

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
член-корр. РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

24 января 2017 года

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА,
МЕЖЗВЁЗДНАЯ И МЕЖГАЛАКТИЧЕСКАЯ СРЕДА
(промежуточный за 2016 год)
0031-2015-0005

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

М.В.Либанов
19 января 2017 года

Москва 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н.



М.В.Либанов (введение, заключение,
разделы 1-3, 6-12, 14-18)
19.01.2017

Исполнители темы:



д.ф.-м.н. Ряжская О.Г. (раздел 4)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Гаврин В.Н. (раздел 5)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Домогацкий Г.В. (раздел 13)
19.01.2017



к.ф.-м.н. Гангапшев А.М. (разделы 19,20)
19.01.2017



д.ф.-м.н. В.И.Докучаев (раздел 21)
19.01.2017

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 66 с., 20 рис.

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

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

По программе «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика, межзвёздная и межгалактическая среда» проводились следующие работы:

Изучение гравитационных свойств антиматерии на установке AEGIS, поиск лёгкой тёмной материи на установке R348 в ЦЕРНе;

Экспериментальные исследования на детекторе Компактный Мюонный Соленоид (КМС);

Поиск новой физики в распадах заряженных каонов в эксперименте NA62, разработка и создание новых нейтринных детекторов в проекте LBNO DEMO, эксперимент WA105 (ЦЕРН);

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

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;

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

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

Исследование нейтринного излучения Солнца и нестандартных свойств нейтрино;

Байкальский нейтринный эксперимент;

Исследования спектра массовых состояний нейтрино: эксперимент «Троицк ню-масс»;

Поиск всплесков гравитационного излучения на подземном детекторе ОГРАН;

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

Исследование космических лучей высоких и сверхвысоких энергий и свойств нейтрино на установках Telescope array, PRISMA-LHAASO, NOvA и E938 (MINERvA);

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

Исследования по подземной физике на детекторах АСД, LVD, OPERA: поиск нейтринного излучения на детекторах АНС и LVD. Разработка метода измерения генерации нейтронов мюонами космических лучей в аргоне. Поиск редких событий с помощью эмульсионно-трекового детектора OPERA;

Эксперимент Тунка/TAIGA;

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

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

Исследования межзвездной и межгалактической среды: активные и протяженные объекты.

Результаты опубликованы или подготовлены для публикации, доложены на международных и российских конференциях.

Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Завершена модернизация системы медленного контроля параметров температуры и вакуума установки «Троицк ню-масс». Запущена электронная пушка до 20 кэВ с разбросом энергий менее 0.5 В. Завершены измерения рассеяния электронов с энергией до 20 кэВ на изотопах водорода.

Проведена модернизация и замена устаревшего оборудования стартового детектора T0 времяпролётной системы ALICE и системы диагностики пучков для работы при максимальной энергии и интенсивности пучков LHC. Проанализированы экспериментальные данные 2015 года (p-p столкновения при энергии 13 ТэВ и Pb-Pb при энергии 5.1 ТэВ). Проведено моделирование определения центральности и плоскости реакции в эксперименте АЛИСЕ. Осуществлена подготовка детектора T0 и его техническое обслуживание во время экспериментальных сеансах 2016 года на установке ALICE. Получены новые более точные экспериментальные данные по быстротным распределениям частиц, в частности, для вылетающих вперед частиц с помощью переднего детектора T0.

Проведена сборка и тестирование модулей электромагнитного калориметра установки NADES. Получены новые экспериментальные данные для реакции $\text{Ar} + \text{Sc}$ при 5

энергиях ядер аргона в диапазоне 13-150 АГэВ. Проведена модернизация существующей считывающей электроники адронного калориметра на новую электронику DRS4.

На подземном детекторе ОГРАН проведена замена ординарных зеркал используемых Фабри-Перо интерферометров на высокотехнологичные. Достигнут проектный уровень откачки (вакуумирования) за счёт применения криоабсорбционных насосов в режиме долговременного цикла. Выполнены калибровочные тесты и контрольные измерения остаточных шумов. Разработана и внедрена прецизионная система поддержания стабильного температурного режима. Выполнена пробная серия наблюдений совместно с БПСТ БНО с отработкой алгоритмов анализа данных в моде мультиканальной регистрации совпадающих возмущений.

Завершён монтаж установки фазы 2 эксперимента и начата экспозиция эксперимента GERDA по поиску безнейтринного двойного бета распада Ge-76. В окончательном варианте в криостате из жидкого аргона установлены 40 германиевых детекторов, обогащённых по изотопу Ge-76. Установлены 30 новых BAG детекторов, 7 модернизированных коаксиальных детекторов, использованных в фазе 1 эксперимента и 3 германиевых детектора из германия с природным изотопным составом для контроля фона. Детекторы распределены на 7 отдельных стрингов. Каждый стринг окружён тонкой нейлоновой плёнкой для защиты от попадания на детекторы ионов Ca-42, образующихся от распада Ar-42. Начата экспозиция фазы 2 эксперимента по поиску безнейтринного двойного распада Ge-76 с непрерывной обработкой поступающих данных.

Проведена обработка данных калибровочных измерений широкоугольных оптических станций эксперимента Тунка (TAIGA-HiSCORE). Проведены калибровочные измерения с оптическими станциями эксперимента Тунка (TAIGA-HiSCORE), установленных в конце 2015 г. Разработана калибровочная система первого узкоугольного атмосферного черенковского телескопа TAIGA-IACT. Разработаны и созданы один из двух измерительных стендов для исследования параметров фотоумножителей для оптических станций и камер изображения эксперимента Тунка/TAIGA. Создан совместно с университетом г.Тюбинген макетный образец камеры изображения на базе кремниевого фотоумножителя узкоугольного гамма-телескопа с 16-ю пикселями (4x4) и выполнено его тестирование.

Завершена работа над созданием детектора NEWCHOD, он смонтирован на каонном канале и запущен в работу. Новый годоскоп позволит проводить набор статистики с максимальной интенсивностью пучка. Завершено создание прототипа магнитного нейтринного детектора BABY-MIND,

Измерены параметры осцилляций мюонных антинейтрино в электронные антинейтрино. Это - первый результат, характеризующий появления электронных антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино. Сравнение параметров осцилляций нейтрино и антинейтрино является важным тестом фундаментальных дискретных симметрий, включая CPT симметрию.

Проведён поиск правого WR бозона и стерильного нейтрино при энергии сталкивающихся протонов 13 ТэВ. Проведено компьютерное моделирование фона, сигнала и отклика детектора при полной энергии 13 TeV. Обработаны экспериментальные данные 2015 и 2016 годов. Изучены pile-up эффекты для адронного калориметра детектора КМС при полной энергии 13 ТэВ. Разработаны новые алгоритмы учёта pile-up эффектов. Набрана статистика и обработаны первые экспериментальные данные с энергией 13 ТэВ для сигнатуры с двумя изолированными лептонами и двумя адронными ливнями, используемой для поиска правого WR бозона и стерильного нейтрино.

После модернизации и выхода на полный режим ускорителя БАК произведён набор статистики на повышенной энергии 13 ТэВ и светимости. Получены первые данные о сечениях рождения состояний с тяжёлыми кварками. Улучшена точность измерения параметров в В- и D-секторах за пределами возможностей В-фабрик. Набрана интегральная светимость 2/fb.

Теоретически исследованы возможные варианты распределения тёмной материи в центре Галактики. Найдены ограничения на полную массу тёмной материи в центре Галактики с использованием данных измерения ньютоновской прецессии орбит быстрых S0 звезд в гравитационном поле сверхмассивной чёрной дыры Sgr A*. Вычислены аннигиляционные сигналы от частиц тёмной материи в виде суперсимметричных нейтрино и сопоставлены с данными гамма-телескопов.

Проведён поиск редких событий из накопленного материала 2008 – 2014 г. эмульсионно-трекового детектора OPERA и на детекторах АНС и LVD. Определены параметры редких событий, зарегистрированных в веществе детектора OPERA. Установлено новое, более сильное ограничение на частоту вспышек Сверхновых в Галактике.

Произведена сборка, настройка и калибровка электроники 119 сцинтилляционных счётчиков Мюонного детектора установки «Ковёр-2». Расчёт эффективности регистрации ливней от первичных гамма – квантов на установке «Ковёр-2». Обработка и анализ экспериментальных данных установки «Ковёр-2» по задаче поиска диффузного гамма-излучения. Продолжен набор экспериментальных данных на БПСТ по программе

регистрации мюонных нейтрино. Произведён поиск нейтринного сигнала от центра Галактики и других потенциальных астрофизических источников нейтрино.

Исследована возможность создания искусственных источников нейтрино на основе $Zn65$. Продолжена разработка проектов BEST, BEST-2.

Проведён набор статистики с изотопом ^{213}Po ($T_{1/2}=3.7$ мкс.) за ~ 500 суток. Обработаны результаты и получены данные о величине амплитуды солнечной, лунной и звёздной суточных и годовых компонент вариации периода полураспада изотопа ^{213}Po . Исследована возможность создания экспериментальной установки для исследования эффекта временных вариаций периода полураспада на альфа-активном изотопе ^{212}Po с минимальным среди известных периодом полураспада $T_{1/2}=0.3$ мкс. Создана экспериментальная установка для проведения долговременных измерений периода полураспада ядра ^{213}Po .

Введён в эксплуатацию на оз. Байкал в режиме долговременного набора данных модуль нейтринного телескопа с эффективным объёмом в 0.04 куб.км для регистрации нейтрино астрофизической природы.

Исследование кинематики частиц темной материи вокруг первичных черных дыр малых масс, а также вокруг сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик позволяет найти ожидаемый профиль плотности пиков темной матери и массу в пределах того или иного радиуса. В этих пиках плотности должна происходить аннигиляция частиц темной материи, поэтому данный эффект может представлять большой интерес для экспериментов по непрямо́й регистрации частиц темной материи посредством регистрации их продуктов аннигиляции (гамма-излучения и потоков заряженных частиц).

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

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	3
Введение	9
Основные результаты	10
Заключение.	63

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.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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

Руководители: В.А.Матвеев, С.Гниненко

Эксперимент NA64 на ускорителе SPS CERN.

1) Изготовлен вольфрамовый электромагнитный калориметра для улучшения выделения сигнала от рождения темного фотона A' в детекторе и подавления вторичных взаимодействий 100 ГэВ адронов в голове канала и в самой мишени.

2) Улучшена поперечная сегментация детектора синхротронного излучения электронов. При измерениях на канале получено 3-х кратное улучшения подавления фона от вторичных взаимодействий и адронной компоненты в пучке. Однако необходимо дальнейшее увеличение поперечной сегментации детектора для подавления фона.

3) Проведены 2 сеанса на канале H4 ускорителя SPS CERN, с суммарной длительностью экспозиции на пучке около шесть недель пучкового времени выделенных комитетом SPSC CERN. По результатам измерений в 2016 г. исключена существенная часть области параметров A' , объясняющая мюонную g-2 аномалию за счет вклада A' . Показано что чувствительность установки может быть улучшена в несколько раз и доведена до уровня $\sim 10^{-10}$ на падающий электрон, за счет дальнейшей модернизации детектора. Результаты направлены в печать.

2 Экспериментальные исследования на детекторе Компактный Мюонный Соленоид (CMS)

Рук.: В.А.Матвеев, Н.В.Красников

2.1 Поиск проявлений БФКЛ-померона

Как известно, адронные струи в рассеянии частиц при высоких энергиях отражают динамику рассеянных и образованных партонов: кварков и глюонов. Стандартная эволюция КХД Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД) описывает динамику рассеяния партонов на большие углы (малые быстроты) с большими поперечными импульсами, сравнимыми по величине с начальными импульсами партонов. При этом конечные партоны имеют сильное упорядочение по поперечному импульсу: каждый последующий испущенный партон имеет поперечный импульс много меньше родительского. С ростом энергии соударения начинает играть все более важную роль кинематический режим, при котором конечные партоны сильно упорядочены в широком интервале быстрот, имея при этом импульсы сравнимые с друг другом. Такой кинематический режим, доминирующий при стремлении энергии соударения к

бесконечности, описывается эволюционным уравнением Кураева-Липатова-Фадиной-Балицкого (БФКЛ).

Целью программы исследований группы в эксперименте CMS является поиск указаний на проявление новых эффектов асимптотической динамики КХД в данных CMS на БАК. Уточнение теоретического и экспериментального поведения асимптотической КХД в новом, ранее недостижимом, режиме позволит, в свою очередь, сильно расширить кинематическую область поисков новой физики за пределами Стандартной модели.

В августе 2016 г. опубликована статья коллаборации CMS по измерению коллективом ПИЯФ-ИТЭФ-ИЯИ азимутальных декорреляций двухструйных процессов как функции относительной быстроты между струями вплоть до $|\Delta y| = 9.4$ при энергии сталкивающихся пучков 7 ТэВ (CMS Coll., V. Khachatryan et al., Azimuthal decorrelation of jets widely separated in rapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, JHEP 08 (2016) 139).

Совокупность измеренных наблюдаемых (распределение по азимутальному углу, средние косинусы азимутального угла, средние косинусы двойного и тройного азимутального угла и их отношения) хорошо согласуется с вычислениями БФКЛ с учетом следующих за ведущими вкладами (NLL BFKL). В то же время, ни один из монтекарловских генераторов событий, основанных на стандартном ГЛАПД-подходе, не описывает одновременно как эти наблюдаемые, так и ранее измеренные группой ПИЯФ-ИТЭФ-ИЯИ в эксперименте CMS отношения двухструйных сечений (CMS Coll., V. Khachatryan et al., Ratios of dijet production cross sections as a function of the absolute difference in rapidity between jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2216).

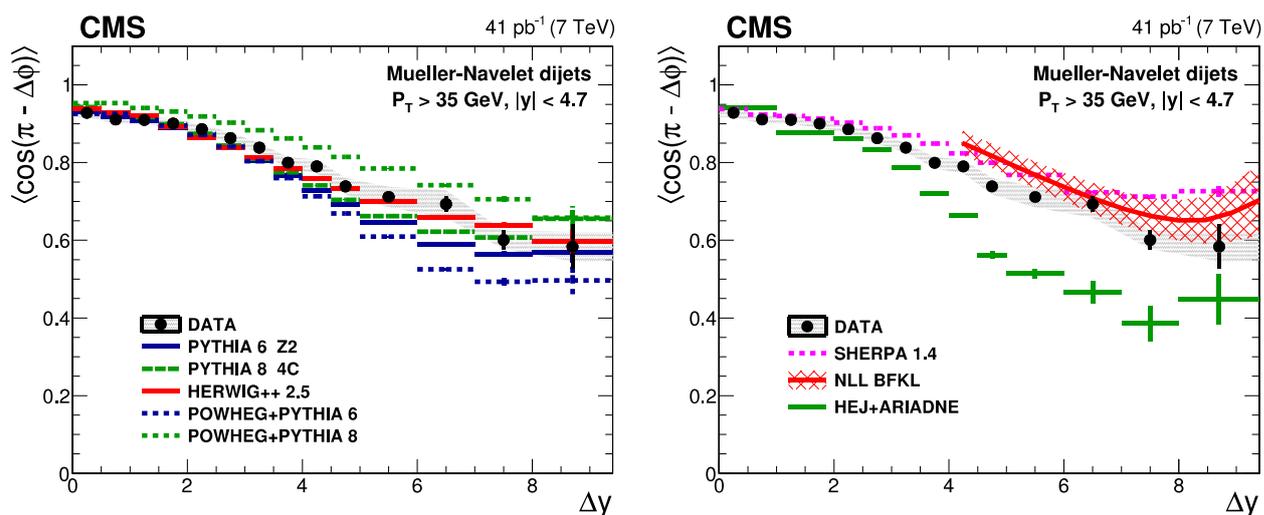


Рисунок 1 Усредненные косинусы (двойного) азимутального угла отклонения от 180 градусов между струями показаны слева (справа) как функции интервала быстроты между ними.

