Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований Российской академии наук

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио директора ИЯИ РАН Л.В.Кравчук

29 января 2015 года

ОТЧЁТ

о научно-исследовательской работе за 2014 год

ГРНТИ 29.05 Физика элементарных частиц. Теория полей. Физика высоких энергий; 29.15 Ядерная физика; УДК 539.1; 539.12; 539.123

Москва

Список исполнителей

Отдел теоретической физики (заведующий отделом д.ф.-м.н. Н.В.Красников)

Отдел ускорительного комплекса (заведующий отделом д.ф.-м.н. А.В.Фещенко)

Отдел экспериментальной физики (заведующий отделом чл.-корр. РАН И.И.Ткачёв)

Лаборатория исследования редких процессов (заведующий лабораторией к.ф.-м.н. Н.А.Титов)

Лаборатория релятивистской ядерной физики (заведующий лабораторией заслуженный деятель науки А.Б.Курепин)

Лаборатория радиоизотопного комплекса (заведующий лабораторией д.х.н. Б.Л.Жуйков)

Отдел физики высоких энергий (заведующий отделом проф. Ю.Г.Куденко)

Лаборатория моделирования физических процессов при высоких энергиях (и.о. заведующего лабораторией д.ф.-м.н. Н.В.Красников)

Лаборатория физики элементарных частиц (и.о. заведующего лабораторией проф. Ю.Г.Куденко)

Лаборатория физики электрослабых взаимодействий (и.о. заведующего лабораторией проф. Ю.Г.Куденко)

Лаборатория новых методов детектирования нейтрино и других элементарных частиц (заведующий лабораторией к.ф.-м.н. И.М.Железных)

Отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики (заведующая отделом чл.-корр. РАН О.Г.Ряжская)

Лаборатория нейтринной астрофизики (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. Р.А.Мухамедшин)

Лаборатория лептонов высоких энергий (заведующий лабораторией к.ф.-м.н. А.С.Лидванский)

Лаборатория электронных методов детектирования нейтрино (и.о. заведующей лабораторией чл.-корр. РАН О.Г.Ряжская)

Лаборатория радиохимических методов детектирования нейтрино (заведующий лабораторией чл.-корр. РАН В.Н.Гаврин)

Баксанская нейтринная обсерватория (заведующий отделом д.ф.-м.н. В.В.Кузьминов)

Лаборатория подземного сцинтилляционного телескопа (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. В.Б.Петков)

Лаборатория галлий-германиевого нейтринного телескопа (и.о. заведующего лабораторией чл.-корр. РАН В.Н.Гаврин)

Лаборатория низкофоновых исследований (заведующий лабораторией к.ф.-м.н. А.М.Гангапшев)

Лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий (заведующий лабораторией чл.-корр. РАН Г.В.Домогацкий)

Лаборатория фотоядерных реакций (заведующий лабораторией проф. В.Г.Недорезов)

Лаборатория атомного ядра (заведующий лабораторией к.ф.-м.н. Е.С.Конобеевский)

Лаборатория нейтронных исследований (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. Э.А.Коптелов)

Лаборатория медицинской физики (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. С.В.Акулиничев)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 515 с., 162 рис., 20 табл.

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЁЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА, КВАРК-ГЛЮОННАЯ МАТЕРИЯ, ЯДРО-ЯДЕРНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭНЕРГИИ, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, СПЕКТР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, МЕТОДЫ НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР, РАДИОИЗОТОПЫ

В отчёте представлены результаты 126 фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2014 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

На основании анализа данных Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ200 за 5 лет наблюдений установлены ограничения на потоки нейтрино солнечного происхождения от предполагаемого источника аннигиляции реликтовых частиц тёмной материи и на вероятность их рассеяния в Солнце.

В результате поиска анизотропии направлений прихода космических лучей с энергиями выше 57 ЭэВ по данным 5 лет наблюдения обсерватории Telescope Array с участием ИЯИ РАН обнаружена область на небесной сфере радиусом 20 градусов, в которую попадает 19 из всех известных 72 событий.

В международном эксперименте OPERA (Гран Сассо, Италия), с участием российских учёных ИЯИ РАН, обнаружено четвёртое событие-кандидат на появление тау нейтрино в пучке мюонных нейтрино, направляемом из ЦЕРНа.

На основе анализа большой выборки источников гамма-квантов показано, что труднообъяснимых особенностей восстановленных спектров этих источников можно избежать, предположив аномально высокую прозрачность Вселенной для гамма-излучения высоких энергий.

Впервые дано объяснение ядерного глория эффекта, или эффекта обратной фокусировки, обнаруженного экспериментально в ОИЯИ (Дубна) и ИТЭФ (Москва) в 70-е и 80-е годы, и состоящего в увеличении дифференциального сечения рождения кумулятивных частиц вблизи направления строго назад. Объяснение дано аналитически в рамках механизма многократных взаимодействий. Предсказан такой же эффект для кумулятивных гиперонов, каонов и других частиц.

В нейтринном эксперименте с длинной базой T2K с участием ИЯИ РАН впервые получено ограничение на величину CP нечётной дираковской фазы.

Впервые доказано, что сформулированное ранее соотношение между квантовыми поправками в суперсимметричных теориях справедливо во всех порядках теории возмущений при использовании конкретного перенормировочного предписания.

Сотрудники эксперимента CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе с участием ИЯИ РАН на основе данных 2012 года с полной интегральной светимостью 19.7Фб$^{-1}$ получили рекордные ограничения на параметры моделей, в частности, масса правого W бозона исключена вплоть до 3 ТэВ для массы тяжёлого нейтрино равной половине массы правого W-бозона. Получены также рекордные ограничения на массы суперсимметричных частиц на основе обработки экспериментальных данных CMS эксперимента 2012 года с полной энергией 8 ТэВ и интегральной светимостью 20 Фб$^{-1}$.

На установке ALICE, ЦЕРН, проведены работы по подготовке детектора T0, созданного в основном сотрудниками ИЯИ, к физическим сеансам 2015-2017 гг. Основные параметры детектора T0 будут соответствовать новым требованиям проведения измерений по исследованию кварк-глюонной материи на пучках Большого адронного коллайдера ЦЕРН, после реконструкции коллайдера в 2013-2014 гг., которые заключаются в модернизации триггерной системы, системы управления и контроля, системы сбора данных и необходимости работать с интервалами 50 нс и 25 нс между сгустками пучка.

В 2014 году завершена первая фаза эксперимента по поиску безнейтринного двойного бета-распада с помощью германиевых детекторов, обогащённых по изотопу ^{76}Ge, помещённых в пассивную защиту из жидкого аргона, очищенного от радиоактивных примесей до высокой степени чистоты, проект GERDA. Получен верхний предел для периода искомого полураспада $2.1\cdot10^{25}$ лет на уровне достоверности 90%. Результат является наилучшим по сравнению с другим современными экспериментами по поиску двойного безнейтринного бета распада. Полученное значение не подтверждает стоящий на повестке дня в течение 10 лет интригующий результат группы Клапдора, сообщившей о наблюдении этого распада с периодом полураспада $1.2\cdot10^{25}$ лет.

