериментальных данных, полученных в первой фазе эксперимента GERDA выполнен поиск двойного бета распада ($2\nu\beta\beta$) изотопа ^{76}Ge на три возбужденных уровня. Использовались данные по 14-и германиевым детекторам обогащенным по изотопу ^{76}Ge , погруженным в жидкий азот. Анализ был основан на поиске совпадений сигналов двух детекторов, в одном из которых регистрировался гамма квант от распада возбужденного состояния ядра ^{76}Se и двух электронов от двойного бета распада в другом. Из отсутствия сигнала получены верхние пределы для искомых распадов га уровне $T(1/2) > (1,6-2,3) \cdot 10^{23}$ лет. Полученные пределы превосходят на два

порядка значения, полученные в предыдущих аналогичных экспериментах. По полученным результатам опубликована статья.

3. На основе анализа данных первой фазы эксперимента GERDA с полной экспозицией 17,9 кг.год и улучшенным анализом источников фона получено новое значение периода двух нейтринного бета распада Ge-76: $T^{2\nu}_{1/2} = (1.926 \pm 0.095) \times 10^{21}$ лет.

4. На основе экспериментальных данных, полученных в первой фазе эксперимента GERDA выполнен поиск $2\nu 2\beta$ распада с участием майорона для спектрального индекса $n=1, 2, 3$ и 7. Из отсутствия сигнала получены верхние пределы для искомым распадов на уровне в 6 раз превосходящие ранее полученные ограничения.

5. Разработана и создана система антисовпадений в установке ГЕРДА по поиску двойного бета распада германия-76. Система состоит из набора 810 сцинтилляционных волокон, образующих цилиндр высотой 2,2 м и диаметром 47 см вокруг основных германиевых детекторов. Сцинтилляционные волокна просматриваются 90 кремниевыми фотоумножителями. Система регистрирует сигнал от сцинтилляционных вспышек жидкого аргона. Проведены два сеанса предварительных измерений эффективности системы. Получено, что в эксперименте по регистрации двойного двух нейтринного бета распада германия-76 достигнуто снижение фона в 45 раз.

6. Разработана маломасштабная технология очистки отходов обогащенного германия, образовавшихся во время производства детекторов. Создана в России полномасштабная модель установки очистки (установка показана на рис.4). Начаты отладочные работы

Список публикаций 2015 года:

1. Limit on Neutrinoless Double Beta Decay of ^{76}Ge by GERDA
[M. Agostini \(Munich, Tech. U., Universe\) et al.](#), 2015. 10 pp.
Published in Phys.Procedia 61 (2015) 828-837
Conference: [C^{2ν}13-09-08.3 Proceedings](#)
2. $2\nu\beta\beta$ decay of ^{76}Ge into excited states with GERDA Phase I
GERDA Collaboration ([M. Agostini \(Munich, Tech. U.\) et al.](#)). Jun 9, 2015. 18 pp. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 42 (2015) 115201. e-Print: [arXiv:1506.03120](#) [hep-ex]
3. Improvement of the energy resolution via an optimized digital signal processing in GERDA Phase I. GERDA Collaboration ([M. Agostini \(Munich, Tech. U., Universe\) et al.](#)).

Feb 15, 2015. 12 pp.

Published in Eur.Phys.J. C75 (2015) 6, 255

e-Print: [arXiv:1502.04392](https://arxiv.org/abs/1502.04392) [physics.ins-det]

4. Results on $\beta\beta$ decay with emission of two neutrinos or Majorons in ^{76}Ge from GERDA Phase I . [M. Agostini \(Munich, Tech. U.\) et al.](#). Jan 10, 2015. 13 pp.

Published in Eur.Phys.J. C75 (2015) 9, 416

e-Print: [arXiv:1501.02345](https://arxiv.org/abs/1501.02345) [nucl-ex]

5.. Production, characterization and operation of Ge enriched BEGe detectors in GERDA

[GERDA Collaboration \(M. Agostini \(Munich, Tech. U.\) & Munich, Tech. U., Universe\) et al.](#)). Oct 3, 2014. 23 pp.

Published in Eur.Phys.J. C75 (2015) 2, 39

e-Print: [arXiv:1410.0853](https://arxiv.org/abs/1410.0853) [physics.ins-det]

Эксперимент Double Chooz:

С января 2015 г. Double Chooz приступил к измерениям двумя детекторами - ближним и дальним. Ближний детектор официально принят в эксплуатацию. Измерения на нем осуществляются аналогично дальнему детектору. В январе-феврале была проведена сборка железной защиты на крышке детектора. В марте завершен монтаж внешнего ВЕТО. Также в марте закончена сборка бокса для ввода калибровочных источников, которая располагается на специальной платформе поверх внешнего ВЕТО.