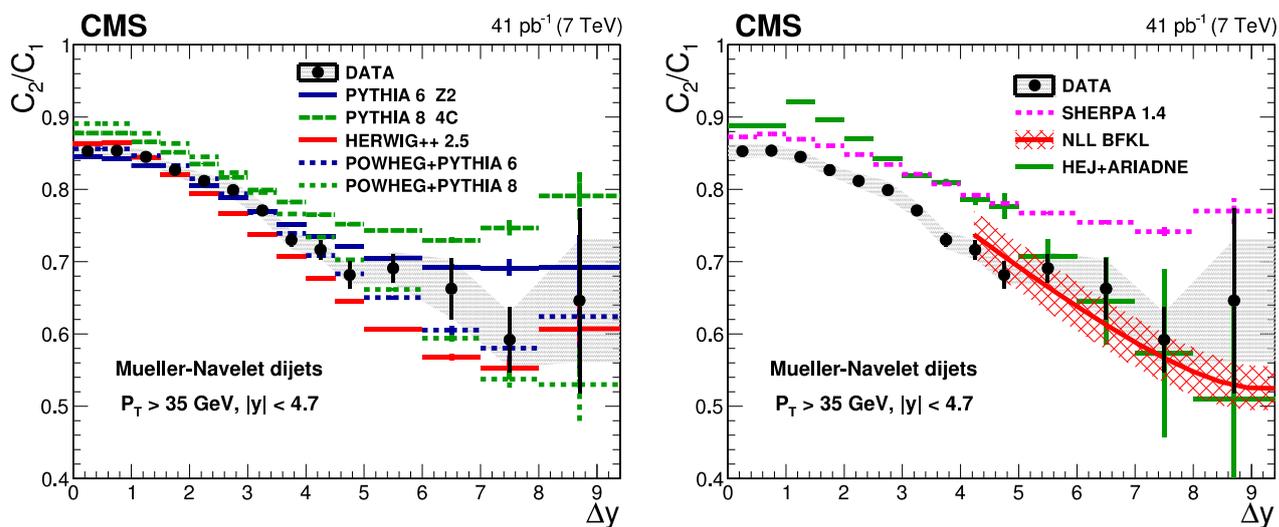


Рисунок 2 - Отношение усредненного косинуса двойного азимутального угла отклонения от 180 градусов между струями C2 и усредненного косинуса одинарного азимутального угла отклонения C1 показано как функция интервала быстроты между струями. Слева и справа показано сравнение полученных данных с теоретическими предсказаниями.

Таким образом, получено первое указание на возможное проявление эффектов асимптотического поведения КХД (БФКЛ-эффекты) в образовании адронных струй на БАК.

Для более четкого наблюдения эффектов БФКЛ-эволюции нужны измерения тех же наблюдаемых при разных энергиях и кинематических условиях. С этой целью в 2017 г. будут продолжены исследования измерения отношения сечений инклюзивных двухструйных событий к выходу двухструйных событий как функции относительной быстроты между струями с вето на дополнительные струи по поперечному импульсу с использованием данных при 2,76 ТэВ, 7 ТэВ и 8 ТэВ (FSQ-13-004). Новая наблюдаемая величина - отношение двухструйных сечений (К-фактор) с применением вето на рождение дополнительных струй может значительно усилить чувствительность к вкладу эффектов асимптотического поведения КХД.

В настоящее время и в 2017 году будет вестись работа по анализу данных 2015 г., полученных при 13 ТэВ в протон-протонных соударениях в сеансе с малой светимостью, по измерению азимутальных декорреляций двухструйных процессов как функции относительной быстроты между струями, а также для исследования измерения отношения сечений инклюзивных двухструйных событий к выходу двухструйных событий как функции относительной быстроты между струями с вето и без вето на дополнительные струи по поперечному импульсу.

Таким образом, в дополнение к полученным данным при 7 ТэВ, данные при 2,76 ТэВ, 8 ТэВ и 13 ТэВ позволят исследовать как ранее измеренные, так и новые

наблюдаемые, имеющие различную степень чувствительности к обсуждаемым БФКЛ-эффектам, в зависимости от полной энергии соударения и, таким образом, добиться возможности более яркого проявления асимптотического поведения КХД.

2.2 Поиск тяжёлого нейтрино и правого W_R -бозона

В 2016 году была продолжена работа по поиску правого W_R -бозона и тяжелого нейтрино на основе данных детектора CMS с полной энергией сталкивающихся протонов 13 ТэВ. На основе обработанной статистики в $2,1 \text{ фб}^{-1}$ полной светимости были получены новые рекордные ограничения сверху на массу правого W_R -бозона в 2,35 (1,63) ТэВ в предположении, что масса правого тяжелого тау-нейтрино равна 0,8 (0,2) от массы правого W_R -бозона (CMS collaboration, CMS EXO-16-016).

В 2017 году предполагается обработка всех данных 2015 и 2016 годов с полной светимостью порядка 40 фб^{-1} .

2.3 Исследования по шумам адронного калориметра

Работа в этом направлении велась по тематике рабочей группы Noise WG, изучающей шумы адронного калориметра. Проблема связана с тем что адронный калориметр может случайно зарегистрировать чрезвычайно большой сигнал с аномально большим шумом, что приводит к заметному искажению регистрируемого события. Для определения уровня шумов исследовались триггеры: Single Muon, JetHT, MET. Изучались различные фильтры, позволяющие отделить события с большим шумом от событий с малым шумом. Изучалась эффективность различных фильтров на основе данных 2016 года. Было показано, что эффективность фильтров Maximum YPD Hits filter, R45 RBX filter, Isolation-based filter, NEF-Negative Energy filter близка к 100% и их можно эффективно использовать при анализе данных.

2 ПУБЛИКАЦИИ

CMS Collaboration (Vardan Khachatryan et al). Search for heavy Majorana neutrinos in $e^\pm e^\pm$ jets and $e^\pm \mu^\pm$ jets events in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8 \text{ TeV}$ // JHEP 1604 (2016) 169 DOI: 10.1007/JHEP04(2016)169

CMS Collaboration (Vardan Khachatryan et al). Measurement of the double-differential inclusive jet cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ // Eur.Phys.J. C76 (2016) no.8, 451 DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4286-3

CMS Collaboration (Vardan Khachatryan et al). Search for new physics in same-sign dilepton events in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ // Eur.Phys.J. C76 (2016) no.8, 439 DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4261-z

CMS Collaboration (Vardan Khachatryan et al). Search for new physics with the MT2 variable in all-jets final states produced in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV // JHEP 1610 (2016) 006
DOI: 10.1007/JHEP10(2016)006

CMS Collaboration (Vardan Khachatryan et al). Event generator tunes obtained from underlying event and multiparton scattering measurements // Eur.Phys.J. C76 (2016) no.3, 155
DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-3988-x

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

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

Научный руководитель Ю.Г.Куденко

Полностью запущена установка и проведен первый физический сеанс с каонным пучком высокой интенсивности в эксперименте NA62 с мая по декабрь 2016 г. Набрано примерно 30% от полной статистики. Ведется анализ данных.

Группами ИЯИ РАН, ИФВЭ (Протвино) и Университетом Пизы (Италия) запущен в работу на каонном канале детектор заряженных частиц NEWCHOD, состоящий из 320 сцинтилляционных детекторов с оптоволоконным съемом сигнала и 600 микропиксельных лавинных фотодиодов. Получены параметры установки: эффективность детектирования заряженных частиц более 99%, временное разрешение лучше 1 нс.

В рамках проекта LBNO DEMO завершена разработка магнитного детектора нейтрино Baby-MIND, массой около 40 тонн и имеющий около 3000 активных детекторов. Завершено изготовление всех детекторов заряженных частиц и они в полном объеме доставлены в ЦЕРН. В июне 2016 года сцинтилляционные детекторы были протестированы на пучке заряженных частиц T9 в ЦЕРНе. Полученные результаты (световыход, эффективность, временное разрешение) полностью удовлетворяют требованиям эксперимента нейтринного эксперимента с длинной базой T2K, в котором будет использоваться детектор Baby-MIND. Собраны первые модули детектора Baby-MIND (рис.3), каждый из которых состоит из стальных намагниченных пластин и сцинтилляционных детекторов.



Рисунок 3 Первый модуль детектора Baby-MIND, смонтированный в ЦЕРНе.

3 ПУБЛИКАЦИИ

1. V.Duk, S.Fedotov, A.Kleymenova et al. Performance studies of the hodoscope prototype for the NA62 experiment, JINST 11 (2016) no.06, P06001.

2. V.Duk, Search for $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ at the NA62 experiment, EPJ Web Conf. \{\bf 130\} (2016) 06001.

3. V.Duk, Cosmology tests in rare kaon decays, EPJ Web Conf. \{\bf 125\} (2016) 03001.

доклады на конференциях и школах

1. А.Мефодьев и др. Разработка нейтринного детектора Baby-MIND, доклад на Международной Сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН, 12 - 15 апреля 2016, ОИЯИ, Дубна, Россия.

2. A.Mefodiev, Y.Kudenko et al. Status of Magnetized neutrino detector Baby-MIND, talk at the Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA2016), 10-14 October 2016, Moscow, Russia.

3. А.Мефодьев, А.Костин, Детектор Baby-MIND: статус и ближайшие планы, доклад на 59-я Всероссийской научной конференции МФТИ с международным участием, 21–26 ноября, 2016 года, Долгопрудный, Россия.

4. V.Likhacheva, PERFORMANCE OF LARGE SCINTILLATOR DETECTORS WITH WLS/SiPM READOUT, talk at the 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA2016), Moscow 10-14 October 2016.

5. S.Fedotov, A.Kleymenova, Detector NEWCHOD for NA62 experiment, Сессия секции ядерной физики ОФН РАН, Дубна, 12-15 апреля 2016.

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

Научный руководитель Е.Н. Гуцин

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.

Продолжен набор статистики на повышенной энергии 13 ТэВ и светимости. Получены новые данные о CP-нарушении в редких распадах B- и D-мезонов.

Существенно улучшена точность измерения и статистика редких распадов B- и D-мезонов. Набрана интегральная светимость $2/\text{fb}$. Получены уточнённые результаты о CP-нарушениях в редких распадах B- и D-мезонов при энергии 13 ТэВ, в том числе изучены радиационные распады и осуществлён поиск поляризации в эксклюзивном распаде b на $s\gamma^{(*)}$ за пределами предсказаний СМ.

5 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

Научный руководитель - А.Б.Курепин

В 2016 году проводились физические измерительные сеансы по столкновению протонов и протонов с ионами свинца на установке ALICE коллайдера LHC. Модернизация, устранение неполадок, поддержание работоспособности, обеспечение безаварийного процесса измерений и получения данных с детектора T0, созданного сотрудниками ИЯИ РАН и МИФИ на установке ALICE, были выполнены практически полностью сотрудниками ИЯИ.

В отчётный период был также проведён анализ данных 2015-2016 годов тестовых сеансов на пучке ускорителя PS. Основная цель измерений состояла в исследовании рабочих характеристик прототипа новой детекторной системы фронтального интеллектуального триггера (детектор ФИТ), разрабатываемого в ИЯИ РАН для модернизации установки ALICE в 2018-2019 гг. Основными компонентами детектора являются микроканальных ФЭУ XP85012/A1-Q MCP-PMT Planacon с кварцевым окном, кварцевые радиаторы и пассивная быстрая электроника. Результаты анализа тестовых измерений показали необходимость модернизировать ФЭУ на микроканальных пластинах

(МКП). Совместно с фирмой PHOTONIS USA проведена модернизация и выпущен один экземпляр нового МКП.

Проведенные исследования показали, что для модифицированного МКП амплитудные спектры имеют меньший разброс, временное разрешение улучшилось и увеличился динамический диапазон. В 3 квартале поведена следующая модификация МКП и фирмой PHOTONIS USA выпущены новые МКП. Лабораторные испытания этих МКП показали, что динамический диапазон увеличен в два раза и размеры МКП уменьшились на 10 мм. Изменение размера МКП позволило изменить конфигурацию детектора от плоского до вогнутого расположения элементов детектора (рис.1), что позволяет улучшить временное разрешение детектора ФИТ. Результаты испытаний модернизированного МКП на пучках PS, CERN представляют интерес и для других экспериментов на БАК.

В феврале 2016 года проведен монтаж прототипа детектора ФИТ на установке ALICE для проведения испытаний в реальных условиях эксперимента с использованием разработанных прототипов электроники. С мая 2016 по настоящее время прототип детектора успешно и надежно участвует в наборе данных для р-р столкновений при энергии \sqrt{s} 13 TeV

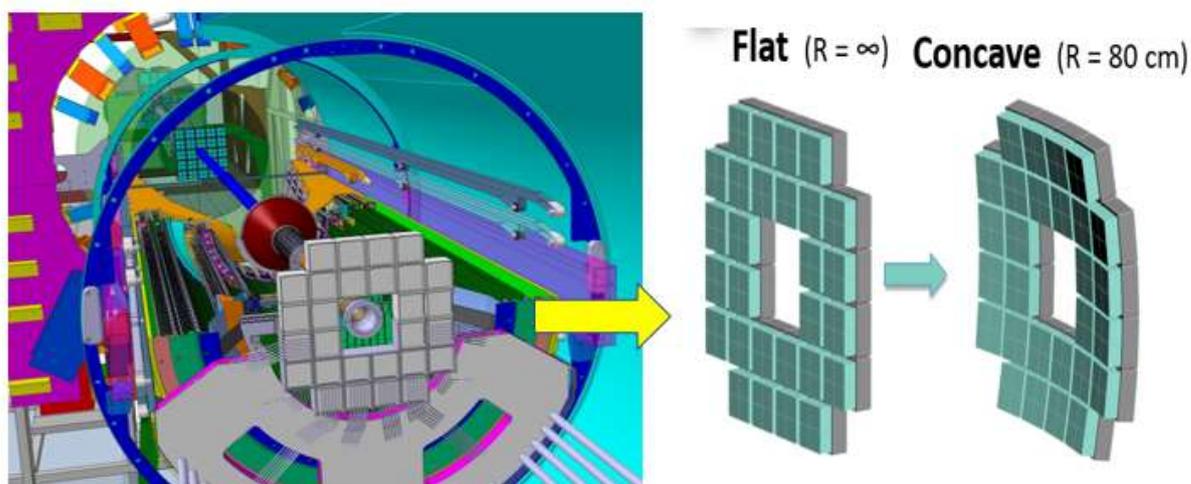


Рисунок 4 Плоская и вогнутая конфигурация детектора ФИТ на установке АЛИСЕ.

В течение сеанса коллайдера LHC 2016 года проведены измерения дифракционных процессов при столкновении протонов сверхвысокой энергии 13 ТэВ в с.д.м., при максимальной энергии, когда-либо полученной на ускорителях. Начата обработка полученных экспериментальных данных по одиночной, двойной и центральной дифракции, которая включает анализ данных не только с системы детекторов ADA и ADC, созданных при участии сотрудников ИЯИ РАН, но и данных центральных детекторов ITS (вершинный детектор), TOF – T0 (время пролетная система), TPC (время проекционная камера) и др.

Используя пучки БАК с уменьшенной энергией на фиксированной мишени, можно получить данные в диапазоне энергий 30-100 ГэВ. Поиск эффектов фазового перехода и определение критической точки является основной целью энергетического скана. Более того, это дает возможность исследовать рождение чармония, J/ψ , $\psi(2S)$, χ , на нескольких ядерных мишенях. Проект AFTER совместно с Институтом CNRS в Орсе, Франция, подготовлен для представления в комитет ЦЕРНа.

Рассмотрены электромагнитные возбуждения дискретных уровней ядер свинца в их ультрапериферических взаимодействиях на БАК с последующим излучением ими фотонов и переходом в основное состояние. Данный процесс можно отнести к разновидности ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ). В 2016 году дополнительно исследовались каналы эмиссии протонов вместе с нейтронами и чисто протонные каналы электромагнитной диссоциации. Данные по эмиссии протонов необходимы для уточнения сечений электромагнитной диссоциации, на которые опирается метод мониторинга светимости БАК для Pb-Pb столкновений.

5 ПУБЛИКАЦИИ

1. V.A. Grigoryev, V.A. Kaplin (Moscow Phys. Eng. Inst.), T.L. Karavicheva, A.B. Kurepin (Moscow, INR), E.F. Maklyaev, Yu A. Melikyan (Moscow Phys. Eng. Inst.), D.V. Serebryakov (Moscow, INR), W.H. Trzaska (Jyvaskyla U.), E.M. Tykmanov (Moscow Phys. Eng. Inst.). "Study of the Planacon XP85012 photomultiplier characteristics for its use in a Cherenkov detector" Published in J.Phys.Conf.Ser. 675 (2016) no.4, 042016

2. V. Grigoryev (Moscow Phys. Eng. Inst.) Grigoryev, V.A. Kaplin (Moscow Phys. Eng. Inst.), T.L. Karavicheva, A.S. Konevskikh, A.B. Kurepin (Moscow, INR), V.A. Loginov, Yu A. Melikyan (Moscow Phys. Eng. Inst.), I.V. Morozov, A.I. Reshetin, D.V. Serebryakov et al. M. Samsonov "Fast timing and trigger Cherenkov detector for collider experiments", .Phys.Conf.Ser. 675 (2016) no.4, 042015

3. А.Б.Курепин, Н.С.Топильская «Проект эксперимента AFTER с фиксированной мишенью на пучках коллайдера LHC для физики адронов и столкновений тяжелых ионов» Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Дубна, 12-15 апреля 2016 г. Послано в печать в ЭЧАЯ.