С участием ИЯИ РАН с помощью детектора LVD получена экспериментальная величина выхода нейтронов $N=(16\pm4)\times10^{-4}$ $n/\mu/(г\cdot см^{-2})$, генерированных мюонами космических лучей в железе, дополнительно установленном внутрь структуры установки.

На уникальном сильноточном линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН проведено пять сеансов, направленных на разработку технологии получения радиоизотопов, наладку нейтронного комплекса, на исследования и модернизацию ускорительного комплекса. Общая

продолжительность сеансов в 2014 году составила 1812 часов. Наработка ускорителя составила свыше 90000 мкА·часов при среднем токе пучка до 120 мкА и энергии 143 МэВ.

По данным работы нейтринных телескопов ИЯИ РАН: АСД (Артёмовской научной станции) и российско-итальянской установки LVD (Гран Сассо, Италия) в течение 37 лет (1977 - 2014) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.07 года на 90% уровне достоверности.

В результате международного эксперимента, выполненного коллаборацией A2 на пучке поляризованных фотонов от ускорителя MAMI с использованием поляризованной протонной мишени, созданной учёными ОИЯИ и ИЯИ РАН, впервые определены все четыре спиновые поляризуемости протона, которые описывают воздействие внешнего электромагнитного поля на спиновую структуру протона. Определение этих фундаментальных структурных констант дает новую фундаментальную информацию о строении ядерной материи на уровне нуклонных степеней свободы.

Завершена обработка данных, полученных в двух сеансах измерений на внутреннем пучке Нуклотрона (ОИЯИ) по исследованию аномальной зависимости от энергии выхода пи-мезонов с использованием пробежного телескопа. В результате анализа данных по времени пролёта и по потерям энергии выполнена идентификация пионов и протонов. Измерено отношение выходов пионов к протонам.

Создан прецизионный магнитный соленоид для позитронного накопителя установки AEGIS (CERN), предназначенной для измерения ускорения свободного падения атомов антиводорода в поле Земли - проверки принципа эквивалентности материи и антиматерии. В текущем году соленоид был запущен в эксплуатацию для проведения первых тестовых измерений и установлен в накопитель позитронов. Достигнута требуемая величина неоднородности магнитного поля – не более 0.1 %, и была получена рекордная интенсивность накопленных позитронов, близкая к проектной величине.

В эксперименте по изучению вариаций космических лучей во время гроз на Баксанской нейтринной обсерватории получено прямое доказательства существования нового типа медленного пробоя в атмосфере. В отличие от коротких и ярких высотных разрядов типа спрайтов и джетов новый тип разряда имеет длительность несколько минут или даже десятков минут. Разряд предположительно создается убегающими электронами в припороговом режиме. Однако, в отличие от пробоя на убегающих электронах он является аналогом не искрового разряда, а тлеющего или коронного (обладает признаками обоих).

Учёными ИЯИ РАН разработан и изготовлен передний адронный калориметр, который является важнейшей детекторной системой в эксперименте NA61 (CERN) по поиску

критической точки фазового перехода из состояния обычной ядерной материи в состояние кварк-глюонной плазмы. В текущем году успешно выполнена модернизация аналоговой электроники считывания, системы температурной стабилизации и системы управления и контроля этого калориметра. Калориметр полностью подготовлен к физическому сеансу на пучке ядер аргона, который состоится в начале 2015г.

В области разработки и внедрения элементов и узлов ускорительной техники в 2014 году выполнены работы по проектам:

Разработка оборудования диагностики пучка для ЛУ-20 и HILAC комплекса NICA ОИЯИ;

Разработка, изготовление, поставка и наладка двух измерителей формы сгустков (BSM) для линейного ускорителя Лос-Аламосского центра LANSCE;

Разработка, изготовление, лабораторные испытания, поставка и наладка измерителя продольного распределения заряда в сгустках для канала транспортировки из ускорителя Linac-4 в бустер (ЦЕРН, Швейцария);

Оптимизация, разработка и исследование ускоряющих структур и схем фокусировки участков нормально проводящего сильноточного линейного Ускорителя (ЛУ) отрицательных ионов водорода в диапазоне энергий от 18 МэВ до 400 МэВ для проекта ОМЕГА (ФБГУ ГНЦ ИФВЭ);

Разработка технического проекта модернизации источника ионов водорода в каскаде ускорителей ЛУ-30 и У-1.5 (ФБГУ ГНЦ ИФВЭ);

Исследование и разработка систем резонатора фотоинжектора для формирования сгустков электронов сверхвысокой яркости (STFC, Великобритания).

Совместно с РНЦ РХТ (С-Петербург) проведены работы по изучению выхода рубидия-82 из генератора 82Sr/82Rb с исходной активностью 160 мКи в разных режимах медицинской эксплуатации. В результате, достигнуты рекордные характеристики генератора и продемонстрирована возможность эффективной ПЭТ-диагностики в течении длительного времени (78 дн.) не только кардиологических, но и ряда онкологических заболеваний.

Совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова разработана методика получения медицинских терапевтических α-активных радионуклидов актиния-225 и одновременно - радия-223, включающая облучение металлической ториевой мишени на ускорителе ИЯИ РАН протонами средних энергий и радиохимическое выделение актиния и радия с помощью экстракционной хроматографии.

Получен патент на способ наработки радиоизотопов для целей ядерной медицины (совместно с ФИАН им.П.Н. Лебедева). Экспериментально показано (совместно с НИИЯФ МГУ им.Ломоносова), что на ускорителях электронов с энергией 55 МэВ и средним током пучка ~ 40 мкА. в результате облучения мишени из NaOH толщиной 10 г/см2 в течение времени ~ 5.5 час возможно получение радиоизотопа фтора-18 в водном растворе с полной активностью ~ (40÷60) мКи и удельной активностью ~ (2÷3) мКи/мл.

Содержание

Реферат 4
Введение 10
Основные результаты
1 Отдел теоретической физики 11
2 Отдел ускорительного комплекса 33
Отдел экспериментальной физики
3 Лаборатория исследования редких процессов 43
4 Лаборатория релятивистской ядерной физики 84
5 Лаборатория радиоизотопного комплекса 173
Отдел физики высоких энергий
6 Лаборатория моделирования физических процессов при высоких энергиях 199
7 Лаборатория физики элементарных частиц 232
8 Лаборатория физики электрослабых взаимодействий 235
9 Лаборатория новых методов детектирования нейтрино и других элементарных частиц 246
Отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики
10 Лаборатория нейтринной астрофизики 262
11 Лаборатория лептонов высоких энергий 287
12 Лаборатория электронных методов детектирования нейтрино 301
13 Лаборатория радиохимических методов детектирования нейтрино и Лаборатория галлий-германиевого нейтринного телескопа БНО 332
Баксанская нейтринная обсерватория
14 Лаборатория подземного сцинтилляционного телескопа 342
15 Лаборатория низкофоновых исследований 352
16 Лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий 379
17 Лаборатория фотоядерных реакций 391
18 Лаборатория атомного ядра 406
19 Лаборатория нейтронных исследований 446
20 Лаборатория медицинской физики 480
Заключение 488