Весь год принимали участие в удаленном мониторинге обоих детекторов. Ведется набор статистики. На коллаборационном митинге в Страсбурге нами предложен метод улучшения точности определения направления прихода нейтрино по анализу направленности позитронов в реакции обратного бета-распада.

Во втором квартале начата работа в эксперименте JUNO совместно с китайскими коллегами. Проведены переговоры по участию ИЯИ в эксперименте ИЯИ включен в официальную коллаборацию.

Публикации 2015 году:

1. Fengpeng An, Guangpeng An, Qi An, et al. (JUNO Collaboration), Neutrino physics with JUNO, arXiv:1507. 05613 [physics.ins-det].

2. Zelimir Djurcic, Vic Guarino, Anatael Cabrera et al. (JUNO Collaboration), JUNO Conceptual Design Report, arXiv:1508. 07166 [physics.ins-det].

3. Y.Abe, T. Abrahao, H. Almazan, et al. (DC Collaboration), Measurement of θ_{13} in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection techniques, arXiv:1510.08937 [hep-ex].

16 Осцилляционные эксперименты с интенсивными пучками нейтрино и антинейтрино на протонном ускорителе JPARC (Япония)

Руководитель Ю.Г.Куденко

Важнейшие результаты, полученные в 2015 года:

В нейтринном эксперименте T2K проведены измерения осцилляций мюонных антинейтрино и получены наиболее точные измерения угла смешивания и разности квадратов масс между вторым и третьим массовыми состояниями для антинейтрино. В дальнем детекторе Супер-Камиоканде зарегистрировано 34 мюонных антинейтрино, в то время как ожидалось 103 события в отсутствие осцилляций. Результат показан на рис. 1.

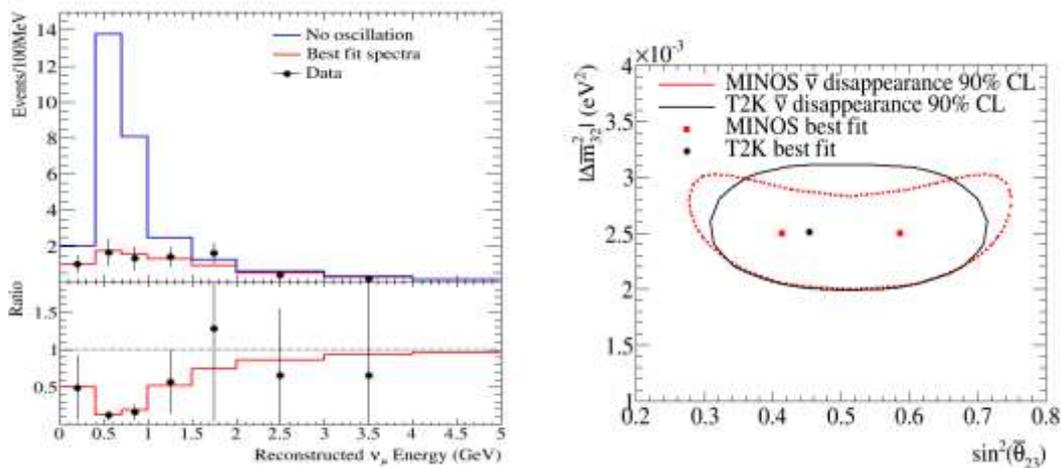


Рис.1. Распределение по энергии мюонных антинейтрино, зарегистрированных в дальнем детекторе эксперимента T2K, а также отношение экспериментальных событий к ожидаемому в отсутствие осцилляций (левый рисунок). Полученные осцилляционные параметры (правый рисунок).

Полученные параметры осцилляций мюонных антинейтрино находятся в хорошем согласии с аналогичными осцилляционными параметрами мюонных нейтрино, измеренными в T2K и других осцилляционных экспериментах. Поскольку вероятности осцилляций нейтрино и антинейтрино совпадают, при достигнутой чувствительности эксперимента CP-нарушения не обнаружено.

В эксперименте T2K измерены нейтринные сечения с легкими ядрами через заряженные и нейтральные токи в области энергий около 1 ГэВ.

В 2015 г. был разработан и начато создание активного детектора нейтрино WAGASCI, состоящего из пластиковых сцинтилляторов и водной мишени в соотношении 20:80%, который будет смонтирован на нейтринном пучке T2K. Основные элементы детектора: сегментированная нейтринная мишень, детекторы мюонов и торцевой магнитный детектор. В 2015 году группа ИЯИ разработала сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами для активных элементов WAGASCI.