4. Н.С.Топильская, А.Б.Курепин «Heavy ion collisions in a fixed target mode at the LHC beams» Международный Балдинский Семинар ISHEPP_ XXIII, Дубна, Россия, 19-24 сентября 2016 г Послано в печать в European Physical Journal.

5. D.A. Finogeev¹, V.A. Grigoryev², V.A. Kaplin, O.V. Karavichev¹, T.L. Karavicheva¹, A.S. Konevskikh¹, A.B. Kurepin¹, A.N. Kurepin¹, V.A. Loginov², A.I.

Mayevskaya¹, Yu.A. Melikyan², I.V. Morozov¹, D.V. Serebryakov¹, A.I. Shabanov¹, M. Slupecki³, A.A. Tikhonov¹ and W.H. Trzaska "Performance study of the fast timing Cherenkov detector based on a microchannel plate PMT";ICPPA-2016,Moscow,Russia Послано в печать в J.Phys.Conf.,

5 Коллаборационные публикации АЛИСЕ

1. "Jet-like correlations with neutral pion triggers in pp and central Pb–Pb collisions at 2.76 TeV" Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 182301
2. Higher harmonic flow coefficients of identified hadrons in Pb-Pb collisions at 2.76 TeV
JHEP 1609 (2016) 164
3. Elliptic flow of electrons from heavy-flavour hadron decays at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. JHEP 1609 (2016) 028
4. D-meson production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV and in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV. Phys.Rev. C94 (2016) no.5, 054908
5. Pseudorapidity dependence of the anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. Phys.Lett. B762 (2016) 376-388
6. Correlated event-by-event fluctuations of flow harmonics in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 182301
7. Measurement of transverse energy at midrapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. Phys.Rev. C94 (2016) no.3, 034903
8. Centrality dependence of charged jet production in p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Eur.Phys.J. C76 (2016) no.5, 271
9. Centrality dependence of $\psi\psi(2S)$ suppression in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. JHEP 1606 (2016) 050
10. The Λp interaction studied via femtoscopy in p + Nb reactions at $\sqrt{s_{NN}}=3.18$ GeV. Phys.Rev. C94 (2016) no.2, 025201
11. Measurement of D-meson production versus multiplicity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. JHEP 1608 (2016) 078
12. Particle identification in ALICE: a Bayesian approach. Eur.Phys.J.Plus 131 (2016) no.5, 168
13. Anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.13, 132302
14. Production of $K^*(892)^0$ and $\phi(1020)$ in p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Eur.Phys.J. C76 (2016) no.5, 245

15. “Correlated Event-by-Event Fluctuations of Flow Harmonics in Pb-Pb Collisions at 2.76 TeV” Phys.Rev. Lett. 117, 182301

16. Multiplicity dependence of charged pion, kaon, and (anti)proton production at large transverse momentum in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Phys.Lett. B760 (2016) 720-735

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

Научный 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.5, слева).

В 2016г. на установке NA61 состоялся целый ряд физических и тестовых сеансов с участием группы ИЯИ РАН.

Проведены измерения выходов заряженных частиц для реакции Pb+Pb при энергиях налетающих ядер свинца 13, 30 и 150 АГэВ. Полученные данные будут использоваться также для анализа азимутальных потоков идентифицированных частиц, образовавшихся в этой реакции и анализа флуктуаций поперечного импульса и множественности заряженных частиц.

Получены новые экспериментальные данные по рождению частиц в протон-ядерных взаимодействиях при энергиях протонов. Результаты по выходам пионов и каонов необходимы для анализа данных в нейтринных экспериментах в FERMILAB.

Выполнен анализ распределений по флуктуациям поперечного импульса и множественности для отрицательных пионов, образующихся в этих реакциях $p+p$, $\text{Be}+\text{Be}$ и $\text{Ar}+\text{Sc}$ при энергиях в диапазоне от 13 до 158 ГэВ на нуклон. Полученные результаты для центральных событий (рис.1) не дают указаний на усиление флуктуаций в данной области

энергий и масс сталкивающихся ядер. Отбор событий по центральности проводился с использованием переднего адронного калориметра, разработанного и изготовленного в ИЯИ РАН. В конце 2016г. и течение 2017г и 2018г. будут проведены еще ряд измерений для реакций Xe+La и Pb+Pb в этой же области энергий, что позволит значительно расширить область поиска критической точки на фазовой диаграмме.

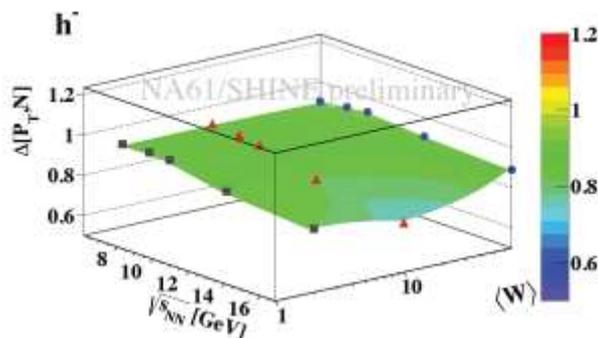


Рисунок 5 Зависимость от энергии и среднего числа возбужденных нуклонов величины $\Delta(P_T, N)$, которая не зависит как от объема, так и от флуктуации объема области взаимодействия сталкивающихся ядер. Значения $\Delta(P_T, N)$ полученные для отрицательных пионов в p+p, и для 5% наиболее центральных событий в реакциях Be+Be и Ar+Sc показаны черными, красными и синими символами, соответственно.

Разработана методика и выполнен анализ направленных коллективных потоков в столкновениях ядер свинца при энергии налетающих ядер 30 АГэВ. Экспериментальные данные для этого анализа были получены в тестовом сеансе на установке NA61/SHINE в ноябре 2015г. Получены значения коллективных направленных потоков при этой энергии для не идентифицированных частиц в нескольких диапазонах по центральности взаимодействия. Показана перспективность систематического анализа коллективных потоков идентифицированных частиц на этой установке при разных энергиях и размерах сталкивающихся ядер.

6 ПУБЛИКАЦИИ

1. 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/SHINE Collaboration (N. Abgrall (Geneva U.) *et al.*). 76 pp. Eur.Phys.J. C76 (2016) no.2, 84 CERN-PH-EP-2015-278 DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-3898-y e-Print: arXiv:1510.02703 [hep-ex]
2. Production of Λ -hyperons in inelastic p+p interactions at 158 GeV/c NA61/SHINE Collaboration (A. Aduszkiewicz (Warsaw U.) *et al.*). 19 pp. Eur.Phys.J. C76 (2016) no.4, 198 CERN-PH-EP-2015-274 DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4003-2 e-Print: arXiv:1510.03720 [hep-ex]

3. Measurements of π^\pm differential yields from the surface of the T2K replica target for incoming 31 GeV/c protons with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS
NA61/SHINE Collaboration (N. Abgrall (Geneva U.) *et al.*), 23 pp. Eur.Phys.J. C76 (2016) no.11, 617 CERN-EP-2016-057 DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4440-y
e-Print: arXiv:1603.06774 [hep-ex] |направлено в Eur. Phys. J. C
4. Multiplicity and transverse momentum fluctuations in inelastic proton-proton interactions at the CERN Super Proton Synchrotron NA61/SHINE Collaboration (A Aduszkiewicz *et al.*), 16 pp. CERN-PH-EP-2015-273 e-Print: arXiv:1510.00163 [hep-ex] |направлено в Eur. Phys. J. C
5. Two-particle correlations in azimuthal angle and pseudorapidity in inelastic p+p interactions at the CERN Super Proton Synchrotron NA61/SHINE Collaboration (A. Aduszkiewicz (Warsaw U. (main)) *et al.*), 14 pp. CERN-EP-2016-234 e-Print: arXiv:1610.00482 [nucl-ex] |направлено в Eur. Phys. J. C
6. Hadron calorimeter (PSD) with new photo-detectors (MPPC) in NA61 experiment at CERN. Marina Golubeva, Fedor Guber, Alexander Ivashkin, Alexander, Izvestnyy, Alexey Kurepin, Sergey Morozov, Oleg Petukhov, Ilya Selyuzhenkov, Ilya Svintsov, Arkadiy Taranenko |Направлено в журнал Journal of Physics: Conference series
7. Aduszkiewicz A et al [NA61 Collaboration] 2016 – Report from the NA61/SHINE experiment at the CERN SPS – *CERN-SPSC-2016-038*
(<http://cds.cern.ch/record/2222876>)

7 Исследование космических лучей высоких и сверхвысоких энергий и свойств нейтрино на установках Telescope array, Prisma-LHAASO, NOvA и E938 (MINERvA)

Научные руководители Г.И.Рубцов, Ю.Стенкин, А.Буткевич

7.1 Исследование космических на установке Telescope array

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 является 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. Целью проекта является исследование всего круга вышеописанных проблем, на основе данных, собранных обсерваторией Telescope Array, и в составе международной коллаборации.

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 и низкоэнергетическое расширение обсерватории, TALE.

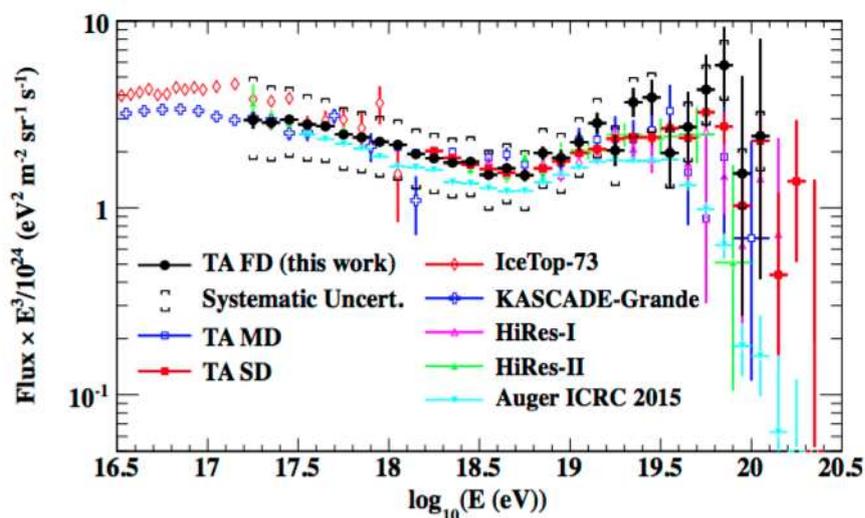
Важнейшие результаты, полученные в 2016 г .

Имеются свидетельства того, что космические лучи с энергиями порядка ЭэВ являются протонами. Если эти протоны имеют Галактическое происхождение, то должна наблюдаться анизотропия направлений их прихода, вызванная отклонениями в Галактическом магнитном поле. Мы рассчитали ожидаемую анизотропию в этом случае, и сравнили с наблюдениями. Ни усиление потока вдоль Галактической плоскости, ни его дефицит в направлении Галактического антицентра обнаружены не были. Это свидетельствует о том, что протоны имеют экстра-галактическое происхождение. Получено ограничение сверху на уровне 1.3% на долю Галактических протонов 95% уровнем достоверности.

Проводились измерения радарного сечения широких атмосферных ливней с использованием специально сконструированных радио передатчиков и антенн. Сегодня величина этого сечения не известна, несмотря на семидесятилетнюю историю изучения. Нами получены лучшие ограничения сверху на его величину.

Были изучены корреляции между нейтрино высоких энергий зарегистрированных установкой IceCube и направлениями прихода космических лучей сверхвысоких энергий, полученных обсерваториями им. Пьера Оже и Telescope Array. Значимых корреляций на уровне открытия обнаружено не было, однако имеются указания на существование таких корреляций, что требует дальнейших наблюдений.

По результатам измерений флюоресцентных телескопов обсерватории Telescope Array, собранным за семь лет наблюдений, нами был нами был построен спектр космических лучей в широком диапазоне при энергиях выше $10^{17.2}$ эВ. Проведено сравнение



с результатами более ранних измерений другими экспериментами.

Рис 6 Спектр космических лучей, полученный за семь лет наблюдений флюоресцентными телескопами обсерватории Telescope Array в сравнении с измерениями других экспериментов.

7.1 ПУБЛИКАЦИИ

[1] R.U. Abbasi, ..., O. Kalashev, B. Lubasandorzhev, M. Pshirkov, G. Rubtsov, I. Tkachev, S. Troitsky .. et al, "Search for EeV Protons of Galactic Origin", *Astropart.Phys.* 86 (2017) 21-26.

[2] R.U. Abbasi, ..., O. Kalashev, M. Pshirkov, G. Rubtsov, I. Tkachev, S. Troitsky .. et al, "First Upper Limits on the Radar Cross Section of Cosmic-Ray Induced Extensive Air Showers", *Astroparticle Physics* 87 (2017) 1-17.

[3] R.U. Abbasi, ..., O. Kalashev, M. Pshirkov, G. Rubtsov, I. Tkachev, S. Troitsky .. et al, "Search for correlations between the arrival directions of IceCube neutrino events and ultrahigh-energy cosmic rays detected by the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array ", *JCAP* 1601 (2016) 037.

[4] R.U. Abbasi, ..., O. Kalashev, M. Pshirkov, G. Rubtsov, I. Tkachev, S. Troitsky .. et al, "The energy spectrum of cosmic rays above $1e17.2$ eV measured by the fluorescence detectors of the Telescope Array experiment in seven years", *Astropart.Phys.* 80 (2016) 131-140.

Доклады на конференциях в 2016 г.:

1. М. Пширков, И. Ткачев, Пленарный доклад “Telescope Array и Auger: статус, результаты, планы.”, 34-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 15-19 августа 2016, Дубна, Россия.

2. С.В. Троицкий, Composition studies with the Telescope Array surface detector, 2016 International Conference on Ultra-High Energy Cosmic Rays, 11-14.10.2016 Kyoto.

3. Г.И. Рубцов, UHECR and multimessenger studies, The Second International LOMONOSOV Collaboration Meeting, 01.11.2016, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, MSU.

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

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

Результаты 2016.

В международном эксперименте NOvA впервые были получены результаты, которые с достоверностью 2.5σ указывают на то, что примеси мюонных и тау нейтрино в третьем массовом состоянии нейтрино m_3 не одинаковы. Это означает, что угол смешивания θ_{23} не равен 45 градусам, т. е. смешивание нейтрино не является максимальным. Эксперимент еще не набрал достаточно данных (на дальнем детекторе зарегистрировано 78 событий), чтобы утверждать об открытии не максимального смешивания. Пока набрана только шестая часть запланированной статистики, т. е. $6 \cdot 10^{20}$ протонов на мишень.

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

7.2 ПУБЛИКАЦИИ

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

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

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

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

7.3 Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения

космических лучей в рамках международного эксперимента LHAASO

Научный руководитель - Стенькин Ю.В.

В 2016 г. были получены новые результаты по изучению космических лучей сверхвысоких энергий разработанным в ИЯИ РАН методом (проект PRISMA). С помощью специализированных сцинтилляционных детекторов (эн-детекторы) были измерены функции пространственного распределения тепловых нейтронов в ШАЛ и получен спектр мощностей ШАЛ по числу тепловых нейтронов на двух уровнях наблюдения: на уровне моря (установка PRISMA-32) на высоте 4300 м над уровнем моря (установка PRISMA-YBJ). Проведено детальное моделирование экспериментов и получено хорошее согласие расчета с экспериментальными данными. Начата разработка нового метода измерения химического состава космических лучей при энергиях выше 1 ПэВ.

Разработан проект и начато создание полномасштабной установки PRISMA-LHAASO в рамках международного проекта LHAASO. Собран и настроен первый кластер из 16 эн-детекторов на основе нового недорогого борного сцинтилляционного светосостава, разработанного в сотрудничестве с ЗАО «Люминофор». Заказано и частично получено оборудование для расширения установки до 4 кластеров.