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

з.д.н. - заслуженный деятель науки Российской Федерации

КХД - квантовая хромодинамика - современная теория сильных взаимодействий

ЛПСМ - лево-правосимметричная модель

СМ - Стандартная модель — теоретическая схема, используемая в настоящее время для расчётов вероятностей рождения различных частиц (в том числе бозона Хиггса и топ-кварка) на коллайдере LHC; хорошо проверена экспериментально

ЦЕРН (CERN) - Европейский центр ядерных исследований

БАК (LHC) - Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider)

CMS - Compact Muon Solenoid – Компактный мюонный соленоид, экспериментальная установка для изучения процессов взаимодействия адронов высокой энергии на LHC

ALICE - A Large Ion Collider Experiment на ускорителе БАК в ЦЕРН

HADES - High Acceptance DiElectron Spectrometer

NA61 (SHINE) - SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment на ускорителе SPS в ЦЕРН

ZDC - Zero Degree Calorimeter

SPS - ускоритель частиц в Швейцарии (ЦЕРН)

MPD - Multi - Purpose Detector

NICA - Nuclotron-based Ion Collider fAcility в ОИЯИ, Дубна

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

CPT-нарушение - нарушение фундаментальной симметрия физических законов при преобразованиях, включающих одновременную инверсию заряда, чётности и времени

Фм – единица длины в ядерной физике (1ферми = 10^{-15} метра)

Введение

В настоящее время ядерная физика активно развивается, как в традиционных направлениях, так и в новых доступных областях энергии взаимодействующих частиц, в областях исследования новых состояний вещества. ИЯИ РАН проводит фундаментальные и прикладные исследования в следующих направлениях:

физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология;

нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино;

разработка и создание нейтринных телескопов в низкофоновых подземных лабораториях и глубоко под водой для исследования природных потоков нейтрино и других элементарных частиц;

физика атомного ядра, динамика ядерных и фотоядерных реакций, физика радионуклидов и тяжёлых ионов;

нейтронная физика, технология интенсивных источников нейтронов, исследование конденсированных сред, радиационное материаловедение;

физика и техника сильноточных ускорителей на средние и промежуточные энергии;

прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Эти направления отражают тесную связь свойств материи на очень малых расстояниях физики элементарных частиц с физикой масштабов Вселенной, астрофизикой, известное взаимодействие фундаментальных исследований с прикладными, в том числе, гуманистическими проектами.

Эти направления полностью соответствуют утверждённой Правительством Российской Федерации Программе фундаментальных исследований академий наук на 2013 – 2020 годы, раздел «Физические науки», п.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.

1 Отдел теоретической физики

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Руководитель работ д.ф.-м.н. Н.В.Красников.

Исследования в области космологии и астрофизики. Руководитель работ ак. В.А.Рубаков.

Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели. Руководитель работ д.ф.-м.н. А.Л.Катаев.

Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели. Руководитель работ д.ф.-м.н. Д.С.Горбунов.

Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей. Руководитель работ д.ф.-м.н. С.В.Троицкий.

Теории фундаментальных взаимодействий вне стандартной модели, физика частиц и космология". Руководители работ ак. В.А.Рубаков, чл.-корр. РАН В.А.Кузьмин, чл.-корр. РАН И.И.Ткачёв.

Теоретические исследования новой физики за пределами Стандартной Модели. Руководитель работ ак. В.А.Матвеев.

Экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных свойств и структуры материи на ТэВ-ном масштабе в эксперименте CMS на LHC. Руководитель работ д.ф.-м.н. Н.В.Красников.

Исследования проблем квантовой хромодинамики и свойств элементарных частиц при высоких энергиях. Руководитель работ д.ф.-м.н. Н.В.Красников.

Теоретические исследования модифицированной гравитации, свойств «тёплой» тёмной материи и поиск частиц – кандидатов в тёмную материю. Руководитель работ чл.-корр. РАН И.И.Ткачёв.

Научно-образовательный центр по подготовке молодых научных кадров по физике нейтрино и нейтринной астрофизике. Руководители работ ак. В.А.Матвеев, к.ф.-м.н. Э.Я.Нугаев

1.1 РЕФЕРАТ

3 рис. 68 публ.

РАСШИРЕНИЯ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, КОСМОЛОГИЯ, АСТРОФИЗИКА, ТЕОРИИ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ, МОДЕЛИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ, ТЁМНАЯ ЭНЕРГИЯ, ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ, ИНФЛЯЦИЯ, ИНТЕГРИРУЕМЫЕ МОДЕЛИ.

Объектом исследования являются модели физики элементарных частиц за пределами Стандартной модели, в частности суперсимметричные теории и теории с дополнительными пространственными измерениями, расширения Стандартной модели, содержащие стерильные нейтрино, в рамках которых можно интерпретировать экспериментальные данные об осцилляциях нейтрино и тёмной материи, модифицированные теории гравитации, в том числе теории с нарушенной Лоренц-инвариантностью, модели физики и астрофизики космических лучей сверхвысоких энергий, методы Монте-Карло моделирования атмосферных ливней, процессы, происходившие в ранней Вселенной, такие как процессы фазового перехода, генерации барионной асимметрии, образования структур, процессы, происходившие на инфляционной стадии.

Цель работы — построение новых теорий и моделей физики высоких энергий, способных решить широкий круг проблем современной теоретической физики, возникающих на стыке сразу нескольких направлений, таких как физика элементарных частиц, астрофизика и космология, а также обеспечение достижения научных результатов мирового уровня, подготовка и закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров, формирования эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

Основным инструментом для исследования процессов и явлений в физике элементарных частиц и космологии был использован аппарат квантовой теории поля, квазиклассическое приближение, методы теории симметрий, а также суперсимметрий. В рамках НИР этот математический аппарат был существенно развит и дополнен новыми методами, позволяющими получить количественные характеристики экспериментально наблюдаемых величин, таких как время жизни частиц, сечение рассеяния, вероятность туннельного прохождения и так далее. При исследовании как равновесных, так и неравновесных процессов, происходивших в ранней Вселенной, были использованы методы квантовой теории поля при конечных температурах, которые являются синтезом методов квантовой теории поля и статистической физики. Для решения задач, не поддающихся аналитическому исследованию, были использованы пакеты программ, такие как LatticeEasy, CompHEP, microOMEGAs, HYDJET++, CASCADE, PYTHIA, NMSSMTools и другие.

В процессе выполнения НИР были получены следующие основные результаты:

Исследована статистическая анизотропия спектра первичных возмущений по данным WMAP за 9 лет наблюдения.

Показано, что нарушение симметрии Лоренца на трансплaнковских масштабах приведет к тому, что атмосфера станет прозрачной для фотонов ультравысоких энергий (> ЭэВ).

Обнаружено горячее пятно на карте космических лучей с энергиями выше 57 ЭэВ по данным 5 лет наблюдений наземной решетки Telescope Array

Исследован ансамбль всех источников гамма-излучения с энергией выше 100 ГэВ. Показано, что наблюдаемые Fermi LAT и черенковскими гамма-телескопами спектры не содержат экспоненциального подавления, ожидаемого даже в наиболее консервативных моделях инфракрасного фона.