Публикации:

1. K. Abe... Yu.Kudenko et al. Measurement of the Electron Neutrino Charged-current Interaction Rate on Water with the T2K ND280 pi-zero Detector arXiv:1503.08815 [hep-ex].
2. K. Abe... Yu.Kudenko et al. Measurement of the ν_{μ} charged current quasi-elastic cross-section on carbon with the T2K on-axis neutrino beam, arXiv:1503.07452 [hep-ex].
3. K. Abe... Yu.Kudenko et al. Upper bound on neutrino mass based on T2K neutrino timing measurements. arXiv:1502.06605 [hep-ex].
4. K. Abe... Yu.Kudenko et al. Physics Potential of a Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment Using J-PARC Neutrino Beam and Hyper-Kamiokande arXiv:1502.05199 [hep-ex]. PTEP (2015).
5. K. Abe... Yu.kudenko et al Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with 6.6×10^{20} protons on target. arXiv:1502.01550 [hep-ex]. Phys.Rev. D91 (2015) 7, 072010.
6. K. Abe... Yu.kudenko et al Search for short baseline ν_e disappearance with the T2K near detector. Phys.Rev. D91 (2015) 5, 051102.
7. K. Abe... Yu.kudenko et al Neutrino oscillation physics potential of the T2K experiment PTEP 2015 (2015) 4, 043C01
8. T.Koga, M.Khfbibullin, Y.Kudenko et al. Water/CH Neutrino Cross Section Measurement at J-PARC (WAGASCI Experiment), JPS Conf. Proc. **8** (2015) 023003.
9. K.Abe... A.Khotjansev, Y.Kudenko et al. Measurement of the muon neutrino inclusive charged-current cross section in the energy range of 1-3 GeV with the T2K INGRID detector,' arXiv:1509.06940 [hep-ex].
10. K.Abe... A.Khotjansev, Y.Kudenko et al. Measurement of the electron neutrino charged-current interaction rate on water with the T2K ND280 π^0 detector, Phys.Rev.D **91** (2015) 112010.
11. K.Abe... Y.Kudenko, O.Mineev et al., Measurement of the ν_{μ} charged current quasielastic cross section on carbon with the T2K on-axis neutrino beam, Phys.Rev. D **91** (2015) 11, 112002.
12. K.Abe... Y.Kudenko, O.Mineev et al., Measurement of muon anti-neutrino oscillations with an accelerator-produced off-axis beam, arXiv:1512.02495

- доклады на конференциях и школах

1. Yu.Kudenko, "Search for heavy neutrinos in fixed-target experiments", invited talk at 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, 20-26 August 2015.
2. Y.Kudenko, T.Kobayashi, Future LBL neutrino experiments in Japan, invited talk at 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, 20-26 August 2015.
3. С.Суворов, "Поиск тяжелых нейтрино в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K", Межинститутская молодежная конференции "Физика элементарных частиц и космология", Москва, Россия, 28-30 октября 2015 г.
4. Т.Овсянникова, "The new experiment WAGASCI for water to hydrocarbon neutrino cross section measurement using the J-PARC beam", oral presentation at the International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, 5-10 October 2015.
5. N.Chimuma, A. Izmaylov, M.Khabibullin et al. "A New Experiment at J-PARC to Measure the Neutrino Cross Section Ratio between Water and Plastic", poster at the International Conference on Flavor Physics & CP Violation, FPCP 2015, Nagoya, Japan, 25- 29 May 2015.
6. A.Blondel, Y.Kudenko New results in neutrino oscillations, invited talk at the International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, 5-10 October 2015.
7. Y.Kudenko, Overview of neutrino oscillations, invited talk at invited talk at 4th Gribov Memorial Workshop, 27 June 2015.
8. A.Izmaylov, T2K status and prospects, talk at VII CPAN, Segovia, Spain

"Премия за прорыв" в 2016 г. будет вручена пяти экспериментальным группам, занимающимся изучением нейтринных осцилляций: K2K/T2K, KamLand, Super-Kamiokande, SNO, Daya Bay "За фундаментальные открытия и исследование свойств нейтрино, обнаруживших новую физику за рамками Стандартной Модели элементарных частиц".

В числе лауреатов сотрудники ИЯИ РАН - участники экспериментов K2K и T2K:

Н.В. Ершов, А.О. Измайлов, Ю.Г. Куденко, В.А., Матвеев, О.В. Минеев, С.П.