7.3 ПУБЛИКАЦИИ

1. O.B. Shchegolev, V.V. Alekseenko, D.M. Gromushkin, X. Ma, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, J. Zhao. Electron and thermal neutron lateral distribution functions in EAS at high altitude, *JoP*, 718 (2016) 052038.
2. . V. Bartoli, P. Bernardini, X.J. Bi, et al. Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in extensive air showers selected by the ARGO-YBJ experiment. *Astroparticle Physics*, 81, pp. 49–60 (2016).
3. О.Б. Щеголев, Ю.В. Стенькин. Функция пространственного электронов и тепловых нетронов в широких атмосферных ливнях на уровне моря. Краткие сообщения по физике. №7, (2016), сс. 24-31.
4. Ю.В. Стенькин, О.Б. Щеголев от имени коллаборации PRISMA. Новый метод изучения химического состава космических лучей. Доклад на 34 ВККЛ, (2016), Известия РАН, серия физическая (2017), в печати
5. Стенькин Ю.В., Громушкин Д.М., Петрухин А.А., Степанов В.И., Щеголев О.Б., Яшин И.И. Применение нового метода изучения химического состава космических лучей на примере данных установки PRISMA-32. Доклад на 34 ВККЛ, (2016)
6. Victor Alekseenko, Ananstasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. Exotic geophysical phenomena observed in an environmental neutron flux study using EAS PRISMA detectors. *EPJ,Web of Conf.* (2017), in press
7. Victor Alekseenko, Ananstasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. Exotic geophysical phenomena observed in an environmental neutron flux study using EAS PRISMA detectors. *EPJ,Web of Conf.* (2017), in press
8. Victor Alekseenko, Ananstasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. The PRISMA - LHAASO project: status and overview. *EPJ,Web of Conf.* (2017), in press
9. Victor Alekseenko, Ananstasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. Study of the EAS size spectrum in thermal neutrons measured by PRISMAYBJ array. *EPJ,Web of Conf.* (2017), in press

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

Руководитель - Ю.Г.Куденко

Участники Проекта: 16 человек, из них 10 человек моложе 35 лет, 2 аспиранта, 6 студентов.

В нейтринном эксперименте T2K проведены измерения осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино и получены в электронные нейтрино и антинейтрино. Основываясь на одновременном анализе данных по осцилляциям мюонных нейтрино в электронные нейтрино и мюонных антинейтрино в электронные антинейтрино, накопленных в 2015 и 2016 годах, эксперимент T2K впервые получил указание на максимальное нарушение CP симметрии в нейтринных осцилляциях. Для обеих возможных иерархий масс нейтрино наиболее вероятным является значение CP нечетной фазы $\delta_{CP} = -\pi/2$, соответствующее максимальному CP нарушению. Значения фазы $\delta_{CP} = 0$ и $\delta_{CP} = \pi$, если CP симметрия сохраняется, исключены с доверительной вероятностью более 90% (Рис.1). Поиск CP нарушения стал возможен благодаря открытию в 2013 году в эксперименте T2K осцилляций мюонных нейтрино в электронные нейтрино.

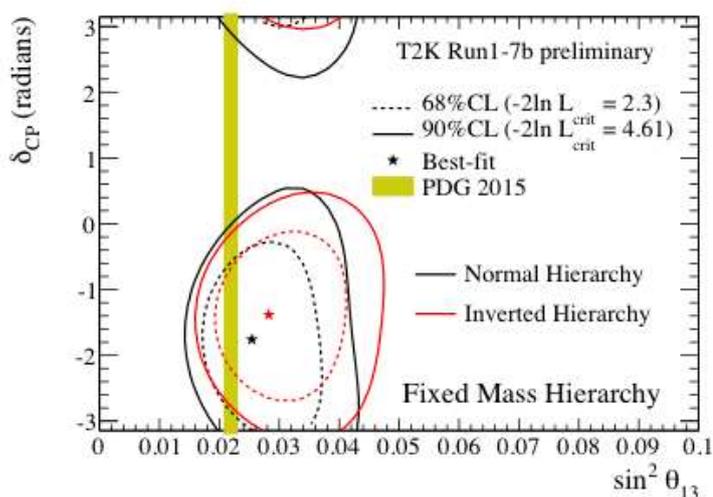


Рисунок 7 Значения угла смешивания θ_{13} и CP нечетной фазы, полученные в эксперименте T2K. Наиболее вероятная CP нечетная фаза соответствует значению -90 градусов.

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

8 ПУБЛИКАЦИИ

1. K. Abe... Yu.Kudenko et al. Upper bound on neutrino mass based on T2K neutrino timing measurements. Phys.Rev. D93 (2016) 012006.
2. 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, Phys.Rev. D93 (2016) no.7, 072002
3. K.Abe... Y.Kudenko, O.Mineev et al., Measurement of muon anti-neutrino oscillations with an accelerator-produced off-axis beam, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.18, 181801.
4. T.Ovsiannikova et al. The new experiment WAGASCI for water to hydrocarbon neutrino cross section measurement using the J-PARC beam, J.Phys.Conf.Ser. 675 (2016) 012030.
5. K.Abe, ...A.Khotjansev, Y.Kudenko...N.Yershov et al. Measurement of double-differential muon neutrino charged-current interactions on C8H8 without pions in the final state using the T2K off-axis beam, Phys.Rev. D93 (2016) 112012.
6. K.Abe, M.Antonova...A.Khotjantsev, Y.Kudenko...N.Yershov et al. Measurement of Coherent π^+ Production in Low Energy Neutrino-Carbon Scattering, Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 192501.
7. K.Abe, M.Antonova...A.Khotjantsev, Y.Kudenko...N.Yershov et al. First Measurement of the Muon Neutrino Charged Current Single Pion Production Cross Section on Water with the T2K Near Detector, arXiv:1605.07964.
8. C. Andreopoulos, M.Antonova...A.Khotjantsev, Y.Kudenko...N.Yershov et al. TITUS: the Tokai Intermediate Tank for the Unoscillated Spectrum, arXiv:1606.08114.
9. K.Abe, M.Antonova...A.Khotjantsev, Y.Kudenko...N.Yershov et al. Proposal for an Extended Run of T2K to 20×10^{21} POT, arXiv:1609.04111.

доклады на конференциях и школах

1. M.Khabibullin, Latest results from T2K neutrino experiment, доклад на сессии секции ЯФ ОФН РАН, Дубна 12-15 апреля 2016 г.
1. S.Suvorov, A.Izmaylov, for heavy neutrinos in the ND280 near detector of the T2K experiment. Доклад на Международной Сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН, 12 - 15 апреля 2016, ОИЯИ, Дубна, Россия.
2. T.Ovsiannikova, A. Izmaylov, Yu. Kudenko, The status of neutrino experiment WAGASCI, Доклад на Международной Сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН, 12 - 15 апреля 2016, ОИЯИ, Дубна, Россия.

3. А.Медфодьев и др. Разработка нейтринного детектора Baby-MIND, Доклад на Международной Сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН, 12 - 15 апреля 2016, ОИЯИ, Дубна, Россия.

4. A.Izmaylov, S.Suvorov, M. Lamoureux Search for heavy neutral leptons with the near detector complex ND280 of the T2K experiment, poster at the Conference NEUTRINO2016, 4-9 July 2016, London, UK.

5. L.Koch, S.Bordoni, A.Hillairet, A. Izmaylov et al.Measurement of neutrino interactions in gaseous argon with T2K, poster at the Conference NEUTRINO2016, 4-9 July 2016, London, UK.

7. A.Izmaylov, Search for Heavy Neutral Leptons with the Near Detector Complex ND280 of the T2K Neutrino Experiment at J-PARC, talk at the Conference IDM 2016, 18-22 July 2016, Sheffiled, UK.

8. A.Mefodiev, Y.Kudenko et al. Status of Magnetized neutrino detector Baby-MIND, talk at the Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA2016), 10-14 October 2016, Moscow, Russia.

9.Y.Kudenko, TOF scintillator detectors for the ND280 upgrade, talk at the Workshop on Neutrino Detectors based on Gas TPC, CERN 8-9 November 2016.

Бакалаврские работы, защищенные в 2016 г.

И.Цуцков, Д.Мангутов, А.Строганов - студенты МФТИ.

9 Подземная физика на детекторах АСД, LVD, OPERA

Поиск нейтринного излучения на детекторах АНС и LVD. Разработка метода измерения генерации нейтронов мюонами космических лучей в аргоне. Поиск редких событий с помощью эмульсионно-трекового детектора OPERA.

Научный рукоодитель - О.Г.Ряжская

По данным 1977 – 2016 гг работы нейтринных телескопов ИЯИ РАН: российской установки АСД (Артемковский Сцинтилляционный Детектор, Артемовск, Украина) и российско-итальянской установки LVD (Large Volume Detector, Лаборатория Гран-Сассо, Италия) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.94 года на 90% уровне достоверности.

Опубликована статья по материалам доклада на конференции TAUP, Torino:

O G Ryazhskaya, «Study of the penetrating component of cosmic rays underground using large scintillation detectors», *Journal of Physics: Conference Series* 718 (2016) 052036, (5 pages).

На установке LVD исследован фон от радона, связанного с подвижкой скального грунта, вызываемой микросейсмическими толчками. Обнаружены «предвестники» крупных землетрясений, произошедших в Италии в 2016 году.

Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, В.Л. Дадыкин, Е.А. Добрынина, Р.И. Еникеев, А.С. Мальгин, О.Г.Ряжская, И.Р. Шакирьянова, В.Ф. Якушев и Коллаборация LVD «Сезонные вариации потока нейтронов, генерируемых мюонами, и фона естественной радиоактивности в подземной лаборатории Гран Сассо», *Известия РАН, Серия физическая*, (в печати).

Эмульсионно-трековый детектор OPERA проводил свой эксперимент по прямому наблюдению осцилляционных тау-нейтрино в пучке мюонных нейтрино из ЦЕРНа. Два больших магнитных спектрометра используются для идентификации мюонов, рожденных в тау распадах и во взаимодействиях мюонных нейтрино по заряженному каналу (ν_{μ}^{CC}) путем измерения их заряда и импульса. Помимо кинематического анализа тау- распадов фон в результате распада очарованных частиц, образующихся при взаимодействии ν_{μ}^{CC} , снижается за счет эффективного определения мюонного трека. Разработан новый метод определения заряда в магнитных спектрометрах детектора OPERA для идентификации мюонов при распаде тау лептонов и взаимодействиях мюонных нейтрино. Сравнение экспериментальных данных, полученных новым и старым методами, а также с Монте-Карло моделированием, показывает значительное снижение (до 40 %) от доли ошибочно определенных зарядов.

Опубликована статья в журнале *Journal of Instrumentation*:

N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration) «Determination of the muon charge sign with the dipolar spectrometers of the OPERA experiment», *JINST_056P_0416*, 2016.

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

Научный руководитель - А.В.Фещенко

Измерители формы сгустков, создаваемые в ИЯИ РАН, позволяют наблюдать форму сгустков в линейных ускорителях ионов с временным разрешением около 10 пикосекунд, а также ее эволюцию в течение импульса тока пучка. Работы по разработке и созданию измерителей формы сгустков для ускорителя Linac-4 были начаты в 2009 году. Ранее в период 2009-2013 годов был разработан, изготовлен, поставлен и испытан на пучке первый детектор данного типа непосредственно для ускорителя. 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. Работа была начата в конце 2013 года, и летом 2015 года измеритель был поставлен в ЦЕРН. Осенью 2015 года сотрудниками ИЯИ РАН были выполнены сборка, наладка и лабораторные испытания второго измерителя, включая как механику, так и электронику.

Поставленный и испытанный ранее первый измеритель использовался в канале транспортировки из RFQ в DTL при энергии 3 МэВ, после третьего резонатора с трубками дрейфа при энергии 50 МэВ, после ускоряющей структуры CCDDL при энергии 102 МэВ и летом 2016 года был установлен стационарно непосредственно на выходе Linac-4 после структуры PIMS при энергии 160 МэВ. В конце ноября – начале декабря 2016 года сотрудниками ИЯИ РАН проводились измерения с помощью первого измерителя, однако было обнаружено, что вышел из строя вторичный электронный умножитель, что не позволяло проводить измерения с достаточной точностью по амплитуде. При этом проектная точность по фазе обеспечивалась, что позволило понять поведение пучка, а также во многом объяснить результаты, получаемые и на втором измерителе. Поскольку постоянное место установки второго измерителя в канале транспортировки из ускорителя в бустер в настоящее время еще не готово, то летом 2016 года с целью обеспечения возможности его испытаний он был установлен в этом же канале временно. Временное место расположения выбрано непосредственно перед экспериментом по обдирке пучка отрицательных ионов водорода в протоны (Half Sector Test), что накладывало ограничения на длительность импульса тока пучка не более 10 мкс. Расположение измерителей (BSM#1 и BSM #2) показано на схеме ускорителя (рис. 8а).

На рис. 8b,c приведен пример измерений поведения формы сгустков с помощью двух измерителей. На первом измерителе длительность импульсов составляла 100 мкс, на втором - 10 мкс. Хотя импульсный ток пучка не превышал 10 мА было обнаружено очень высокое влияние нагрузки током в ускорителе. Переходный процесс при включении пучка длится

около 50 мкс, а измерения вторым измерителем проводятся лишь в его начале. Данные результаты хорошо согласуются с результатами измерений фазового положения сгустков и используются для наладки систем стабилизации амплитуд и фаз ускоряющих полей.

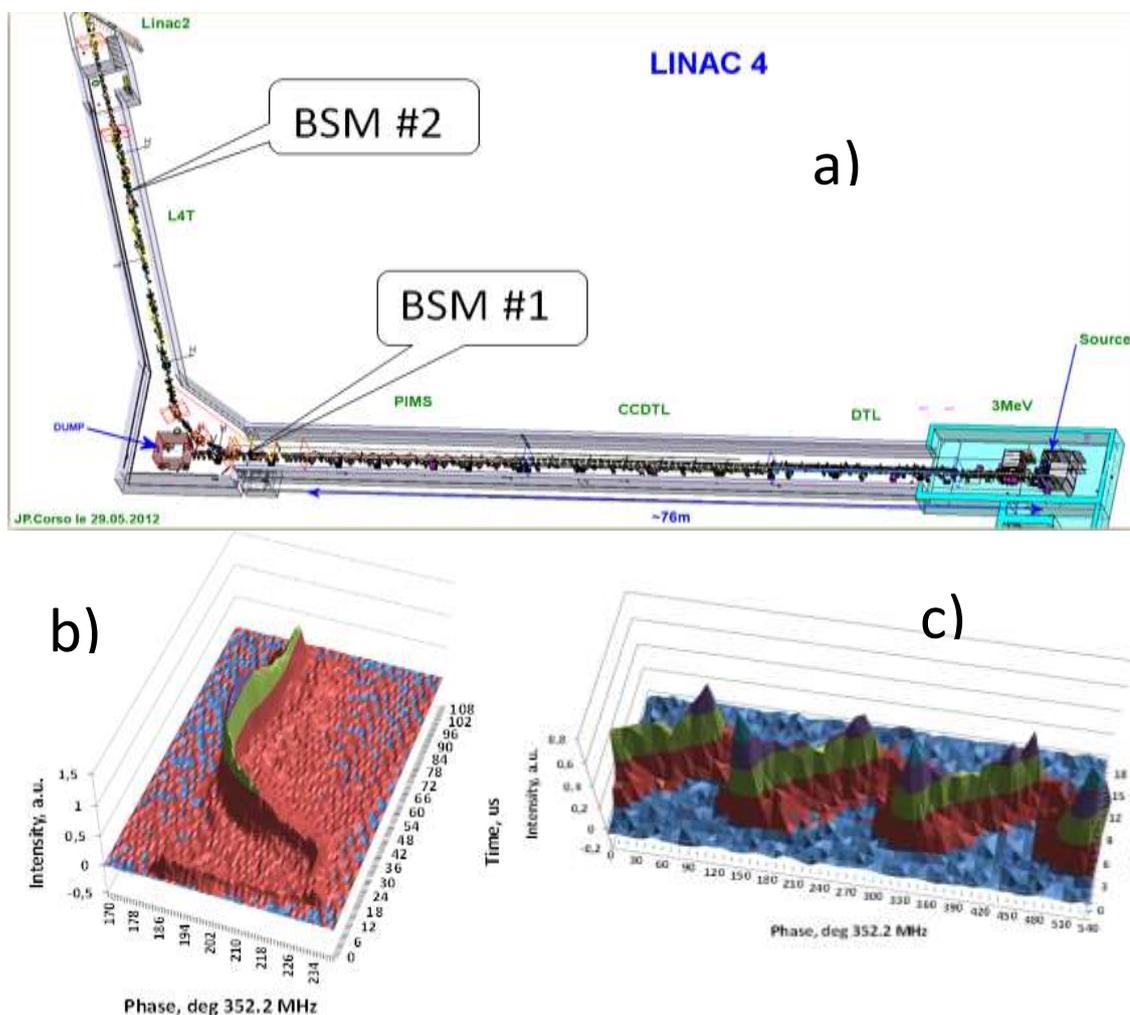


Рисунок 8 Схема ускорителя Linac-4 и места расположения первого (BSM#1) и второго (BSM#2) измерителей (а). Результаты измерения поведения формы сгустков в течение импульса тока пучка с помощью первого (b) и второго (c) измерителей.