Проведен слепой поиск гамма-пульсаров, использующий только данные Fermi LAT. В результате слепого поиска, построен каталог из 25 гамма-пульсаров, только 9 из которых зарегистрированы также в радиодиапазоне.

Дан обзор современного состояния исследований моделей со стерильными нейтрино.

Показано, что лоренцева симметрия (или несколько её копий) с необходимостью возникает в унитарной теории в двух пространственно-временных измерениях как следствие изотропной масштабной инвариантности и конечной скорости распространения сигналов.

Получены редукционные формулы Лемана - Симанзика - Циммермана в некоммутативной теории поля.

Сформулирован конформно-инвариантный предел четырёхмерной квантовой электродинамики в рамках теоретико-возмущенного разложения по константе связи и изучены следствия конформной симметрии в теории сильных взаимодействий.

Построено расширение модели статической кротовой норы Айхелбурга-Шайна.

В модели Кулагина-Петти выполнены расчёты сечений рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах в области энергий нейтринного эксперимента LBNE

Получены новые ограничения на потоки нейтрино и мюонов от аннигиляции тёмной материи, на скорость аннигиляции, спин-зависимое и спин-независимое сечения рассеяния частиц тёмной материи (WIMP) на протоне, с использованием данных Байкальского нейтринного телескопа НТ-200.

В рамках моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии предложено объяснение недавно обнаруженного избытка гамма-лучей с энергией 3.5 кэВ из Андромеды и ряда кластеров галактик.

Проведено исследование возможного влияния нестандартных взаимодействий нейтрино на сигнал от аннигиляции тёмной материи в Солнце.

1.2 Введение

В настоящее время исследование теоретических проблем физики частиц и космологии и в особенности их взаимосвязи является одной из наиболее актуальных проблем современной физики. Это связано с новыми экспериментальными возможностями, в частности, с работой Большого адронного коллайдера. Эксперименты на Большом адронном коллайдере позволят не только решить ряд принципиальных вопросов физики элементарных частиц (проблема возникновения масс и нарушение электрослабой симметрии), но и найти связи с астрофизикой и космологией (структура тёмной материи).

Учёным отдела теоретической физики ИЯИ РАН принадлежит ряд пионерских результатов в этих направлениях (эффект Зацепина-Кузмина, непертурбативный механизм возникновения барионной асимметрии Вселенной, новые методы многопетлевых вычислений, правила сумм в КХД и другие). В отделе работает высококвалифицированный штат исследователей, среди которых один академик РАН и два член-корреспондента РАН. Предполагается, что исследования по этой тематике будут развивать ранее полученные результаты в этих направлениях.

В плане исследования космологических и астрофизических аспектов физики частиц исследования будут сосредоточены на теоретическом анализе проблем скрытой массы и тёмной энергии во Вселенной и их возможной взаимосвязи с экспериментальными исследованиями на Большом адронном коллайдере. Особое внимание будет уделено разработке модифицированных теорий гравитации и получению их предсказаний в области сверхбольших и сверхмалых расстояний. Также планируется развитие теории генераций космологических возмущений в ранней Вселенной. Будут продолжены работы по разработке теории происхождения космических лучей, поиск наблюдаемых эффектов от их удаленных источников.

По физике элементарных частиц одно из основных направлений исследований – анализ и обработка экспериментальных данных Большого адронного коллайдера с целью поиска новой физики вне рамок Стандартной модели, в частности, исследование проблемы экспериментального обнаружения правого W-бозона и тяжелого нейтрино. Также будут продолжены исследования свойств барионных и мезонных резонансов методами КХД правил сумм, в частности, вычисления параметров смешивания B-мезонов и их ширин распадов на основе использования конечноэнергетических правил сумм и их модификаций. Будут продолжены исследования по влиянию эффектов ренормалонов на увеличение экспериментальных данных по глубоконеупругому лептон-адронному рассеянию.

1.3 Результаты исследований

Исследована статистическая анизотропия спектра первичных возмущений по данным WMAP за 9 лет наблюдения. Получены ограничения на модели анизотропной инфляции, а также на альтернативные модели ранней Вселенной - модель конформного скатывания и генезиса галилеона [1-3].

Показано, что нарушение симметрии Лоренца на транспланковских масштабах приведет к тому, что атмосфера станет прозрачной для фотонов ультравысоких энергий (> ЭэВ). Как следствие, регистрация нескольких фотонов таких энергий установит наиболее сильное ограничение на параметры нарушения Лоренц-инвариантности и модели квантовой гравитации типа Хоравы-Лифшица [4]. Опубликовано описание обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy). Обсерватория, включающая в себя детекторы Tunka-HiSCORE, Тунка-133, несколько черенковских телескопов и решетку наземных и подземных детекторов, будет чувствительна к гамма-квантам с энергиями от нескольких ТэВ и к космическим лучам с энергиями от 100 ТэВ. [5]. Проведено исследование работоспособности прототипа установки Тунка-HiSCORE площадью 0.1 км^2. Показано, что наблюдение гамма-квантов с энергиями выше 100 ТэВ на установке Тунка-HiSCORE установит наиболее сильные ограничения на модели квантовой гравитации с Лоренц-нарушением [4]. Опубликованы первые результаты анализа событий, зарегистрированных решёткой радиоантенн Tunka-Rex [6].

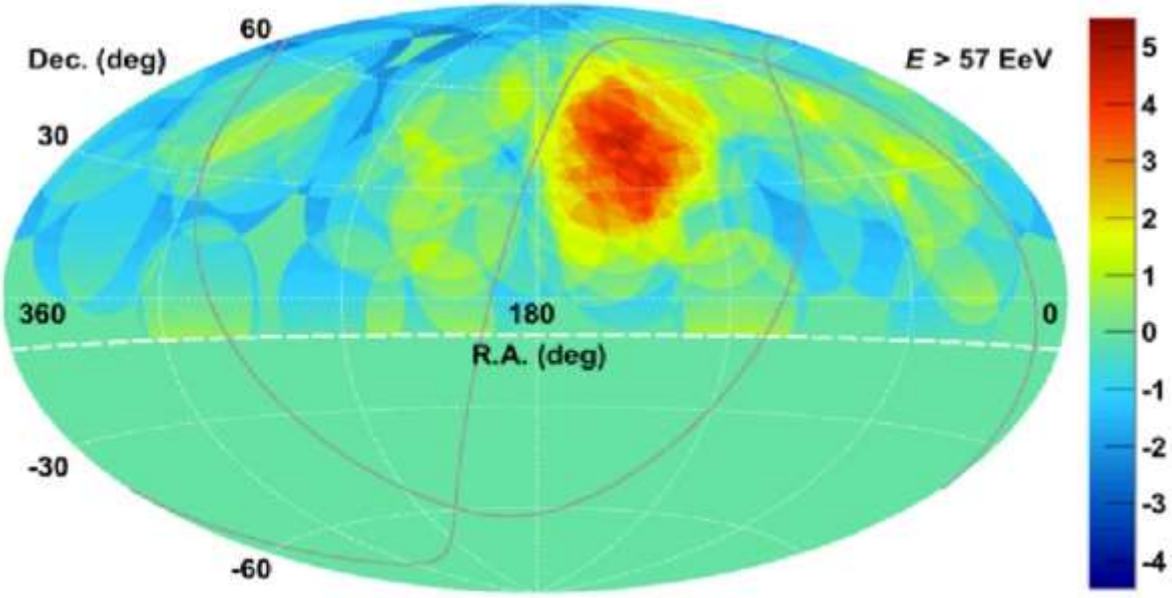


Рисунок 1. Горячее пятно на карте космических лучей с энергиями выше 57 ЭэВ по данным 5 лет наблюдений наземной решетки Telescope Array.