Михеев, М.М. Хабибуллин, А.Н. Хотянцев, в также Д.Гудин, И.Карпиков, Я.Шустров -

студенты МФТИ, которые работали в эксперименте T2K во время получения

результатов, удостоенных премии.

17. Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов

Руководитель В.С.Пантуев

Аннотация

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы изучения природы возникновения массы нейтрино. Цель работы - поиск тяжелых нейтрино в бета распаде. Проведена модернизация отдельных элементов установки, включая высоковольтную систему, вакуумного оборудования. Полностью обновлено и опробовано программное обеспечение сбора данных, контроля состава газов, вакуумных параметров. Проведен большой объем организационно-технических мероприятий с целью получения официального разрешения для работы с радиоактивным тритием. Данное разрешение получено, приобретено минимально значимое количество трития. В 2015 году проведен предварительный сеанс измерений бета-спектра трития с целью получения оценок чувствительности установки для поиска тяжелых нейтрино. Испытан новый вариант дейтериевой лампы для использования в электронной пушке. Лампа имеет значительно лучшую стабильность интенсивности света. Измерены. Обработаны спектры потерь электронов на изотопах водорода протии и дейтерии при энергии 14 кэВ, 17 кэВ, 19 кэВ и 25 кэВ. По результатам обработки подготовлена статья. Проведена обширная вычислительная работа по оценке влияния различных систематических эффектов на измеряемый спектр электронов. В частности, объяснен эффект искажения функции пропускания спектрометра. Результаты этого исследования опубликованы в виде электронного препринта и посланы в печать. Постоянно проводились модернизация и ремонт отдельных элементов вакуумной и крио систем.

1 Введение

Стандартная модель физики частиц не полна. Об этом свидетельствуют ненулевая масса нейтрино и существование темной материи во Вселенной. Природа частиц темной материи неизвестна. К числу наиболее естественных кандидатов на роль темной материи относятся стерильные нейтрино. Эти частицы появляются в большинстве расширений Стандартной модели на случай массивных нейтрино. Стерильные (правые) нейтрино — это нейтральные лептоны. Являясь $SU(2)$ синглетами они не участвуют в слабых взаимодействиях. Однако, за исключением специальных вырожденных случаев, они смешиваются с активными (левыми) нейтрино и приводят к появлению дополнительных массовых состояний в спектре.

С экспериментальной точки зрения, в пользу существования стерильных нейтрино говорят результаты некоторых осцилляционных экспериментов с короткой базой (LSND и MiniBooNE), реакторная аномалия и результаты калибровки радио-химических экспериментов по измерению потоков солнечных нейтрино. Эти аномалии можно описать в предположении одного или двух легких стерильных нейтрино с массой порядка электронвольт. Современные космологические данные (измерение анизотропии реликтового излучения и первичный нуклеосинтез) также указывают на наиболее вероятное значение эффективного числа легких нейтрино равного четырем, что можно интерпретировать как вероятное существование одного легкого состояния стерильных нейтрино в дополнение к трем активным. С точки же зрения объяснения темной материи, наиболее интересным является диапазон масс стерильных нейтрино в области килоэлектронвольт.

По аналогии с тремя поколениями фермионов Стандартной модели, можно ожидать, что стерильные правые нейтрино также образуют поколения. Обнаружение одного поколения стерильных нейтрино придаст уверенности в существовании остальных поколений. Если одно из них образует темную материю, соотношение между массой и углом смешивания такого нейтрино существенно ограничено астрофизическими наблюдениями. Эти ограничения не распространяются на остальные поколения. В связи с этим прямые лабораторные поиски стерильных нейтрино представляют особенный интерес, как в области значений параметров соответствующих сектору темной материи, так и вне ее. Обнаружение стерильных нейтрино даст ответ сразу на ряд фундаментальных вопросов физики частиц (структура массовой матрицы нейтрино, характер расширения стандартной модели, несохранение лептонного числа), астрофизики и космологии (темная материя).

Проект направлен на прямые лабораторные поиски стерильных нейтрино в широкой области значений масс. Конкретная задача - значительное улучшение существующих ограничений на угол смешивания стерильных и активных нейтрино в области масс от десятков электронвольт и вплоть до 10 кэВ. Эта область значений масс недоступна в осцилляционных экспериментах, планирующихся в ряде мировых научных центров.

На установке «Троицк ню-масс» также проводится работа, связанная с исследованием свойств и возможных систематических эффектов в газовых тритиевых источниках по типу «Троицк ню-масс», что, в частности, также важно для установки KATRIN, Карлсруэ, Германия.