Ожидаемые результаты в 2017 г.

Налаживание регулярных измерений формы сгустков, использование измерителей для исследования и наладки продольного движения в ускорителе и минимизации разброса по энергии при инжекции пучка в бустер.

10 ПУБЛИКАЦИЯ

A.Feschenko, S.Gavrilov. «Methods for Bunch Shape Monitor Phase Resolution Improvement», 28-я Международная конференция по линейным ускорителям, Linac 2016, East Lansing, USA, сентябрь 2016 (в печати).

11 Исследование нейтринного излучения Солнца и нестандартных свойств нейтрино

Научный руководитель - В.Н.Гаврин

Были исследованы возможности проведения эксперимента по поиску осцилляций электронных нейтрино на короткой базе для галлиевой мишени с нейтринным источником ^{65}Zn .

Было найдено, что статистика эксперимента BEST-2 с источником ^{65}Zn активностью 1 МКи будет сравнима со статистикой эксперимента BEST с источником ^{51}Cr активностью 3 МКи.

При одинаковых систематических ошибках оба эксперимента имеют примерно равную чувствительность к параметрам осцилляций. Другая энергия нейтрино, излучаемых источником ^{65}Zn , обеспечивает возможность локализации параметра осцилляций Δm^2 в областях, в которых этот параметр не может быть локализован в измерениях на двухзонной галлиевой мишени с источником ^{51}Cr .

Таким образом, проведение обоих экспериментов BEST и BEST-2 может не только найти осцилляции, но и обеспечит локализацию их параметров в значительной части области чувствительности.

Исследовались возможности изготовления источников ^{65}Zn . Источники ^{65}Zn малой активности были получены облучением тепловыми нейтронами в атомном реакторе. Проведены измерения гамма спектров источников малой активности.

Получены оценки сечений образования ^{65}Zn в реакторах.

В спектрах гамма излучения ^{65}Zn присутствия радиоактивных примесей не обнаружено, т.о., показано, что источник ^{65}Zn может быть изготовлен очень высокой радиоактивной чистоты.

11 ПУБЛИКАЦИЯ

V.N. Gavrin et al. Search for sterile neutrinos on the Gallium Germanium Neutrino Telescope with artificial neutrino sources in the BEST experiment. (Отправлена в печать).



Рисунок 9 На фотографиях представлены отдельные узлы системы для транспортировки жидкометаллической галлиевой мишени между химико-технологической системой экстракции германия ГГНТ и двухзонной облучательной установкой

12 Байкальский нейтринный эксперимент

Научный 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 НТ1000 (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.

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 2016 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 2016 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 2016 года выполнена комплектация сборки и испытание в лабораторных условиях оптических модулей и измерительных систем восьми новых секций телескопа Baikal-GVD содержащих в общей сложности 96 ОМ. В 2016 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).

План 2017год.

Тестирование комплектующей аппаратуры, монтаж и развертывание в условиях зимней экспедиции на оз.Байкал второго кластера создаваемого нейтринного телескопа Baikal-GVD с чувствительным объемом порядка куб. км. Запуск установки в режимах тестирования и постоянного набора данных.

Первичный анализ данных, полученных за 200 дней экспозиции первого кластера на протяжении 2016 года.

13 Поиск всплесков гравитационного излучения на подземном детекторе ОГРАН

Научные руководители - Безруков Л.Б., Руденко В.Н.

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

В текущем состоянии антенна выведена в рабочий режим «непрерывного мониторинга» с целью выполнения тестовой серии наблюдений вместе с приборами контроля окружающих возмущений, включая гравитационную антенну геофизического уровня «УЛИТКА».

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

13 ПУБЛИКАЦИИ

1. Повышение чувствительности гравитационного детектора OGRAN В.В.Кулагин, С.И.Орешкин, С.М.Попов, В.Н.Руденко, И.С.Юдин “Ядерная физика и инжиниринг”. 2016. V.7. №. 1. (на рус. яз.) Physics of Atomic Nuclei. 2016. V.79. №. 11-12. (на англ. яз.)

2. Opto-acoustical gravitational bar detector with cryogenic mirrors / V.V.Kulagin , S.I.Oreshkin , S.M.Popov , V.N.Rudenko , M.N.Skvortsov, I.S.Yudin Gravitational and Cosmology v. 22 , N 4 , p 374, 2016

3. Current status of GW experiment and multi-messenger astronomy V.N.Rudenko Proc.Int.Workshop “Quark Phase Transition and Multimessenger Astronomy” издания Publishing house “Sneg” Pyatigorsk, том 1, с. 96-104, 2016

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

Научные руководители - Л.Б.Безруков, В.В.Синёв

В эксперименте GERDA получен новый результат по измерению времени жизни по отношению к двойному бета распаду ^{76}Ge с улучшенной точностью $T_{1/2} = (1.926 \pm 0.095) \cdot 10^{21}$ лет. Также осуществлён поиск других редких процессов с чувствительностью лучшей достигнутой ранее.

Limit on the Radiative Neutrinoless Double Electron Capture of Ar from GERDA Phase I
GERDA Collaboration (M. Agostini (Gran Sasso), ... (ОЛБЭНА: I. Barabanov, V. Gurentsov, A. Veresnikova, E. Yanovich, ОЭФ: L. Bezrukov, E. Doroshkevich, B. Lubsandorzhiev, O. Selivanenko, БНО: A. Gangapshev, V. Kazalov, V.V. Kuzminov) *et al.*). May 5, 2016. 7 pp.
Published in Eur.Phys.J. C76 (2016) no.12, 652
e-Print: [arXiv:1605.01756](https://arxiv.org/abs/1605.01756) [nucl-ex]

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 2016 года. Российские учёные из ИЯИ РАН, ИТЭФ участвовали в работах Международного эксперимента GERDA и имеют согласованные планы участия на 2016 год. Основными результатами 2016 года является окончание разработки и монтажа второй фазы эксперимента. Была продолжена обработка экспериментального материала, полученного в первой фазе эксперимента, результаты опубликованы в печати.

Начата вторая фаза эксперимента. Основная цель второй фазы эксперимента снижение уровня фона на порядок по сравнению с результатом первой фазы до уровня 10^{-3} /кэВ.кг.год

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 на 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.

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.

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 искомых распадов на уровне в 6 раз превосходящие ранее полученные ограничения.

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.

Разработана маломасштабная технология очистки отходов обогащенного германия, образовавшихся во время производства детекторов. Создана в России полномасштабная модель установки очистки. Начаты отладочные работы

Список публикаций 2016 года:

Eur. Phys. J. C (2016) 76:652 Limit on the radiative neutrinoless double electron capture of ^{36}Ar from GERDA Phase I. M. Agostini¹, M. Allardt, A. M. Bakalyarov, M. Balata, I. Barabanov, N. Barros, L. Baudis, C. Bauer

Search of Neutrinoless Double Beta Decay with the GERDA Experiment M. Agostini (Munich, Tech. U. & Munich, Tech. U., Universe) et al.. 2016. 7 pp. Published in Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 1876-1882 DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.303 Conference: C14-07-02 Proceedings

14.1 Эксперимент Double Chooz

Коллаборация Double Chooz представила измерения нейтринного угла смешивания θ_{13} (один из параметров, описывающих процесс нейтринных осцилляций) для электронных антинейтрино, наблюдаемых через процесс обратного бета-распада, в котором нейтрон захватывается водородом. Была разработана новая техника достижения значительного подавления фона и систематических ошибок. Получена величина $\sin^2 2\theta_{13} = 0,095 \pm 0,038$ -

0,039 из наблюдаемой скорости событий как функции мощности реактора (этот метод не чувствителен к энергетическому спектру антинейтрино).

Публикация: Measurement of θ_{13} in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection techniques Double Chooz Collaboration (Y. Abe (Tokyo Inst. Tech.), ... (ОЭФ: L.Bezrukov, B.K Lubsandorzhev, V.Sinev) *et al.*). Oct 29, 2015. 26 pp. Published in JHEP 1601 (2016) 163 e-Print: arXiv:1510.08937 [hep-ex]

С января 2016 г. Double Chooz продолжил измерения двумя детекторами - ближним и дальним. Весь год участники ИЯИ РАН 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.

Публикации 2016 году:

Characterization of the Spontaneous Light Emission of the PMTs used in the Double Chooz Experiment Double Chooz Collaboration (Y. Abe (Tokyo Inst. Tech.) *et al.*). Apr 23, 2016. 27 pp. Published in JINST 11 (2016) no.08, P08001 DOI: [10.1088/1748-0221/11/08/P08001](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/08/P08001) e-Print: [arXiv:1604.06895](https://arxiv.org/abs/1604.06895) [physics.ins-det]

14.2 Эксперимент JUNO

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

15 Эксперимент Тунка/TAIUGA

Руководитель: Б.К.Лубсандоржиев

В 2016 году в рамках эксперимента Тунка велись активные работы по проекту TAIGA (Tunka Advanced Instrument for Gamma & cosmic ray Astrophysics).

Проект TAIGA включает в себя успешно функционирующую в течение ряда лет установку Тунка-133 площадью 3 км² и три установки, находящиеся в стадии создания – это TAIGA-HiSCORE, TAIGA-IACT и TAIGA-GRANDE.

TAIGA-HiSCORE – это проект широкоугольного черенковского детектора ШАЛ с порогом в несколько десятков ТэВ для исследований в области физики космических лучей и поиска локальных источников гамма-квантов высоких энергий. Низкий порог регистрации ШАЛ в установке достигается включением в одну оптическую станцию 4-х 10-дюймовых ФЭУ (R7081 фирмы HAMAMATSU), каждый ФЭУ снабжен конусом Винстона, что позволяет увеличить чувствительную площадь оптической станции до 0,64 м², рис. 1а. В настоящее время пущена в строй первая очередь установки TAIGA-HiSCORE, состоящая из 28 оптических станций. Энергетический порог для адронов составляет ~250 ТэВ, что соответствует порогу для гамма-квантов в ~80 ТэВ. На рис. 1б показан измеренный в 2016 году этой установкой энергетический спектр первичного космического излучения. Как видно из рисунка данные TAIGA-HiSCORE хорошо согласуются в области малых энергий с прямыми баллонными экспериментами (ATIC-2) и при больших энергиях с данными нашего детектора Тунка-133. В настоящее время все 28 существующих оптических станций TAIGA-HiSCORE направлены на Крабовидную Туманность для регистрации гамма-квантов высоких энергий от этого локального источника.

а)



б)

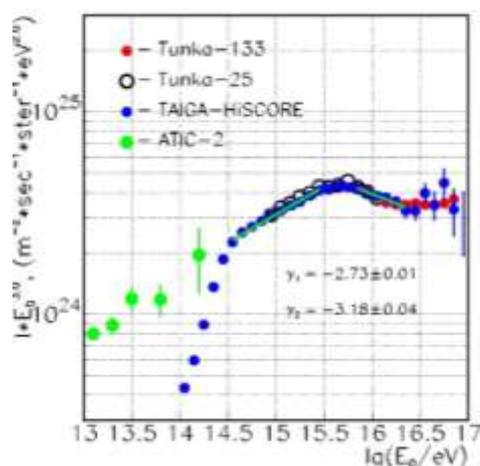


Рисунок 10 а) - Оптический модуль черенковского детектора ШАЛ TAIGA-HiSCORE (модуль ориентирован в направлении Крабовидной Туманности); б) – Энергетический

спектр первичного космического излучения, измеренный установкой TAIGA-HiSCORE
(28 оптических станции)

Осенью 2016 года в рамках проекта TAIGA в Тункинской долине смонтирован первый из 10-12 планирующихся узкоугольных атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT. На рис.11 представлен эскиз камеры изображения телескопа, состоящий из 547 малогабаритных фотоумножителей XP1911В и выходной электроники на базе MAROC-3.

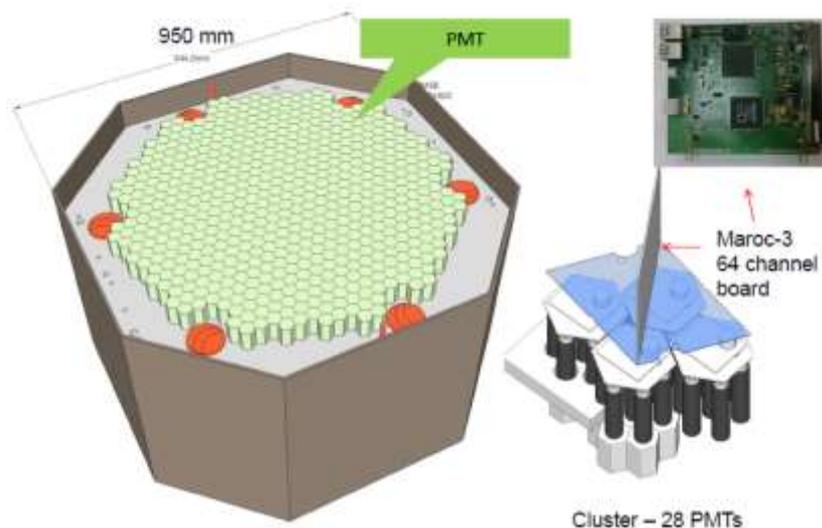


Рисунок 11 Эскиз камеры изображения первого телескопа TAIGA-IACT.

На рис.12а показан первый телескоп с камерой изображения и несколькими зеркалами. На рис. 12б можно видеть первые зарегистрированные события от ШАЛ.

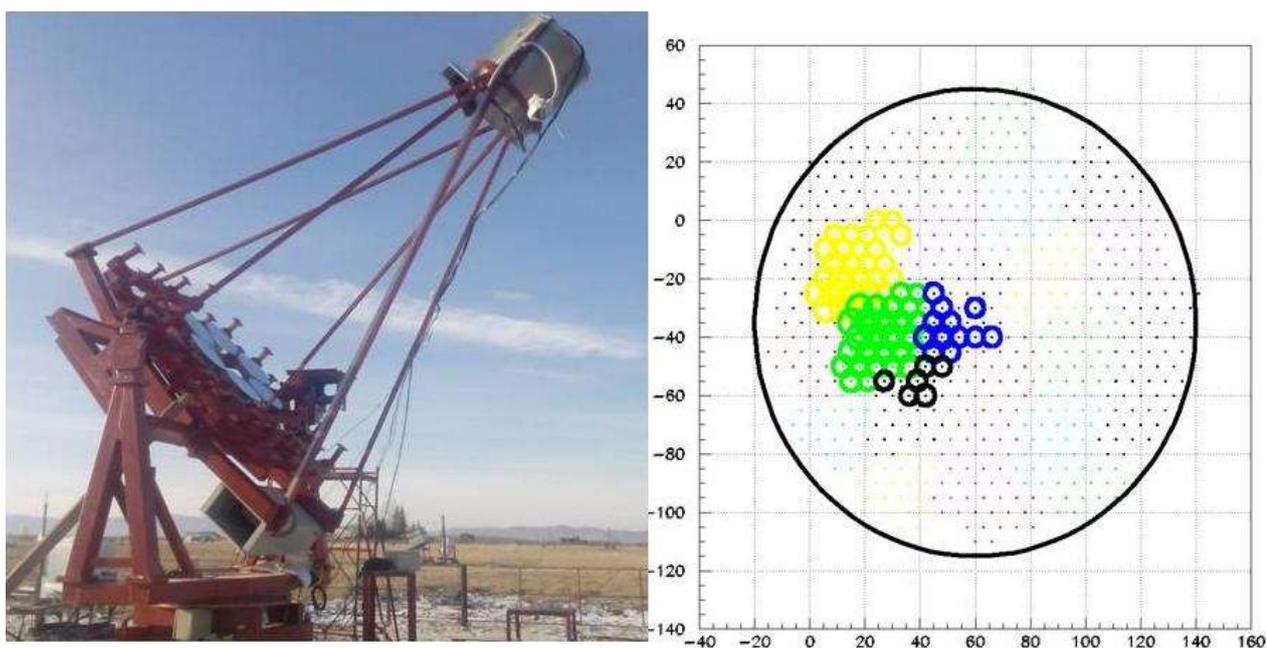


Рисунок 12 а) Первый телескоп TAIGA-IACT, смонтированный в Тункинской долине;

б) первые зарегистрированные телескопом события от широких атмосферных ливней.