Представлены результаты проведённого в ИЯИ РАН анализа химсостава космических лучей по данным наземной решетки Telescope Array [7]. Опубликованы результаты измерения спектра космических лучей на установке Telescope Array в гибридном режиме [8]. Разработан метод анализа химического состава космических лучей по данным наземной решетки на основе метода многофакторного анализа. Представлены предварительные результаты применения данного метода к данным Telescope Array [9]. Обнаружено горячее пятно на карте космических лучей с энергиями выше 57 ЭэВ по данным 5 лет наблюдений наземной решетки Telescope Array, см. Рис. 1. В круг радиусом 20 градусов попадает 19 из 72 событий при ожидании 4.5 для изотропного распределения. Статистическая значимость наблюдаемого избытка после учета эффекта сканирования параметров 3.4 сигма [10]. Значимость увеличивается до 4.0 сигма при включении данных 6-ого года наблюдения [11,12]. В рамках международной рабочей группы выполнен анализ направлений прихода космических лучей с энергией выше 10 ЭэВ, зарегистрированных обсерваториями Telescope Array и Pierre Auger. Впервые выполнен мультипольный анализ с набором данных, покрывающих всю небесную сферу. Статистически значимых отклонений от изотропного распределения не обнаружено [13]. Опубликованы результаты мониторинга стабильности выхода фотоумножителей, использующихся в флуоресцентных телескопах Telescope Array [14].

Исследован ансамбль всех источников гамма-излучения с энергией выше 100 ГэВ. Показано, что наблюдаемые Fermi LAT и черенковскими гамма-телескопами спектры не содержат экспоненциального подавления, ожидаемого даже в наиболее консервативных моделях инфракрасного фона. Показано, что спектры согласуются с моделью, в которой часть фотонов превращается в аксионоподобные частицы в источнике, а обратное превращение происходит в окрестности нашей Галактики [15,16]. Показано, что временное растяжение высокоэнергетического (выше ГэВ) сигнала от гамма-всплесков может быть объяснено геометрически и зависит от угла между направлением наблюдения и центральным направлением излучения [17]. Проведен слепой поиск гамма-пульсаров, использующий только данные Fermi LAT. Предшествующие поиски использовали данные радио-телескопов для идентификации радио-шумных гамма-пульсаров, что обеспечивало повышенную чувствительность к этому типу объектов. В результате слепого поиска, построен каталог из 25 гамма-пульсаров, только 9 из которых зарегистрированы также в радио-диапазоне. Каталог позволяет напрямую измерить долю радио-тихих пульсаров, которая составляет 64% (+-10%). Результаты согласуются с предсказаниями моделей излучения внешней магнитосферы и расходятся с предсказаниями моделей полярной шапки. Распределения радио-шумных и радио-тихих пульсаров по характеристическому возрасту, потоку энергии, светимости и положению на небе статистически согласуются, что указывает на то, что эти два подкласса

могут быть частью единой популяции пульсаров [18].

Дан обзор современного состояния исследований моделей со стерильными нейтрино [19].

Различные симметрии пространства-времени играют ключевую роль в современной физике. Важнейшие примеры таких симметрий - симметрия относительно сдвигов пространства и времени (трансляционная инвариантность), симметрия Лоренца, масштабная инвариантность и конформная инвариантность. Известно, что в пространстве-времени с двумя измерениями конформная симметрия является следствием трансляционной, лоренцевой и масштабной инвариантности при наложении дополнительного условия об унитарности теории. С.М. Сибиряковым было показано, что это утверждение остается верным, даже если заменить предположение о лоренцевой симметрии более слабым требованием, что сигналы распространяются с конечной скоростью. А именно, оказывается что лоренцева симметрия (или несколько ее копий) с необходимостью возникает в унитарной теории в двух пространственно-временных измерениях как следствие изотропной масштабной инвариантности и конечной скорости распространения сигналов [20].

Получены редукционные формулы Лемана - Симанзика - Циммермана в некоммутативной теории поля [21]. Редукционные формулы Лемана - Симанзика - Циммермана связывают амплитуды рассеяния частиц с хронологическим произведением токов. Некоммутативная квантовая теория поля активно развивается в настоящее время. Поэтому актуальной задачей является распространение редукционных формул Лемана - Симанзика - Циммермана на некоммутативную квантовую теорию поля. Так же была доказана теорема фон-Неймана в теориях, содержащих нефизические частицы. В калибровочных теориях в ковариантной калибровке неизбежно возникают нефизические частицы. Теорема фон-Неймана - одна из основных теорем в теории, исследующей канонические коммутационные соотношения. Поэтому важно доказать ее справедливость в теориях, содержащих нефизические частицы.

Сформулирован конформно-инвариантный предел четырехмерной квантовой электродинамики в рамках теоретико-возмущенного разложения по константе связи и изучены следствия конформной симметрии в теории сильных взаимодействий. Показано, что следующие из конформной симметричного предела выражения для поляризованного правила сумм Бьеркена глубоконеупругого лептон-нуклонного рассеяния и характеристики процесса электрон-позитронной аннигиляции в адроны — функции Адлера отличаются от аналогичных результатов, полученных в литературе, но во втором порядке теории возмущений естественно воспроизводят результаты применения процедуры фиксации масштаба константы связи [22].

Построено расширение модели статической кротовой норы Айхелбурга-Шайна.