2. Полученные в 2015 году результаты

2.1 Модернизация установки «Троицк ню-масс»

Проведена существенная модернизация криогенной и вакуумной частей установки. Произведён ремонт гидравлических клапанов отсечения жидкого азота в криогенных ловушках в паро-ртутных насосах, выполнен ремонт и замена отдельных частей в сосуде-испарителе жидкого азота в системе вакуумной откачки контура, проведены испытания работоспособности двух высокопроизводительных магнито-разрядных насосов с новыми источниками питания.

Модернизирован вакуумный стенд для испытания отдельных элементов установки. В частности, на нем проведено исследование возможности использования безоконных лавинных фотодетекторов в качестве регистраторов низко энергичных электронов.

В июле 2015 года на установке успешно проведёт отладочный сеанс с частичным включением вакуумной системы без запуска сверхпроводящих магнитов. Испытаны элементы вакуумной системы, а также патрон очистки от остаточных газов, проверены отдельные программные элементы контроля параметров установки.

Проведены дополнительные расчеты магнитного транспортного канала электронной пушки. На основании этих расчетов внесены некоторые изменения в системе пушки, в частности, установлен дополнительный коллиматор.

В целях повышения скорости системы регистрации и модернизации полностью заменена система накопления и передачи данных, установлены и проверены современные контроллеры считывания и управления сигналами. Полностью переписано программное обеспечение системы сбора. Кроме этого, создано программное обеспечение для высоковольтной системы, контроля токами сверхпроводящих магнитов, газового масс-анализатора. Близка к завершению программа медленного контроля за всеми вакуумными и температурными датчиками.

2.2 Проведение сеанса измерений

Успешно завершён ряд организационных и технических мероприятий по получению разрешения работы с тритием. Разрешение получено, закуплено некоторое количество трития в пределах минимально значащей активности.

Как результат, в декабре месяце проведен сеанс первых измерений с тритием и с проверкой работоспособности всех систем установки после значительной модернизации. Начат набор статистики бета-спектра электронов с целью поиска сигналов от вклада стерильных нейтрино. Результаты обрабатываются.

2.3 Работа над публикациями

Подготовлен препринт и опубликована статья с детальным описанием планируемого эксперимента и ожидаемыми результатами, D.N. Abdurashitov et al., "The current status of "Troitsk nu-mass" experiment in search for sterile neutrino", **Journal of Instrumentation** **10** (2015) **10**, T10005; arXiv:1504.00544 .

Проведен ряд новых расчетов рассеяния электронов на регистрирующем детекторе и влияние этого процесса на свойства спектрометров, подобных нашему. Доля таких электронов достигает 15-20% и отражается в свойствах функции пропускания спектрометра. Это становится особенно важным для подготавливаемого в Германии другого эксперимента **KATRIN** с аналогичным спектрометром. Результаты расчетов объяснили ряд эффектов, наблюдаемых и ранее и остававшихся не понятными. Написана и послана в печать статья с описанием полученных результатов. В декабрьском сеансе измерений с электронной пушкой еще раз была проверена и подтверждена правильность проведенных расчетов, <http://arxiv.org/abs/1511.06129>

2.4 Участие в 2015 году в научных мероприятиях по тематике Проекта

Нозик А.А. Доклад: "The DataForge framework for data acquisition and analysis", International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond September 6-10, 2015, Moscow, Russia.

<http://csp2015.ac.ru/s9-2.html>

Коротеев Г.А. Доклад, "Status of "Troitsk nu-mass" experiment". Seventeenth Lomonosov conference on elementary particle physics. 20-26.08.2015.

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

Нозик А.А. Постер: "The DataForge software framework for scientific data processing automation", Seventeenth Lomonosov conference on elementary particle physics. 20-26.08.2015. http://www.icas.ru/english/LomCon/17lomcon/17lomcon_programme.htm

3. Наиболее важные достижения в 2015 году

- Выполнен ряд организационно-технических мероприятий, позволивший получить официальное разрешение на приобретение и работу с радиоактивным тритием.

- Осуществлена полная модернизация программного обеспечения сбора данных и отдельных элементов медленного контроля.

- На установке проведен полноценный сеанс измерений с радиоактивным тритием. Основная цель сеанса была в опробовании и отладке нового программного обеспечения сбора данных и отдельных элементов медленного контроля.

- Получены предварительные спектры бета-электронов в распадах трития в интервале энергий 13-19 кэВ.

- Завершена обработка результатов измерения рассеяния электронов на изотопах водорода H₂ и D₂ с энергией 14-25 кэВ.