В ИЯИ РАН разработаны и созданы калибровочные системы для установки TAIGA-HiSCORE и для первого телескопа TAIGA-IACT на основе светодиодов высокой мощности, диффузных рассеивателей света и оптоволоконных кабелей. Эти системы успешно тестируются в полевых условиях в Тункинской долине. С помощью этих систем удалось синхронизировать оптические станции установки TAIGA-HiSCORE с точностью ~ 100 пс, что позволяет достичь высокого углового разрешения $\sim 0,1^\circ$.

В ИЯИ РАН также разработан и создан измерительный стенд для тестирования и исследования параметров фотоумножителей камер изображения телескопов TAIGA-IACT.

14 ПУБЛИКАЦИИ

1. [Berezhnev S.F.](#), [Budnev N.M.](#), [Chiavassa A.](#), et al. The Primary CR Spectrum by the Data of the Tunka-133 Array // JPS conference proceedings. 2016. Vol.9. P.010009.

2. N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev, et al. The TAIGA experiment: from cosmic ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley // Journal of Physics: Conference Series 718 (2016) 052006.

3. V.V. Prosin, N.M. Budnev, A. Chiavassa, et al. Results and perspectives of cosmic ray mass composition studies with EAS arrays in the Tunka Valley // Journal of Physics: Conference Series 718 (2016) 052031.

4. V.V. Prosin, S.F. Berezhnev, N.M. Budnev, et al. Results from Tunka-133 (5 years observation) and from the Tunka-HiSCORE prototype // EPJ Web of Conferences 121, 03004 (2016).

5. N. Budnev, I. Astapov, N. Barbashina, et al. The TAIGA experiment: From Cosmic Ray to Gamma-Ray Astronomy // NIMA in press. Available on-line 14 June 2016 (Vienna). / <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.041>.

6. O. Gress, I. Astapov, N. Budnev, et al. The wide-aperture gamma-ray telescope TAIGA-HiSCORE in the Tunka Valley // NIMA in press. Available on-line 14 June 2016. / <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.08.031>.

12. B.K.Lubsandorzhev. Multi_TeV Gamma-Ray Astronomy // Physics of Particles and Nuclei. 2016. Vol.47. No.6. P.947-956.

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

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

Исполнители:

ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н. Е.Н. Алексеев;

научный сотрудник Ю. М. Гаврилюк;

зав. лаб, к.ф.-м.н. А. М. Гангапшев;

ст. инженер-экспериментатор А.М.Гежаев;

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

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

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

15 РЕФЕРАТ

ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА, ВАРИАЦИИ СУТОЧНЫЕ И ГОДОВЫЕ, ИЗОТОП ^{213}Po

Для проверки устойчивости эффекта вариаций периода полураспада изотопа ^{214}Po была создана установка с источником ^{229}Th , являющимся родительским изотопом ядер ^{213}Po ($T_{1/2}=4.2$ мкс). В результате обработки временного ряда за июль 2015 по сентябрь 2016 года (всего 422 дня) обнаружена солнечно-суточная вариация константы распада с усреднённой амплитудой $A_C=(9.6\pm 4.2)\cdot 10^{-4}$, лунно-суточная с $A_L=(5.7\pm 2.9)\cdot 10^{-4}$ и звёздно-суточная с $A_3=(5.0\pm 2.9)\cdot 10^{-4}$. Усреднённое за 422 дня значение периода полураспада ^{213}Po составило величину $T_{1/2}= 3.702 \pm 0.001$ мкс, являющуюся наиболее точной в настоящее время. Справочное табличное значение поправлено на 12%.

15 ВВЕДЕНИЕ

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН с 2008 года проводится экспериментальное исследование поведения во времени периода полураспада (τ) ядра ^{214}Po [1-3]. Для определения этого параметра измеряются задержки между моментом рождения ядра (бета-электрон от распада ^{214}Bi + гамма-квант) и его распадом (альфа-частица от распада ^{214}Po). Измерения выполнены на низкофоновой установке ТАУ-2 в подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900 на глубине 4900 м в.э. (973 дня) и на установке ТАУ-1 в подземной низкофоновой лаборатории КАПРИЗ на глубине 1000 м в.э. (354 дня). Временной интервал измерений на установке ТАУ-1 соответствует концу интервала измерений на установке ТАУ-2. Объектами дальнейшего анализа являются временные ряды значений τ с различным временным шагом. Из данных установки ТАУ-2 усреднённое значение периода полураспада ^{214}Po составило величину $\tau=163.47\pm 0.03$ мкс. В ряду значений τ обнаружены годовая вариация с амплитудой $A=(9.8\pm 0.6)\cdot 10^{-4}$, 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 $A_3=(7.2\pm 1.2)\cdot 10^{-4}$.

Было найдено, что максимумы амплитуды τ наблюдаются в моменты достижения максимального значения проекцией вектора скорости точки поверхности Земли с установкой на направление к исследуемому источнику возможных вариаций (Солнце, Луна, не идентифицированный звёздный объект). В принципе, происхождение солнечной и лунной вариаций можно было бы объяснить влиянием этих объектов на характеристики измерительной установки посредством вызываемых ими на Земле периодических геофизических и климатических возмущений (приливные волны, метеорологические факторы, магнитное поле и т.п.). Однако разумного механизма, способного в нужной фазе трансформировать эти возмущения в изменения временных параметров измерительной установки, пока не найдено.

Для обретения уверенности в том, что наблюдаемые вариации временного ряда значений τ имеют неслучайную природу и были проведены измерения на установке ТАУ-1. В данных ТАУ-1 обнаружены солнечно-суточная вариация с амплитудой $A_C=(17\pm 3)\cdot 10^{-4}$, лунно-суточная вариация с амплитудой $A_L=(8\pm 3)\cdot 10^{-4}$ и звёздно-суточная вариация с амплитудой $A_3=(11\pm 4)\cdot 10^{-4}$. Существенного улучшения статистической ошибки можно добиться путём многократного увеличения скорости набора данных. Однако для изотопа ^{214}Po при заметном увеличении скорости счёта сверх имеющейся путём увеличения активности будет происходить квадратичное увеличение доли случайных совпадений, составляющей $\sim 1\%$ при используемой скорости 12 с^{-1} . Это связано с большой суммарной активностью всего ряда дочерних изотопов ^{226}Ra и относительно большим периодом полураспада ^{214}Po ($\sim 163.5\text{ мкс}$). Поэтому увеличение скорости набора статистики для ^{214}Po без увеличения относительного вклада фона случайных совпадений можно достичь только увеличением числа независимых измерительных установок. Этот вариант представляется трудно осуществимым. Другая возможность может быть реализована с помощью пары радиоактивных изотопов, имеющих похожую схему распада, но существенно меньший период полураспада дочернего изотопа. В качестве такой пары хорошо подходят ^{213}Bi ($T_{1/2}=46\text{ мин.}$) \rightarrow ^{213}Po ($T_{1/2}=4.2\text{ мкс}$) [4], являющиеся дочерними продуктами в цепочки распадов ^{229}Th ($T_{1/2}=7340\text{ лет}$) из ряда распадов ^{237}Np [5]. В представляемой работе приводятся первые результаты работы установки с таким источником.

15 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Описание установки.

По конструкции установка ТАУ-3 с источником ^{229}Th аналогична установкам ТАУ-1 и ТАУ-2 [1]. Она состоит из сцинтилляционного детектора Д1, склеенного из двух дисков

пластмассового сцинтиллятора (ПС) $d=18$ мм, $h=1$ мм. Между дисками размещён источник ^{229}Th ($T_{1/2}=7340$ лет), являющийся материнским изотопом для ^{213}Po . Пробный препарат был изготовлен в Радиовом институте им. В.Г.Хлопина (г. Санкт-Петербург). Источник осаждён из раствора соли $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ на поверхность лавсановой плёнки $h=2.5$ мкм и накрыт такой же плёнкой, приклеенной по краю с помощью эпоксидной смолы. Сборка размещена на дне открытого с одного торца футляра из отражающей плёнки VM-2000. Футляр вставлен внутрь прямоугольного пенала $9\cdot23\cdot140$ мм из нержавеющей стали толщиной 0.5 мм. Открытый торец пенала присоединён к основанию цилиндра $d=44$ мм, $h=160$ мм из нержавеющей стали толщиной 2.5 мм. Внутри цилиндра находится быстрый фотоумножитель ФЭУ-87, который просматривает ПС. Сигнал с анодной нагрузки ФЭУ снимается через согласующую цепочку на кабель (50 Ом) и подаётся на первый вход регистратора. Детектор Д1 размещён в защите 15 см Pb в зазоре $h=10$ мм между двумя сцинтилляционными детекторами NaI(Tl) 150·150 мм (детектор Д2) в низкофоновом боксе подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900. Сигналы с анодов двух фотоумножителей детектора Д2 усиливаются зарядочувствительными предусилителями, суммируются и подаются на второй, запускающий, вход регистратора. Регистрирующая установка состоит из цифрового осциллографа (ЦОС) LA-n10-12 PCI, встроенного в ПК. ПК в “on-line” режиме регистрирует полную форму импульсов с Д1 и Д2. Частота оцифровки импульсов в ЦОС выбрана равной 100 МГц. Считывание и запись запускается импульсом в канале Д2. Длина кадра записи составляет 2048 временных каналов (10 нс/канал). Из них 256 аналов составляет «предыстория», 1792 каналов – «история». На рис.1 приведены схемы распадов изотопов ^{213}Bi (a) и ^{213}Po (b) [4]. Из рис.1a видно, что 66% β -распадов ^{213}Bi происходит на основной уровень, а 31% - на возбуждённый уровень с энергией 440 кэВ. Разрядка этого уровня сопровождается излучением γ -кванта (26% на распад). Изотоп ^{213}Po в 100% случаев распадается с испусканием α -частицы с энергией 8537 кэВ. Если установка регистрирует все три частицы от распада данной пары изотопов, образуется событие с тремя импульсами. В этом событии импульсы от γ -кванта и β -частицы совпадают мгновенно, а импульс от α -частицы с задержкой. На рис. 2 в качестве примера приведено одно из событий (кадров), записанных в память ПК с помощью ЦОС. Импульс на верхнем луче (1) представляет γ -квант, первая пачка импульсов на нижнем луче (2) соответствует β -частице, вторая – α -частице. Наличие тройных совпадений существенно снижает вклад фоновых событий от распада остальных изотопов в цепочке распадов ^{229}Th в полную скорость счёта установки. Активность ^{229}Th составила ~ 80 Бк. Наряду с основным изотопом в препарате присутствуют небольшие количества посторонних радиоактивных примесей. Скорость записи событий с запуском ЦОС от импульсов Д2 с амплитудами 380-

500 кэВ составила $\sim 27 \text{ с}^{-1}$. Скорость записи полезных событий с параметрами всех импульсов, соответствующими распаду ^{213}Po , составила $\sim 18 \text{ с}^{-1}$.

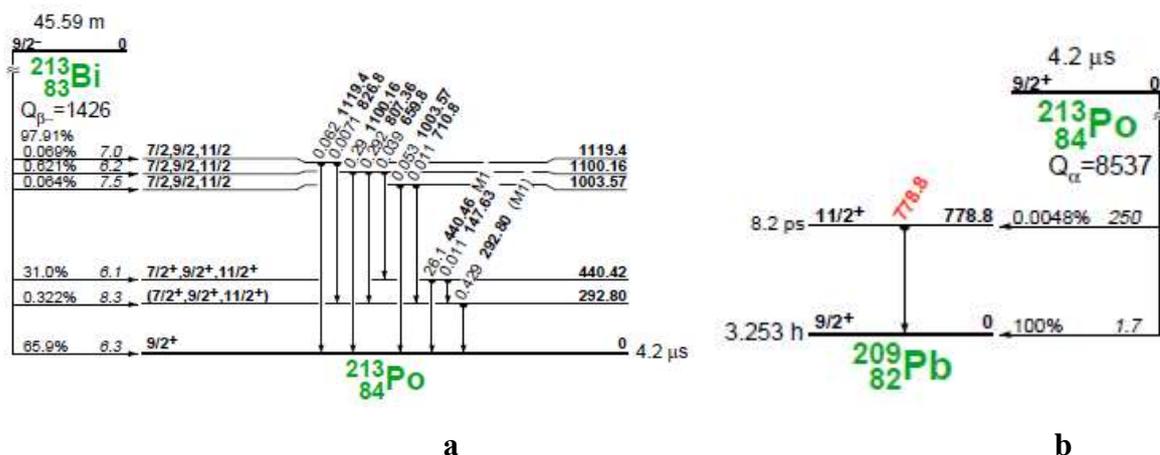


Рисунок 13 Схемы распада ^{213}Bi (a) и ^{213}Po (b).

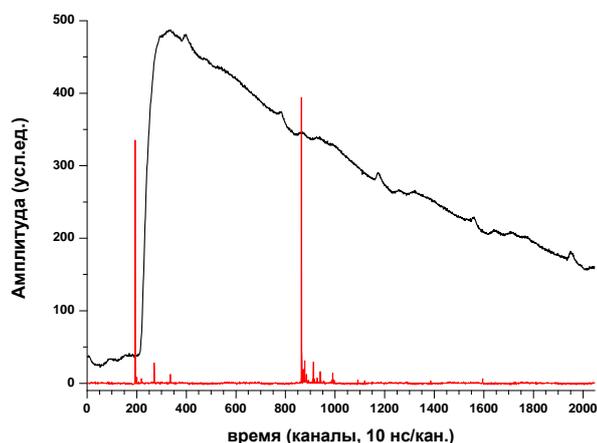


Рисунок 14 Пример события от распада пары ^{213}Bi - ^{213}Po , записанного с помощью ЦОС в память ПК. (1 - верхний луч) – импульс от детектора Д2 (γ -квант), (2 – нижний луч) – импульсы от β -частицы (старт) и α -частицы (стоп) в детекторе Д1.

Как видно из рис. 14 сигналы от β - и α -частиц представляют собой пачки коротких подимпульсов общей длительностью до $\sim 1 \text{ мкс}$, спадающих экспоненциально по частоте появления и амплитуде. При малых задержках между частицами пачки могут перекрываться, поэтому программа обработки должна учитывать соотношения амплитуд первого и последующих подимпульсов в пачке, чтобы однозначно выделять задержанные β - α совпадения.

В результате обработки записанных осциллограмм определяются задержки между импульсами в канале Д1 и за выбранный временной интервал выстраивается распадная

кривая дочернего изотопа ^{213}Po . По этой кривой определяется период полураспада τ . Строится последовательный временной ряд значений этой величины.

Результаты измерений.

Непрерывные измерения на установке ТАУ-3 начаты в июле 2015 года. Результаты обработки рядов данных разной длительности приведены ниже. На рис.15 приведена распадная кривая изотопа ^{213}Po , получившаяся за 127 суток.

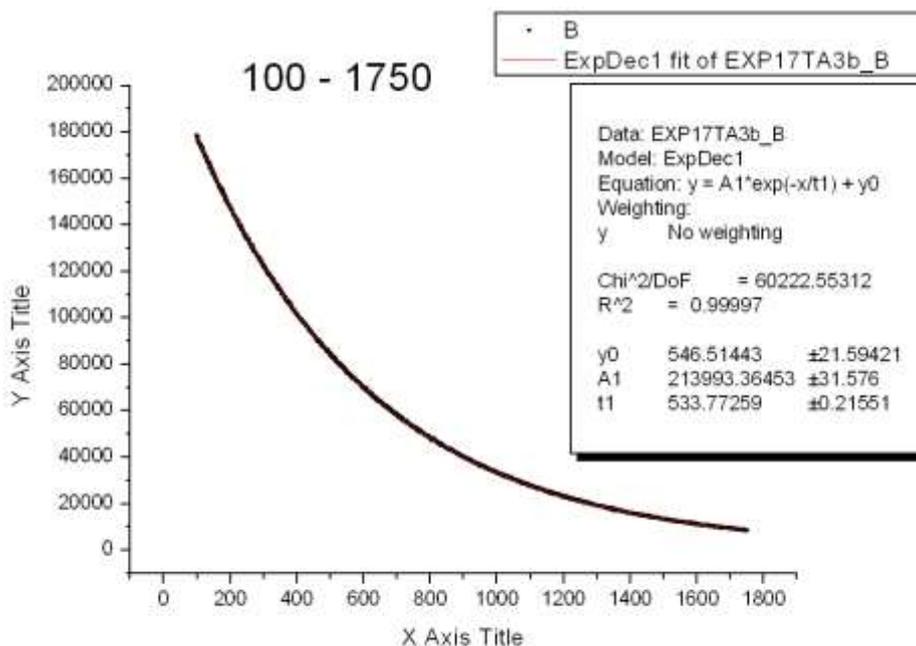


Рисунок 15 Распадная кривая ^{213}Po по данным установки ТАУ-3 за 127 суток (1 канал – 10 нс).