Данная модель строится с помощью так называемой «хирургии», когда две метрики сшиваются вдоль тонкой оболочки. В модели Айхельбурга-Шайна, внешняя метрика типа Маджумдара-Папапетру сшивется вдоль двух тонких сферически-симметричных статических оболочек одинакового радиуса и массы, с частью пространства-времени Райснера-Нордстрема, которая содержит кротовую нору. Вычисление метрики Маджумдара-Папапетру сводится к решению уравнения Лапласа в 3-мерном плоском пространстве-времении, что эквивалентно, в данном случае, вычислению потенциала двух заряженных (неконцентрических) сфер одинакового радиуса. Тогда, по построению, через каждую точку пространства-времени будет приходить замкнутая времени-подобная кривая (т. е. это так называемая «вечная машина времени»). Любопытным свойством кротовой норы Айхельбурга-Шайна является то, что в этом пространстве-времени энергетические условия не нарушаются. Однако, использование части метрики Райснера-Нордстрема лежащей под горизонтом событий, делает данную модель кротовой норы нестабильной из-за инфляции массы на внутреннем горизонте Коши. Тот факт, что в кротовая нора Айхельбурга-Шайна строится с использованием метрики Маджумдара-Папапетру, позволяет (технически) легко расширить модель на космологический случай. Именно, внешняя метрика становится расширяющейся метрикой Кастора-Трашен, а внутренняя — метрикой Райснера-Нордстрема-де Ситтера. Особенности сшивки на оболочках в такой модели требуют экстремальности внутренней метрики Райснера-Нордстрема-де Ситтера. Тогда уравнения Израэля требуют, чтобы оболочки состояли из пыли. Очевидно также, что оболочки не являются статическими, а порождаются сингулярностями и претерпевают неограниченное экспонециальное расширение. Кроме того, введение космологической постоянной несколько улучшает свойства стабильности внутреннего горизонта Коши по крайней мере на линейном уровне. Показано, что в этой модели возможно нарушение причинности. Однако, космологическое расширение делает оболочки причинно не связанными через конечное время. Поэтому область пространства-времени, в которой причинность нарушена, существует конечное время [23].

В нейтринном эксперименте MINERvA в Фермилабе проведены измерения отношения нейтринных сечений на разных ядерных мишенях в области энергий нейтрино $2 < E < 20$ ГэВ. Подобные измерения проведены впервые в рамках одного эксперимента на одном и том же нейтринном пучке. Результаты сравниваются с теоретическими предсказаниями, в том числе с вычислениями в модели Кулагина-Петти. Результаты опубликованы в [24,25]. В модели Кулагина-Петти выполнены расчёты сечений рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах в области энергий нейтринного эксперимента LBNE (Long Base Line Neutrino Experiment). Результаты были доложены на совещании коллаборации LBNE и на нейтринной программе CETUP*2014 [26,27]. Коллаборация LBNE выразила заинтересованность в сотрудничестве.

Заявка группы ИЯИ о вступлении в коллаборацию LBNE была официально поддержана. Нужно отметить, что наша группа является единственным представителем российских научных организаций в этом крупнейшем нейтринном эксперименте.

Построена модификация теории сильных взаимодействий, квантовой хромодинамики, путем введения в лагранжиан ненулевых масс глюонов. Это позволяет естественным образом получить массовую щель в спектральном представлении Челлена-Лемана для функции поляризации вакуума. Получено ограничение на массу глюонов снизу исходя из этого спектрального представления. Показано, что квантовая хромодинамика с массивными глюонами является перенормируемой на массовой поверхности [28-30]. Проведен сравнительный анализ ренормгрупповой бета-функции квантовой электродинамики в рамках 5-петлевого приближения теории возмущений и первого нетривиального приближения 1/N-разложения. Показано, что результаты хорошо согласуются в достаточно широком интервале значений константы связи, что подтверждает надежность обоих приближений [31].

Завершена работа по обработке данных нейтринных событий, полученных на Байкальском нейтринном телескопе НТ-200. Получены новые ограничения на потоки нейтрино и мюонов от этой аннигиляции, скорость аннигиляции, спин-зависимое и спин-независимое сечения рассеяния частиц тёмной материи (WIMP) на протоне. Новые ограничения сравнимы с результатами, полученными на других нейтринных телескопах (см. Рис.2) и в прямых поисках (см. Рис.3).

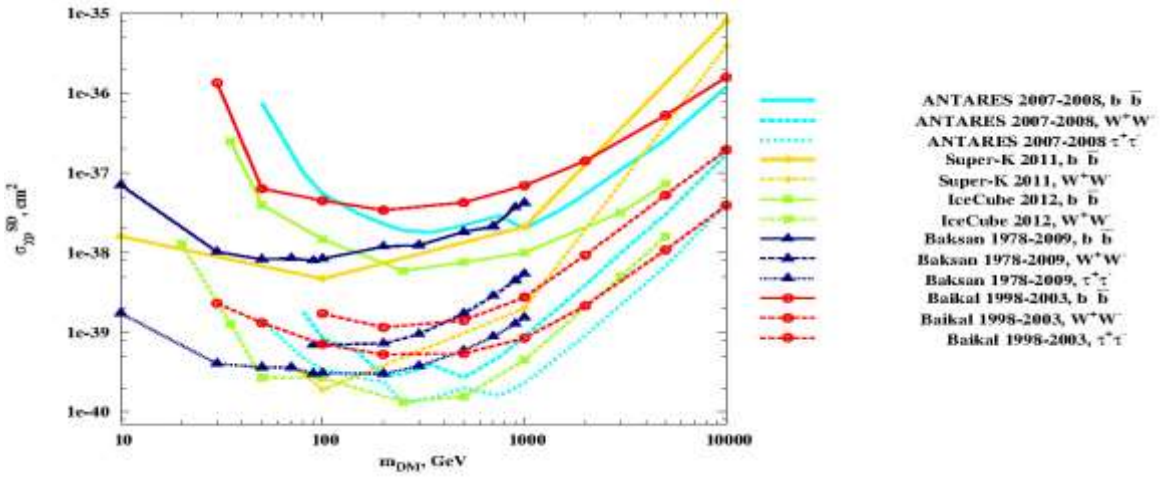


Рисунок 2: Сравнение ограничений НТ-200 с непрямыми поисками

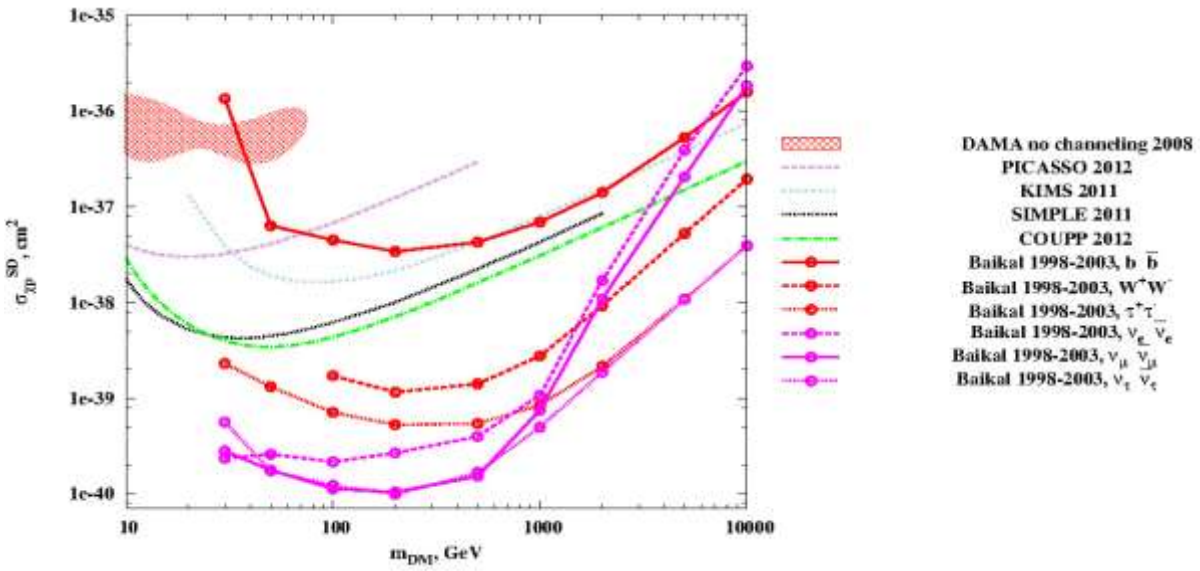


Рисунок 3: Сравнение ограничений НТ-200 с прямыми поисками

По результатам работы подготовлена статьи [32-34] и сделаны доклады [35,36].