- Исследован эффект влияния обратного рассеяния электронов на регистрирующем детекторе для спектрометров по типу MAC-E фильтров.

- Опубликована статья с полным описанием проводимого эксперимента.

4. Публикации

1. D.N. Abdurashitov et al., "The current status of "Troitsk nu-mass" experiment in search for sterile neutrino", **Journal of Instrumentation** **10** (2015) **10**, T10005, arxiv.org/abs/arXiv:1504.00544.

2. P.V. Grigorieva, A.A. Nozik, V.S. Pantuev, A.K. Skasyrskaya, "The role of electron scattering from registration detector in a MAC-E type spectrometer", <http://arxiv.org/abs/1511.06129>, направлено в Journal of Instrumentation.

18. Эксперимент Тунка/TAIGA

Руководитель Б.К.Лубсандоржиев

1. В совместном эксперименте на установках Тунка-133 и Тунка-Rex обнаружена корреляция энергий первичных космических лучей, измеренных по радиоизлучению ШАЛ с энергиями, измеренными по потоку черенковского света от ШАЛ. Этот результат открывает перспективы изучения спектра и состава космических лучей при энергиях 10^{17} – 10^{19} эВ в совместном эксперименте с установкой сцинтилляционных детекторов Тунка-GRANDE с темпом набора статистики в 20 раз быстрее, чем при регистрации черенковского света ШАЛ

2. Получен энергетический спектр первичных космических лучей в диапазоне от 300 ТэВ до 10 ПэВ по данным 80 часов работы первого прототипа установки HiSCORE, состоявшего из 9 станций для регистрации черенковского света ШАЛ с низким порогом. Открывает перспективы изучения энергетического спектра и массового состава космических лучей при энергии в 10 раз меньше энергии классического «колена» и структуры спектра в «колене».

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

Руководитель В.В.Кузминов

1. В 2015 году изготовлена установки ТАУ-3, состоящая из сцинтилляционного детектора Д1, склеенного из двух дисков пластмассового сцинтиллятора $d=18$ мм, $h=1$ мм. Между дисками размещён источник ^{229}Th ($T_{1/2}=7340$ лет), являющийся материнским изотопом для ^{213}Po . Источник осаждён из раствора на поверхность лавсановой плёнки $h=2.5$ мкм и накрыт такой же плёнкой, наклеенной с помощью эпоксидной смолы. Детектор размещён в защите 15 см Pb в зазоре 1 см между двумя сцинтилляционными детекторами NaI(Tl) 150·150 мм (Д2) в низкофоновом боксе подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900. Скомпонована тестовая регистрирующая установка в составе цифрового осциллографа ЛА-н10-12 PCI, встроенного в ПК. ПК в “on-line” режиме регистрирует полную форму импульсов с Д1 и Д2. В результате обработки записанных осциллограмм определяются задержки между импульсами и за выбранный временной интервал выстраивается распадная кривая дочернего изотопа ^{213}Po ($T_{1/2}=4.2$ мкс). По этой кривой определяется период полураспада τ . Строится последовательный временной ряд значений этой величины. Начаты непрерывные измерения на установке ТАУ-3. Набрана и обработана статистика за 120 дней. В результате обработки временного ряда за июль-ноябрь 2015 года обнаружена солнечная суточная вариация константы распада с усреднённой амплитудой $A_C=(1.6\pm 0.3)\cdot 10^{-3}$. Усреднённое за 120 дней значение периода полураспада ^{213}Po составило величину $T_{1/2}(\tau)=3.694\pm 0.003$ мкс, являющуюся наиболее точной в настоящее время. Справочное табличное значение поправлено (уменьшено) на 12%. Набор статистики продолжается.

2. В мае 2015 года завершён набор статистики на установках ТАУ-1 (364 дня) и ТАУ-2 (973 дня), использовавшихся для долговременных наблюдений за величиной периода полураспада ядра ^{214}Po . По предварительным результатам обработки в полном наборе данных ТАУ-2 присутствуют периодические вариации τ , обнаруженные ранее в данных за 590 дней: годовая вариация с амплитудой $A=(8.9\pm 2.3)\cdot 10^{-4}$, солнечно-суточная вариация с амплитудой $A_C=(7.5\pm 1.2)\cdot 10^{-4}$, лунно-суточная вариация с амплитудой $A_L=(6.9\pm 2.0)\cdot 10^{-4}$ и звёздно-суточная вариация с амплитудой $A_3=(7.2\pm 1.2)\cdot 10^{-4}$.