Величина τ определялась аппроксимацией распадной кривой функцией $F(t) = A \cdot \exp(-\ln(2) \cdot t / \tau) + b$ методом минимума χ^2 в интервале задержек 1.0-17.5 мкс. Было установлено, что величина τ равна $\tau = 3.699 \pm 0.002$ мкс (за 422 суток - 3.702 ± 0.001 мкс). Полученное значение на 11.9% ниже данного в справочниках [4,5].

Для поиска возможных периодических зависимостей был использован метод последовательного суммирования первичных данных, который можно назвать «методом **внутреннего** скользящего среднего». Суть данного метода заключается в том, что для поиска какой-либо гармоник в ряду данных выбирается интервал длительностью приблизительно 0.5 ожидаемого периода и для этого интервала определяется величина искомого параметра. Далее интервал сдвигается на 1 шаг и процедура повторяется.

Для поиска суточных вариаций периода полураспада ^{213}Po в солнечном, звездном и лунном времени длительность соответствующих суток разделялась на 24 часа. Длительность звёздных и лунных суток в стандартном солнечном времени составляет 23

часа 56 минут 4.09 с и 24 часа 50 мин. 28.2 с, соответственно. В качестве интервала осреднения был выбран промежуток времени 12 часов. Анализ событий производился следующим образом. Отбирались все события, зарегистрированные в интервале 0-12 часов за весь период работы, и определялся период полураспада. Далее интервал сдвигался на 1 час и процедура повторялась. Результаты поиска суточной вариации в солнечном времени приведены на рис.16. Здесь же приведён результат аппроксимации полученной суточной зависимости периода полураспада функцией $\tau(t)=\tau_0\cdot[1+A\cdot\sin(\omega\cdot(t+\varphi))]$, где τ_0 – средний период полураспада; $\omega = 2\pi/24 \text{ час}^{-1}$; $A = 4.7\cdot 10^{-4}$ – амплитуда; $\varphi = 1 \text{ час}$ – фазовый сдвиг начальной точки кривой относительно 0 часов.

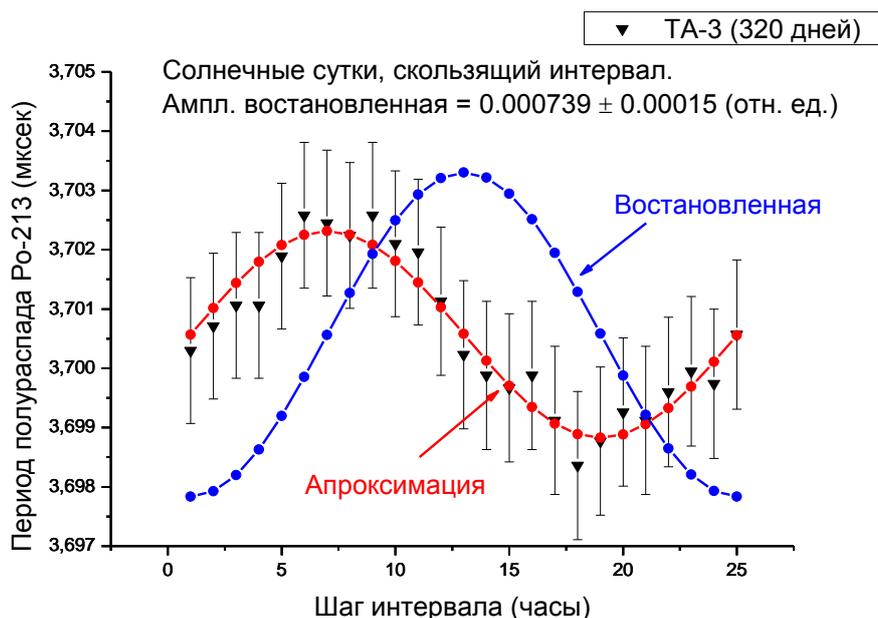


Рисунок 16 1) Зависимость периода полураспада ^{213}Po от времени солнечных суток, полученная методом скользящего среднего (треугольники) для ряда длиной 320 сут.

2) Аппроксимация функцией $\tau(t)=\tau_0\cdot[1+A\cdot\sin(\omega\cdot(t+\varphi))]$ (красные точки).

3) Восстановленная суточная волна (синие точки).

Как видно из рисунка зависимость от времени периода полураспада ^{213}Po достаточно хорошо описывается синусоидальной функцией. Найденный период равен 24 часам, относительная амплитуда равна 0.00047 периода полураспада. Легко показать, что исходная периодическая зависимость часовых данных имеет тот же период (24 час), амплитуду в $\pi/2$ раз больше и смещена на 0.5 скользящего интервала ($0.25\cdot 24 \text{ час.} = 6 \text{ час.}$). Полученная из этих данных исходная суточная периодическая зависимость в солнечном времени имеет амплитуду $A_C=(7.4\pm 1.5)\cdot 10^{-4}$.

На рис.17 приведены результаты поиска звездно-суточной вариации периода полураспада ^{213}Po .

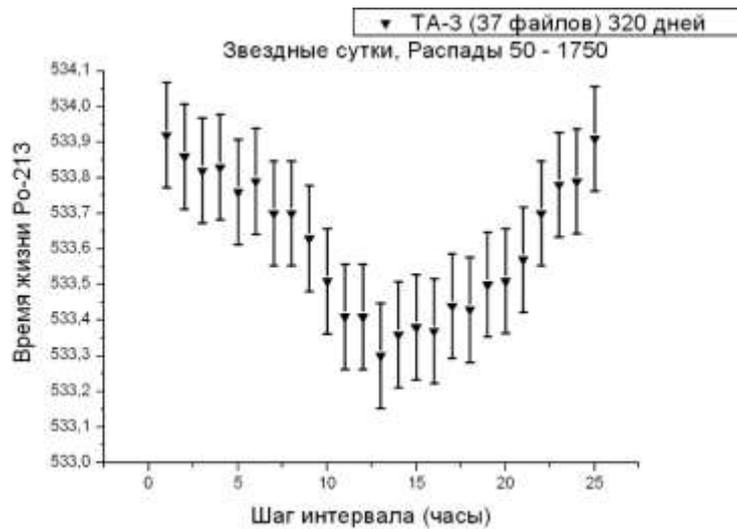


Рисунок 17 Зависимость периода полураспада ^{213}Po от времени звёздных суток, полученная методом скользящего среднего (треугольники). По оси «Y» отложены значения времени жизни t_0 в шкале временных каналов длительностью 10 нс. $\tau = t_0 \cdot \ln 2$.

Анализ восстановленной исходной зависимости, аналогичный анализу для солнечно-суточной волны, показывает, что в данных присутствует звездно-суточная волна с относительной амплитудой $A_3 = (5.0 \pm 1.2) \cdot 10^{-4}$. Фаза звёздно-суточной волны относительно 0 часов в солнечном времени зависит, как и в случае результатов для ^{214}Po [3], от положения на временной оси точки начала временного ряда значений τ , поскольку длительность звёздного цикла равна одному году.

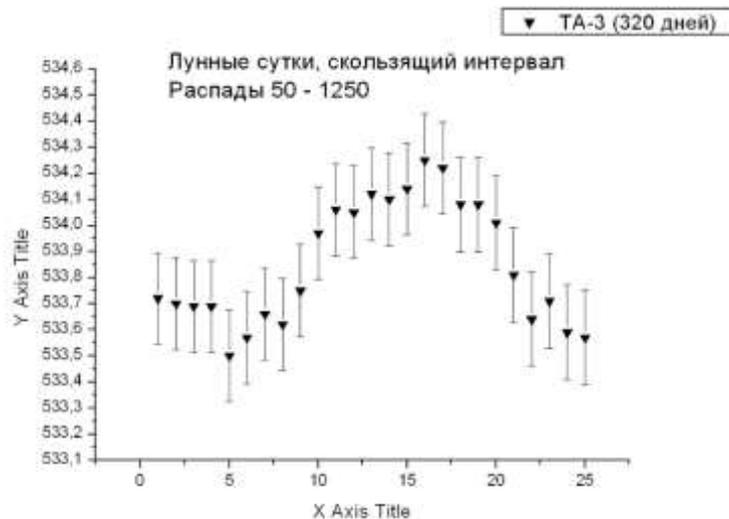


Рисунок 18 Зависимость периода полураспада ^{213}Po от времени лунных суток, полученная методом скользящего среднего (треугольники). По оси «Y» отложены значения времени жизни t_0 в шкале временных каналов длительностью 10 нс. $\tau = t_0 \cdot \ln 2$.

На рис. 18 приведены результаты поиска лунно-суточной вариации периода полураспада ^{213}Po . Анализ восстановленной исходной зависимости, аналогичный анализу для солнечно-суточной волны, показывает, что в данных присутствует лунно-суточная волна с относительной амплитудой $A_3=(5.7\pm 1.3)\cdot 10^{-4}$. Фаза лунно-суточной волны относительно 0 часов в солнечном времени зависит, как и в случае результатов для ^{214}Po [3], от положения на временной оси точки начала временного ряда значений τ , поскольку длительность цикла равна одному лунному месяцу (~ 28 дней).

На данном этапе измерений поиск возможных годовых вариаций не проводился из-за недостаточной длительности набора экспериментальных данных.

15 ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали представленные выше результаты мониторинга константы распада изотопа ^{213}Po , этот параметр испытывает солнечно-суточные, звёздно-суточные и лунно-суточные вариации с амплитудами $A_C=(7.4\pm 1.5)\cdot 10^{-4}$, $A_3=(5.0\pm 1.2)\cdot 10^{-4}$ и $A_L=(5.7\pm 1.3)\cdot 10^{-4}$ соответственно. Фаза суточно-суточной волн в установке ТАУ-3 отличается от значения такого параметра, полученного ранее на установке ТАУ-2. Возможно, что различие связано с тем, что фаза со временем «плывёт». На существование такого эффекта указывают результаты предварительного анализа данных установки ТАУ-2, где использован интервал длительностью 1 год, перемещаемый с шагом 2 месяца по полному набору данных длительностью 973 дня. Возможно, что солнечно-суточная волна является суперпозицией нескольких близких по длительности волн. Для выяснения этих вопросов необходимо продолжить набор статистики с источником ^{213}Po и выполнить совместный анализ данных со всех установок ТАУ-1, ТАУ-2 и ТАУ-3. Работа продолжается.

15 ПРИЛОЖЕНИЕ

В рамках описанного выше проекта разработан и создан прототип установки ТАУ-4 для исследования эффекта временных вариаций периода полураспада на альфа-активном изотопе ^{212}Po с минимальным среди природных изотопов периодом полураспада $T_{1/2}=0.3$ мкс. Она состоит из сцинтилляционного детектора Д1, склеенного из двух дисков пластмассового сцинтиллятора (ПС) $d=18$ мм, $h=1$ мм. Внутренняя поверхность каждого диска покрыта алюминированной пластиковой плёнкой толщиной 3.5 мкм, извлечённой из электро-конденсатора. Проводящие слои направлены друг к другу и разделены кольцевым изолятором толщиной 0.5 мм. К каждому слою на электрическом контакте присоединена медицинская игла с отверстием в боковой стенке, направленным в центральный зазор. Иглы вклеены в сборку на противоположных концах диаметра и направлены штуцерами в одну сторону. Они используются одновременно как электроды и трубки для подвода и отвода проточного газа. Сборка размещена на дне открытого с одного торца футляра из

отражающей плёнки VM-2000. Футляр вставлен внутрь прямоугольного пенала 9·23·140 мм из нержавеющей стали толщиной 0.5 мм. Иглы выведены наружу через закрытый торец пенала. Открытый торец пенала присоединён к основанию цилиндра d=44 мм, h=160 мм из нержавеющей стали толщиной 2.5 мм. Внутри цилиндра находится быстрый фотоумножитель ФЭУ-87 (или ФЭУ-85), который просматривает ПС. Сигнал с анодной нагрузки ФЭУ снимается через согласующую цепочку на кабель (50 Ом) и подаётся на вход цифрового осциллографа ЛА-n1USB с частотой оцифровки до 1 ГГц. Тестовые испытания проводились в наземном лабораторном помещении. Детектор Д1 размещался в защите 8 см Рв. Для генерации атомов ^{212}Po в рабочем зазоре Д1 использовался эффект образования заряженных ионов при α -распаде изотопа ^{220}Rn . Этот изотоп является дочерним продуктом в цепочке распада естественного долгоживущего изотопа ^{232}Th и материнским изотопом для конечной части этого ряда: $^{232}\text{Th}(T_{1/2}=1.4\cdot 10^{10} \text{ лет}, \alpha) \rightarrow ^{228}\text{Ra}(T_{1/2}=5.75 \text{ года}, \beta^-) \rightarrow ^{228}\text{Ac}(T_{1/2}=6.15 \text{ час}, \beta^-) \rightarrow ^{228}\text{Th}(T_{1/2}=1.91 \text{ года}, \alpha) \rightarrow ^{224}\text{Ra}(T_{1/2}=3.66 \text{ сут.}, \alpha) \rightarrow ^{220}\text{Rn}(T_{1/2}=55.6 \text{ с}, \alpha) \rightarrow ^{216}\text{Po}(T_{1/2}=0.145 \text{ с}, \alpha) \rightarrow ^{212}\text{Pb}(T_{1/2}=10.6 \text{ час}, \beta^-) \rightarrow ^{212}\text{Bi}(T_{1/2}=60.6 \text{ мин.}, 64.1\% \beta^-) \rightarrow ^{212}\text{Po}(T_{1/2}=2.96\cdot 10^{-7} \text{ с}, \alpha) \rightarrow ^{206}\text{Pb}_{\text{стаб.}}$. Если в качестве базового изотопа использовать относительно дешёвый и доступный ^{232}Th в виде соли $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$, его потребуется около 1 г для получения нужной активности ^{212}Po . Однако из компактного источника выход α -частиц будет очень маленький, а «тонкий» источник займёт неоправданно большую площадь. Поэтому и был рассмотрен вариант осаждения заряженных продуктов распада ^{220}Rn непосредственно в детекторе. Для этого раствор (~20 см³) 1 г соли $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ размещался в сосуде объёмом ~50 см³. Раствор барботировался потоком воздуха со скоростью ~20 см³/мин. Выходящий воздух поступал в сосуд объёмом ~1 л. В сосуде происходит распад ^{220}Rn до $^{212}\text{Pb}^+$. Накопленные ионы транспортируются потоком воздуха в рабочую камеру детектора и высаживаются на (-)-электрод при подаче на электроды напряжения 100 В. Было показано, что при указанных параметрах может быть достигнута активность ^{212}Po ~5 Бк. Была проверена возможность создания «сухого» генератора атомов ^{220}Rn путём нанесения ториевого покрытия на волокна фильтро-ткани Петрянова. Результат оказался отрицательным.

При построении распадных кривых было обнаружено, что на экспоненте присутствуют затухающие по амплитуде пики с периодом ~100 нс, осложняющие определение τ . Они были интерпретированы, как послеимпульсы фотоумножителя. Для уточнения их происхождения и устранения начата работа по замене вакуумного ФЭУ на твердотельный SiMP-фотоумножитель. Работа продолжается.

15 ИСТОЧНИКИ

1. . E.N. Alexeyev, V.V. Alekseenko, Ju.M. Gavriljuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, S.P. Yakimenko. “Experimental test of the time stability of the half-life of alpha-decay ^{214}Po nuclei” *Astroparticle Physics*, 46 (2013) 23-28.

2. 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

3. E.N. Alexeev, Yu.M. Gavriilyuk, 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. а) arXive 1505.01752 [nucl-ex] 7 May 2015, б) *Physics of Particles and Nuclei*, 47(6), (2016), 986-994

4. R.B. Firestone, “Table of Isotopes”, CD ROM Edition, Version 1.0, March, 1996.

5. Справочник под ред. И.К.Кикоина «Таблицы физических величин». М., Атомиздат, 1976.

15 ПУБЛИКАЦИИ

1. Е. Н. Алексеев, Ю. М. Гаврилюк, А. М. Гангапшев, А.М.Гежаев, В. В. Казалов, В. В. Кузьминов, С. И. Панасенко, С. С. Раткевич. « Наблюдение суточных и годовых вариаций периода полураспада ^{214}Po .» Доклад на Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий – 2016”. Дубна, 12-15 апреля 2016 г.