В рамках моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии предложено объяснение недавно обнаруженного избытка гамма-лучей с энергией 3.5 кэВ из Андромеды и ряда кластеров галактик. Было высказано предположение, что источником таких гамма-лучей могли бы служить легкое сголдстино (скалярное или псевдоскалярное), которые могли бы быть сабдоминантной компонентой тёмной материи. При этом доминантной компонентной является гравитино с массой порядка 1 ГэВ. Интересно, что модель предсказывает наличие еще одной линии при других энергиях гамма-квантов от распада другого сголдстино, что может служить одним из методов проверки предложенной гипотезы. По результатам работы подготовлена статья [37].

Проведено исследование возможного влияния нестандартных взаимодействий нейтрино на сигнал от аннигиляции тёмной материи в Солнце. Проведенный анализ показывает, что эволюция распространения нейтрино в диапазоне энергий 1-1000 ГэВ качественно существенно изменяется при наличие нестандартных нейтринных взаимодействий. При этом ограничения на поток мюонных нейтрино от аннигиляции частиц тёмной материи в Солнце, получаемые в различных нейтринных экспериментах, могут измениться на 10-50%. Предварительные результаты исследования представлены в докладе [38].

В модели nuMSM вычислены вероятности редких процессов с нарушением лептонного числа: радиационный распад мюона в электрон, мюон-электронная конверсия на ядре, трехлептонный распад мюона и тау-лептона, распады мезонов в заряженные лептоны, безнейтринный двойной бета распад. Показано, что для значений параметров модели (масс

стерильных нейтрино и углов смешивания с активными нейтрино), удовлетворяющих космологическим ограничениям, вероятности этих процессов оказываются ниже порога чувствительности современных лабораторных (эксперименты по поиску безнейтринного двойного бета-распада) и коллайдерных экспериментов. Результаты работы готовятся к публикации.

Изучена феноменология суперсимметричных моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии. Найден механизм увеличения массы хиггсовского бозона в суперсимметричных моделях за счет смешивания с более легким сголдстино. Произведено сканирование в пространстве параметров и отобраны модели, удовлетворяющие современным ограничениям из разных экспериментов. Получены конкретные предсказания этих моделей для экспериментов на LHC: отличие количества событий с участием бозона Хиггса в различных каналах от предсказываемого в Стандартной модели, наличие сигнала от легкого сгодстино. Также показано, что легкое сголдстино может объяснить резонанс с массой около 98 ГэВ, найденный на уровне 2 сигма в экспериментах на LEP. Ожидается, что полученные предсказания могут быть проверены на следующих этапах работы экспериментов CMS и ALTAS. По результатам работы подготовлена статья [39], направленная в журнал JHEP.

Показано, что наблюдаемые характеристики коротких радио-вспышек (fast radio burst), а именно, полное энерговыделение во время вспышки, длительность вспышки, высокая яркостная температура, частота событий, могут быть объяснены в модели, которая предполагает взрывной распад аксионных миникалстеров с трансформацией их массы покоя в электромагнитное излучение. По результатам работы написана статья [40], принятая в печать в "Письма в ЖЭТФ".

Вычислены ядерные PDFs при больших значениях инвариантного переданного импульса Q на основе полу-микроскопической модели, включающей ряд различных механизмов глубоко-неупругого рассеяния: ядерное экранирование, существенное при малых значениях бьеркеновской переменной x, эффекты импульсного распределения и внемассовые эффекты, существенные при больших значениях x, эффекты мезонных обменных токов. Ядерные эффекты были проанализированы для различных сортов кварков (например, u и d) и типов распределений (валентные и морские). Результаты наших расчётов были применены к анализу процесса рождения лептонной пары в адронных столкновениях (процесс Дрелла-Яна) с различными ядерными мишенями и находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными экспериментов E772 и E866 в Фермилаба [41].

Проведена существенная доработка, с учётом новых данных по измерению угла смешивания theta13, разработанной участниками проекта модели новой физики,

описывающей иерархию масс и смешиваний нейтрино. Показано, что новые экспериментальные данные подтверждают предсказания модели; уточнены значения параметров модели. Дан ответ на вопрос о вариациях предсказаний в зависимости от геометрии дополнительных измерений, влияющей на спектр калуца-кляйновских возбуждений векторных полей: показано, что существенных качественных изменений в предсказаниях не происходит; сохраняется правильная иерархия масс и смешиваний как в секторе заряженных фермионов, так и в секторе нейтрино; остаются в силе основные экспериментальные сигнатуры и ограничения. Предложен механизм нарушения CP-симметрии без введения скалярных полей, который в принципе может быть использован в модели, описывающей иерархию масс и смешиваний нейтрино. По результатам работы написана статья [42].

Исследованы возможности рождения парафотонов в экспериментальных установках с фиксированной мишенью в процессах: протонного тормозное излучения (учтены первичные и вторичные протоны в приближении Вильямса-Вайцзеккера), тормозного излучения вторичных лептонов (Монте-Карло симуляция), распадов вторичных лептонов (Монте-Карло симуляция). Для каждого из этих процессов была проанализирована кинематика рождения и последующего распада парафотона применительно к геометрии детектора эксперимента SHiP. Было показано, что эксперимент SHiP будет чувствителен к значительной области пространства параметров модели, которая пока не была исследована в других экспериментах. По результатам работы написана статья [43], направленная журнал Phys.Rev. D.

Предложена строгая процедура вычислений физических характеристик инклюзивных и полуинклюзивных процессов, продемонстрирована её применимость в 3-ем порядке теории возмущений в КХД. Предсказана структура ряда теории возмущений до третьего порядка для правила сумм рассеяния поляризованных лептонов на нуклонах в модели КХД с элементами суперсимметрии, содержащей произвольное число мультиплетов глюино. Результаты будут опубликованы в двух работах [44,45] в журналах Phys.Rev. D и Nuclear Physics B Proceedings Suppl..

Разработан квазиклассический метод вычисления вероятности рождения пар "солитон-антисолитон" в столкновениях двух квантовых высокоэнергичных частиц. Метод апробирован в (1+1)-мерной модели скалярного поля, где эта вероятность получена численно. Показано, что вероятность индуцированного рождения солитон-антисолитонных пар экспоненциально мала при любых энергиях. Результаты работы готовятся к публикации. Показано, что экспоненты подавления процессов индуцированного распада ложного вакуума и

индуцированного рождения солитонов постоянны при высоких энергиях столкновения. При этом, вероятности этих процессов экспоненциально подавлены при произвольных энергиях. Предложен пертурбативный метод описания индуцированных процессов при высоких энергиях, основанный на использовании новых решений, определённых в действительном времени. Результаты работы готовятся к публикации.