В 2015 году по теме работы были сделаны публикации:

1. E. N. Alexeev, Yu. M. Gavriilyuk, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenko, S. S. Ratkevich. «Sources of the systematic errors in measurements of ^{214}Po decay half-life time variations at the Baksan deep underground experiments»

Physics of Particles and Nuclei, Volume 46, Issue 2, (March 2015), pp 157-165

2. E.N. Alexeev, Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich. “Results of a search for daily and annual variations of the ^{214}Po half-life at the two year observation period.”

Report at the International Workshop on Progress of Particle Physics: Neutrino Physics and Astrophysics. Valday, Russia, February 1–February 8, 2015. **arXive 1505.01752** [nucle-ex] 7 May 2015

20 Исследование первичного космического излучения и поиск астрофизических источников космического излучения на комплексе установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Руководитель В.Б.Петков

1. Проводились работы по увеличению рабочей площади Мюонного Детектора (МД) ливневой установки “Ковер-2”. В 2015 году разрабатывались и изготавливались электронные блоки системы сбора данных, проводилась настройка электронных узлов сцинтилляционных счетчиков.

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

2) Разработана принципиальная электрическая схема приемных каналов для число-импульсных сигналов логарифмических преобразователей LCN-1. Разработана печатная плата для приемного блока этих сигналов. Печатные платы в количестве 14 шт., рассчитанные на 410 приемных каналов, изготовлены в производственных условиях и находятся на стадии распайки компонентов.

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

4) Разработано и изготовлено 2 экз. формирователя мастера “ ≥ 10 из 205”, отдельно для каждого тоннеля МД. В настоящее время с помощью отладочного устройства

проводятся работы, по проверке работоспособности сцинтилляционных счетчиков совместно с электронными узлами LCN-1 и SKF-1.

2. В 2015 году проводились работы по изучению чувствительности установки “Ковер-2” к диффузному гамма – излучению с энергией первичных фотонов выше 100 ТэВ. Для выделения событий от первичных гамма-квантов используется методика отбора обедненных мюонами ШАЛ. Анализ смоделированных и экспериментальных данных проводится в измеряемых единицах: полное число релятивистских частиц в Ковре (для оценки энергии ливня), и число мюонов в МД. На рисунке 1 приведены оценки чувствительности к диффузному гамма – излучению для различных конфигураций установки [8].

3. На Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) проводились работы по поддержанию его работоспособности и продолжению набора экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино из нижней полусферы. В 2015 году (с 01.01.2015 по 30.11.2015) чистое время регистрации по данной задаче составило 6642 часа, и было зарегистрировано 34 нейтринных события. За весь период наблюдения живое время регистрации по нейтринной программе достигло 259 808 часов (29.64 года), и было зарегистрировано 1563 нейтринных события.

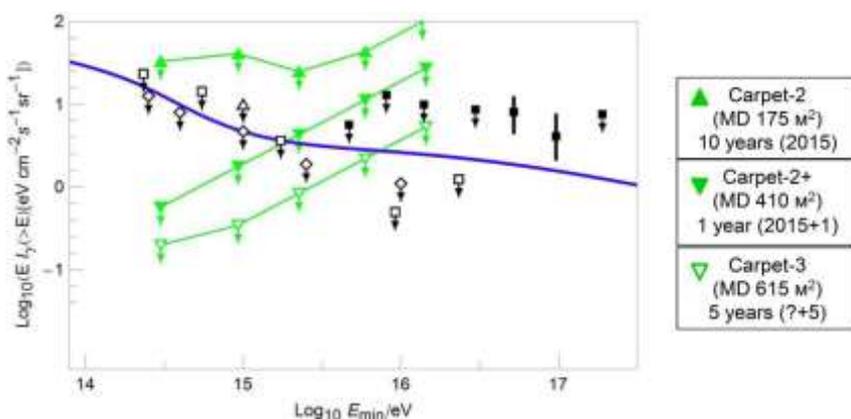


Рис.1. Чувствительность установки к диффузному гамма – излучению.

Публикации.