2. E. N. Alexeyev, Yu. M. Gavriilyuk, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenko, S. S. Ratkevich. “Results of a search for daily and annual variations of the ^{214}Po half-life at the two year observation period”. *Physics of Particles and Nuclei*, 47(6), (2016), 986-994 DOI 10.1134/S1063779616060034

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

Научный руководитель В.Б.Петков

Проводились работы по увеличению рабочей площади Мюонного Детектора (МД) ливневой установки “Ковер-2”. В 2016 году разрабатывались и изготавливались электронные блоки системы сбора данных, проводилась настройка электронных узлов сцинтилляционных счетчиков.

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

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

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

В 2016 году проведен предварительный анализ архивных данных установки “Ковер-2” с целью поиска диффузного гамма – излучения сверхвысоких энергий. Для выделения событий от первичных гамма-квантов была использована методика отбора обедненных мюонами ШАЛ. Предварительные ограничения на поток диффузного гамма – излучения с энергией первичных фотонов выше 930 ТэВ представлены на рис.19 вместе с результатами других экспериментов.

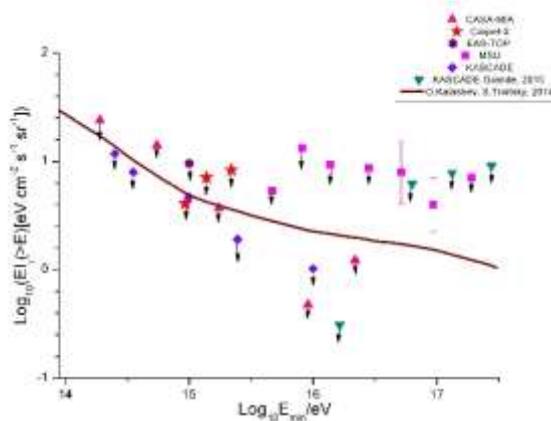


Рисунок 19.

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 2016 году (с 01.01.2016 по 30.11.2016) чистое время регистрации по данной задаче составило 7310 часов, и было зарегистрировано 43 нейтринных события. За весь период наблюдения живое время регистрации по нейтринной программе достигло 267654 часа (30.5 года), и было зарегистрировано 1612 нейтринных события.

Проведён поиск мюонных нейтрино/антинейтрино от гравитационного всплеска GW150914, который находился в поле зрения БПСТ. В момент всплеска (и в интервале ± 7 суток вокруг) нейтринных событий на БПСТ не было зарегистрировано. Получено ограничение на поток энергии в мюонных нейтрино/антинейтрино для диапазона энергий 1 – 100 ГэВ: 212.9 ГэВ/см². При более высоких энергиях ограничения были получены на нейтринных телескопах IceCube и Antares.

16 ПУБЛИКАЦИИ

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

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

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

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

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

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

7. D.D. Dzhappuev, V.B. Petkov, A.U. Kudzhaev, N.F. Klimenko, A.S. Lidvansky, S.V. Troitsky. Search for cosmic gamma rays with the Carpet-2 extensive air shower array. Proceedings of the International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2015, pp. 35-41, Publishing house “Sneg”, Pyatigorsk, 2016.

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

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

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

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

17 Межзвёздная и межгалактическая среда: активные и протяжённые объекты

Научный руководитель Вячеслав Иванович Докучаев

Исполнитель Ю.Н.Ерошенко

17 Реферат

КОСМОЛОГИЯ, ПЕРВИЧНАЯ ЧЁРНАЯ ДЫРА, ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ, ЧЁРНАЯ ДЫРА, АННИГИЛЯЦИЯ, ГАММА-АСТРОНОМИЯ

Сделан анализ перспективного метода измерения массы тёмной материи вокруг сверхмассивной чёрной дыры в центре Галактики из наблюдений прецессии орбит звёзд совместно с ограничениями на гамма-излучение из центральной области Галактики в предположении, что тёмная материя состоит из аннигилирующих частиц. Найдено новое аналитическое выражение для угла прецессии звёзд.

17 ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов, который может прояснить механизмы образования сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик и природу тёмной материи (скрытой массы) является изучение прецессии звёзд, обусловленная наличием распределенной тёмной материи вокруг центральной сверхмассивной чёрной дыры в центре Галактики совместно с исследованием аннигиляция тёмной материи вокруг центральной чёрной дыры. Уже измерен более, чем один орбитальный период звёзд вокруг центральной чёрной дыры, и в ближайшие годы по характеру прецессии можно будет найти количество скрытой массы и её распределение.

17 РЕЗУЛЬТАТЫ (ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)

Выполнен анализ перспективного метода измерения массы темной материи (скрытой массы) вблизи сверхмассивной черной дыры в центре Галактики на основе наблюдений нерелятивистской прецессии орбит S0 звезд совместно с ограничениями на аннигиляционный сигнал от аннигиляции частиц темной материи. Выведено новое аналитическое выражение для угла прецессии в предположении степенного профиля плотности темной материи вокруг черной дыры. Существующие телескопы уже в ближайшие годы смогут измерить или получить сильное ограничение на прецессию орбит S0 звезд. Найдена масса темной материи, требуемая для объяснения наблюдаемого (в ряде работ) избытка гамма-излучения при аннигиляции частиц темной материи с учетом модификации сечения аннигиляции эффектом Зоммерфельда, см. рис. 20.

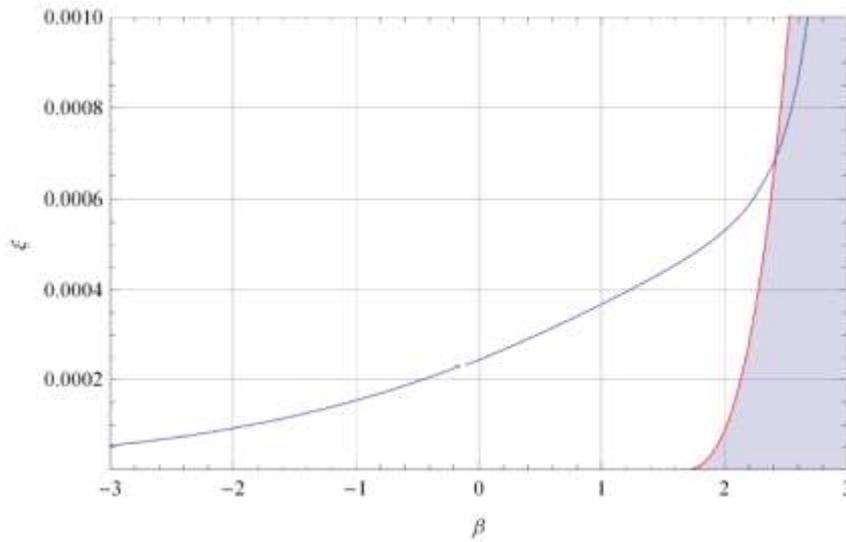


Рисунок 20 Массовая доля темной материи ξ в зависимости от показателя степени β в профиле плотности при угле прецессии $\delta\varphi=0.01$. Заштрихована область, исключаемая ограничениями по аннигиляции темной материи.

17 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование кинематики частиц темной материи вокруг первичных черных дыр малых масс, а также вокруг сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик позволяет найти ожидаемый профиль плотности пиков темной материи и массу в пределах того или иного радиуса. В этих пиках плотности должна происходить аннигиляция частиц темной материи, поэтому данный эффект может представлять большой интерес для экспериментов по непрямой регистрации частиц темной материи посредством регистрации их продуктов аннигиляции (гамма-излучения и потоков заряженных частиц).

17 ПУБЛИКАЦИИ

Ю.Н. Ерошенко // Пики плотности темной материи вокруг первичных черных дыр. - 2016. - Письма в Астрон. ж. - Т. 42. - С. 389-398.

V.I. Dokuchaev, Yu N. Eroshenko // Dark matter distribution and annihilation at the Galactic center. - 2016. - J. Phys. Conf. Ser. - V. 675. - P. 012004.

V.I. Dokuchaev, Yu N. Eroshenko // Precession of stars in the Galactic center and dark matter annihilation limits. - 2016. - Proceedings of the Twelfth Asia-Pacific International Conference on Gravitation, Astrophysics, and Cosmology, Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. - P. 142-146. - doi: 10.1142/9789814759816_0020.

Доклады на конференциях:

Ерошенко Ю.Н. // Аннигиляция темной материи в пиках плотности вокруг первичных черных дыр. - 2016. - XXXIII конференция "АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ", Пушинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушино, 19 – 22 апреля 2016 г.

Eroshenko Yu. N. // Annihilation of dark matter in the density spikes around primordial black holes. - 2016. - DAWN – 2016. Dark Ages and White Nights (Spectroscopy of the CMB), 20- 24 June 2016 Saint Petersburg.

17 Список использованных источников

[1] Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков // Гипотеза задержавшихся в расширении ядер и горячая космологическая модель. - 1966. - Астрон. журн. - Т. 43. - С. 758-760.

[2] S. Hawking // Gravitationally collapsed objects of very low mass. - 1971. - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - V. 15. - P. 75-78.

[3] R. Saito and S. Shirai // Primordial black hole as a source of the boost factor. - 2011. - Physics Letters B. - V. 697. - P. 95.

[4] Z. Dong // Impact of primordial ultracompact minihaloes on the intergalactic medium and first structure formation. - 2011. - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - V. 418. - P. 1850.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершена модернизация системы медленного контроля параметров температуры и вакуума установки «Троицк ню-масс». Запущена электронная пушка до 20 кэВ с разбросом энергий менее 0.5 В. Завершены измерения рассеяния электронов с энергией до 20 кэВ на изотопах водорода.

Проведена модернизация и замена устаревшего оборудования стартового детектора T0 времяпролётной системы ALICE и системы диагностики пучков для работы при максимальной энергии и интенсивности пучков LHC. Проанализированы экспериментальные данные 2015 года (p-p столкновения при энергии 13 ТэВ и Pb-Pb при энергии 5.1 ТэВ). Проведено моделирование определения центральности и плоскости реакции в эксперименте ALICE. Осуществлена подготовка детектора T0 и его техническое обслуживание во время экспериментальных сеансах 2016 года на установке ALICE. Получены новые более точные экспериментальные данные по быстротным распределениям частиц, в частности, для вылетающих вперёд частиц с помощью переднего детектора T0.

Проведена сборка и тестирование модулей электромагнитного калориметра установки NADES. Получены новые экспериментальные данные для реакции Ar +Sc при 5 энергиях ядер аргона в диапазоне 13-150 АГэВ. Проведена модернизация существующей считывающей электроники адронного калориметра на новую электронику DRS4.

На подземном детекторе ОГРАН проведена замена ординарных зеркал используемых Фабри-Перо интерферометров на высокотехнологичные. Достигнут проектный уровень откачки (вакуумирования) за счёт применения криоабсорбционных насосов в режиме долговременного цикла. Выполнены калибровочные тесты и контрольные измерения остаточных шумов. Разработана и внедрена прецизионная система поддержания стабильного температурного режима. Выполнена пробная серия наблюдений совместно с БПСТ БНО с отработкой алгоритмов анализа данных в моде мультисканальной регистрации совпадающих возмущений.

Завершён монтаж установки фазы 2 эксперимента и начата экспозиция эксперимента GERDA по поиску безнейтринного двойного бета распада Ge-76. В окончательном варианте в криостате из жидкого аргона установлены 40 германиевых детекторов, обогащённых по изотопу Ge-76. Установлены 30 новых BAG детекторов, 7 модернизированных коаксиальных детекторов, использованных в фазе 1 эксперимента и 3 германиевых детектора из германия с природным изотопным составом для контроля фона. Детекторы распределены на 7 отдельных стрингов. Каждый стринг окружён тонкой нейлоновой плёнкой для защиты от попадания на детекторы ионов Ca-42, образующихся от

распада Ag-42. Начата экспозиция фазы 2 эксперимента по поиску безнейтринного двойного распада Ge-76 с непрерывной обработкой поступающих данных.

Проведена обработка данных калибровочных измерений широкоугольных оптических станций эксперимента Тунка (TAIGA-HiSCORE). Проведены калибровочные измерения с оптическими станциями эксперимента Тунка (TAIGA-HiSCORE), установленных в конце 2015 г. Разработана калибровочная система первого узкоугольного атмосферного черенковского телескопа TAIGA-IACT. Разработаны и созданы один из двух измерительных стендов для исследования параметров фотоумножителей для оптических станций и камер изображения эксперимента Тунка/TAIGA. Создан совместно с университетом г.Тюбинген макетный образец камеры изображения на базе кремниевого фотоумножителя узкоугольного гамма-телескопа с 16-ю пикселями (4x4) и выполнено его тестирование.

Завершена работа над созданием детектора NEWCHOD, он смонтирован на каонном канале и запущен в работу. Новый годоскоп позволит проводить набор статистики с максимальной интенсивностью пучка. Завершено создание прототипа магнитного нейтринного детектора BABY-MIND,

Измерены параметры осцилляций мюонных антинейтрино в электронные антинейтрино. Это - первый результат, характеризующий появления электронных антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино. Сравнение параметров осцилляций нейтрино и антинейтрино является важным тестом фундаментальных дискретных симметрий, включая CPT симметрию.

Проведён поиск правого WR бозона и стерильного нейтрино при энергии сталкивающихся протонов 13 ТэВ. Проведено компьютерное моделирование фона, сигнала и отклика детектора при полной энергии 13 TeV. Обработаны экспериментальные данные 2015 и 2016 годов. Изучены pile-up эффекты для адронного калориметра детектора КМС при полной энергии 13 ТэВ. Разработаны новые алгоритмы учёта pile-up эффектов. Набрана статистика и обработаны первые экспериментальные данные с энергией 13 ТэВ для сигнатуры с двумя изолированными лептонами и двумя адронными ливнями, используемой для поиска правого WR бозона и стерильного нейтрино.

После модернизации и выхода на полный режим ускорителя БАК произведён набор статистики на повышенной энергии 13 ТэВ и светимости. Получены первые данные о сечениях рождения состояний с тяжёлыми кварками. Улучшена точность измерения параметров в В- и D-секторах за пределами возможностей В-фабрик. Набрана интегральная светимость 2/fb.

Теоретически исследованы возможные варианты распределения тёмной материи в центре Галактики. Найдены ограничения на полную массу тёмной материи в центре Галактики с использованием данных измерения ньютоновской прецессии орбит быстрых S0 звезд в гравитационном поле сверхмассивной чёрной дыры Sgr A*. Вычислены аннигиляционные сигналы от частиц тёмной материи в виде суперсимметричных нейтралитонов и сопоставлены с данными гамма-телескопов.

Проведён поиск редких событий из накопленного материала 2008 – 2014 г. эмульсионно-трекового детектора OPERA и на детекторах АНС и LVD. Определены параметры редких событий, зарегистрированных в веществе детектора OPERA. Установлено новое, более сильное ограничение на частоту вспышек Сверхновых в Галактике.

Произведена сборка, настройка и калибровка электроники 119 сцинтилляционных счётчиков Мюонного детектора установки «Ковёр-2». Расчёт эффективности регистрации ливней от первичных гамма – квантов на установке «Ковёр-2». Обработка и анализ экспериментальных данных установки «Ковёр-2» по задаче поиска диффузного гамма-излучения. Продолжен набор экспериментальных данных на БПСТ по программе регистрации мюонных нейтрино. Произведён поиск нейтринного сигнала от центра Галактики и других потенциальных астрофизических источников нейтрино.

Исследована возможность создания искусственных источников нейтрино на основе Zn65. Продолжена разработка проектов BEST, BEST-2.

Проведён набор статистики с изотопом ^{213}Po ($T_{1/2}=3.7$ мкс.) за ~500 суток. Обработаны результаты и получены данные о величине амплитуды солнечной, лунной и звёздной суточных и годовых компонент вариации периода полураспада изотопа ^{213}Po . Исследована возможность создания экспериментальной установки для исследования эффекта временных вариаций периода полураспада на альфа-активном изотопе ^{212}Po с минимальным среди известных периодом полураспада $T_{1/2}=0.3$ мкс. Создана экспериментальная установка для проведения долговременных измерений периода полураспада ядра ^{213}Po .

Введён в эксплуатацию на оз. Байкал в режиме долговременного набора данных модуль нейтринного телескопа с эффективным объёмом в 0.04 куб.км для регистрации нейтрино астрофизической природы.

Исследование кинематики частиц темной материи вокруг первичных черных дыр малых масс, а также вокруг сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик позволяет найти ожидаемый профиль плотности пиков темной матери и массу в пределах того или иного радиуса. В этих пиках плотности должна происходить аннигиляция частиц темной материи,

поэтому данный эффект может представлять большой интерес для экспериментов по не прямой регистрации частиц темной материи посредством регистрации их продуктов аннигиляции (гамма-излучения и потоков заряженных частиц).

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