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

2. А. Ф. Янин, И. М. Дзапарова, М. М. Болиев, Р. В. Новосельцева. Статистический измеритель порогов дискриминаторов-формирователей сцинтилляционных детекторов. ПТЭ, № 2, с. 67–71, 2015.
3. M.M. Kochkarov, I.A. Alikhanov, M. M. Boliev, I.M. Dzaparova, R.V. Novoseltseva, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, and A.F. Yanin. Search for Low-Energy Neutrinos from Gamma-Ray Bursts at the Baksan Underground Scintillation Telescope. *Physics of Particles and Nuclei*, Vol. 46, No. 2, pp. 197–200, 2015.
4. V.B. Petkov, M.M. Boliev, I.A. Alikhanov, A.V. Butkevich, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, R.V. Novoseltseva, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, and A. F. Yanin. The Search for High Energy Muon Neutrinos from Southern Hemisphere Gamma-Ray Bursts with BUST. *Physics of Particles and Nuclei*, Vol. 46, No. 2, pp. 201–204, 2015.
5. V.B. Petkov. Experimental Search for Evaporating Primordial Black Holes. *Physics of Particles and Nuclei*, Vol. 46, No. 2, pp. 205–210, 2015.
6. Г.М. Верешков, В.Б. Петков. Поиск сверхкоротких всплесков гамма-излучения от испаряющихся первичных черных дыр. Письма в ЖЭТФ, том 101, вып. 3, с. 160 – 163, 2015.
7. V.B. Petkov. Prospects of the search for neutrino bursts from Supernovae with Baksan Large Volume Scintillation Detector. arXiv:1508.01389 astro-ph.IM]
8. D.D. Dzhappuev, V.B. Petkov, A.U. Kudzhaev, N.F. Klimenko, A.S. Lidvansky, S.V. Troitsky. Search for cosmic gamma rays with the Carpet-2 extensive air shower array. arXiv:1511.09397 [astro-ph.HE]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При участии коллектива ОТФ был построен спектр космических лучей в гибридном наборе данных обсерватории Telescope Array.

Измерено полное протон-протонное сечение при энергии в системе центра масс 95 ТэВ, с результатом 170 миллибарн.

По результатам измерений наземной решетки, собранным за период начиная с 2008 года, был осуществлен поиск возможных стационарных точечных источников нейтральных частиц при энергиях порядка 1 ЭэВ.

Совместно с ЗАО «Люминофор» разработан новый светосостав ЛРБ-1 (сцинтиллятор) на основе натурального бора для регистрации тепловых нейтронов. Полученный светосостав по свойствам не уступает применявшемуся ранее литиевому светосоставу с обогащением по литию-6 до 90%, а по цене в 5 раз ниже. Изготовлена пробная партия этого светосостава и на его основе изготовлены 4 эн детектора, площадью по 0.36 кв. м.

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

По данным работы с 1977 г по 2015 г нейтринных телескопов АСД и LVD получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.5 лет на 90% уровне достоверности. На установках LVD и АНС получено самое сильное ограничение на частоту звездных коллапсов в нашей Галактике.

Потоки нейтронов, образованных мюонами космических лучей под землей, являются основным источником фона в нейтринных экспериментах при поиске редких процессов, предсказываемых теорией. Детектор LVD, расположенный в низкофоновой лаборатории Гран Сассо на глубине 3650 м.в.э., регистрирует также мюоны и нейтроны, генерируемые мюонами. С помощью детектора LVD измерена величина выхода нейтронов, образованных в LVD мюонами со средней энергией 16 ГэВ, рожденными при взаимодействии нейтринного пучка из ЦЕРНа в грунте Гран Сассо (CNGS) по данным 2008 - 2012гг. Проведено полное моделирование эксперимента методом Монте-Карло с помощью пакета программ Geant4. Учитывая доли генерированных нейтронов в Fe и сцинтилляторе, эффективность регистрации нейтронов и длины треков мюона, было получено, что выход нейтронов в сцинтилляторе равен $Y_n = (3.6 \pm 0.7) \times 10^{-5} \text{ n/muon}/(\text{г}/\text{см}^2)$, в железе - $Y_n = (23.2 \pm 4.6) \times 10^{-5} \text{ n/muon}/(\text{г}/\text{см}^2)$.

После тестовых извлечений с июля месяца было выполнено 4 солнечных измерения на установке с двухзонной галлиевой мишенью, извлечения проводились независимо из каждой зоны, которые поставлены на измерения в счетную систему. Предварительный результат комбинированного анализа измерений $92.4 \pm 27.4 / -24.6$ SNU, в пределах ошибки согласуется с результатом за период измерений с 1990 по 2014 год, 64.6 ± 2.4 SNU, указаны только статистические ошибки измерений.

Из экстракционных растворов получено 3500 кг галлия высокой чистоты, который после предварительной очистки помещен в мишень ГГНТ для поддержания массы мишени телескопа на постоянном уровне.

Завершено создание активной защиты новой счетной системы на основе низкофоновых ФЭУ и детектора антисовпадений NaI. В новой счетной системе выполняются фоновые измерения счетчиков для проведения сравнительного анализ с измерениями фонов этих счетчиков в счетной системе ГГНТ.

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