Предложена самосогласованная интерпретация спектра гамма-излучения удаленного блазара PKS 1424+240 в широком диапазоне энергий от ГэВ до ТэВ, основанная на предположении, что данный объект на ряду с гамма излучением испускает космические лучи сверх-высоких энергий. Спектры инжекции протонов и гамма-квантов вычислены в рамках лепто-адронной модели, исходящей из того что в релятивистской струе (джете) наряду с электронами присутствуют протоны, которые ускоряются до сверхвысоких энергий попутно рождая электрон-позитронные пары при взаимодействии с фотонным фоном и излучая гамма-кванты через синхротрон. Указанные процессы вносят основной квлад в наблюдаемый спектр до энергий порядка 100 ГэВ. Фотоны более высоких энергий производятся в результате взаимодействия космических лучей испущенных блазаром с межгалактическим фотонным фоном на пути их распространения от источника к Земле [46].

Изучена опубликованная информация о нейтринных событиях, зарегистрированных IceCube, и построена область допустимых фитов энергетического спектра астрофизических нейтрино высоких энергий. Показано, что имеющиеся данные согласуются с отсутствием высокоэнергетического обрезания в спектре, и получены ограничения на плоскости параметров степенного спектра (нормировка интенсивности и показатель степени), совместных с данными на уровне достоверности 68%. Такая работа, которая должна лежать в основе всех дальнейших количественных исследований сценариев происхождения нейтрино, почему-то никем ранее не была проведена (сама коллаборация IceCube опубликовала параметры лишь для наилучшего фита и для фита с априори фиксированным плоским спектром). Отсутствие обрезания в спектре нейтрино при максимальных энергиях зарегистрированных событий (несколько ПэВ) представляется естественным, так как этот энергетический масштаб ничем в астрофизике не выделен. Мы сконцентрировались в дальнейших исследованиях на моделях без обрезания, в которых спектр нейтрино продолжается по крайней мере до энергий около 10^17 – 10^18 эВ. В рамках наиболее естественного предположения, что нейтрино возникают как продукты распада пи-мезонов, мы вычислили потоки сопровождающего их гамма-излучения для различных распределений источников, с учетом эффектов поглощения фотонов при распространении от источника до наблюдателя (рождение пар на реликтовом излучении ограничивает длину свободного пробега

фотонов с энергиями порядка ПэВ галактическими масштабами). Различные сценарии происхождения нейтрино были характеризованы типичными распределениями источников. Мы сравнили наши предсказания для различных сценариев с экспериментальными результатами, ограничивающими поток космических фотонов в диапазоне от ПэВ до ЭэВ; изучили систематические неопределенности этих результатов и показали, что с учетом достаточно больших систематических ошибок некоторые сценарии могут быть совместны как с ограничениями сверху на поток фотонов, полученными при (1-10) ПэВ экспериментами KASKADE и CASA-MIA, так и с наблюдением первичных фотонов при ~100 ПэВ на установке ШАЛ-МГУ. Дальнейшие поиски диффузного гамма-излучения в области энергий ~(10^14-10^18) эВ, при чувствительности экспериментов лишь немного лучшей имеющихся сегодня верхних пределов, смогут стать исключительно важным инструментом диагностики, который позволит разделить галактические и внегалактические сценарии происхождения событий, зарегистрированных IceCube. По описанным результатам опубликована статья [47].

Среди более конкретных механизмов производства нейтрино сверхвысоких энергий был рассмотрен сценарий многочисленных внегалактических источников, а именно, активных галактических ядер. Были смоделированы процессы фотопионного рождения на радиационном поле аккреционных дисков Шакуры-Сюняева в окрестностях центральных сверхмассивных черных дыр активных галактик. Было показано, что эта модель может объяснить наблюдаемые значения потоков нейтрино и удовлетворяет всем ограничениям, связанным с гамма- и космическим излучением. Статья принята к печати [48].

Описанные выше исследования были проведены с использованием численного моделирования распространения космических лучей, фотонов и нейтрино от источника к наблюдателю. Для этих целей был использован разработанный нами ранее программный код TransportCR. Для целей проекта он был усовершенствован, результаты его использования сравнены с результатами моделирования тех же процессов другим публично доступным кодом, CRPropa. Продемонстрировано хорошее согласие физических результатов и отмечено, что разработанный в нашей группе код позволяет проводить моделирование примерно в 100 раз быстрее, так как не использует метод Монте-Карло, а основан на численном решении уравнений переноса. Код TransportCR также сделан публично доступным. Статья принята в печать [49].

Исследован вопрос о нетипичности инфляции Старобинского и хиггсовской инфляции, где скалярный потенциал на инфляционной стадии является плоским, а значит, наивно, не согласующимся с начальными условиями, принятыми в общем случае для моделей хаотической инфляции: кинетическая, градиентная и потенциальная энергии все одного порядка, и этот порядок равен 1 в планковских единицах. Накладывая начальные условия в

жордановской системе было показано, что данные модели ничуть не хуже, чем любая другая модель с неограниченным сверху потенциалом, где очевидность реализации хаотических начальных условий не вызывает сомнений[50].

Для кандидатов на роль частиц тёплой тёмной материи становится важной форма спектра (распределение частиц по скоростям), поскольку такие модели могут быть проверены по результатам анализа особенностей в спектрах далёких квазаров (так называемый Lyman-alpha лес). Были повторены известные в литературе вычисления спектра в случае нетермального рождения частиц тёмной материи в распадах тяжёлых частиц. Указано на существование области применимости используемых при этом приближений, что иногда игнорируется в литературе, но оказывается весьма существенным для ряда интересных задач [51].

Исследованы коллайдерные сигнатуры (характерные процессы в столкновениях на коллайдерах) модели хилогенезиса --- перспективного варианта моделей антибарионной тёмной материи. Получены ограничения на пространство модельных параметров из анализа результатов первой стадии работы Большого адронного коллайдера. Предложено несколько новых каналов (сигнатур) для дальнейшей проверки моделей антибарионной тёмной материи на Большом адронном коллайдере [52].

Изучено рождение высокоэнергетичных частиц Стандартной модели в рамках модели Старобинского тёмной энергии (вариант F(R)-гравитации), происходящее внутри сжимающихся из-за джинсовской нестабильности областей. В такой модели модифицированной гравитации дополнительная степень свободы (скалярон) ведёт себя как частица с массой, зависящей от плотности материи. Поэтому, когда масса изменяется, лёгкие скаляроны могут рождаться на стадиях с сильным нарушением адиабатичности. Позднее масса скалярона растёт и может достичь большой величины, включая 10^13 ГэВ, интересной для обеспечения инфляционной стадии в ранней Вселенной. Тяжёлые скаляроны распадаются, давая вклад в поток космических лучей. Была аналитически вычислена плотность числа рождённых скаляронов для случая экспоненциального (джинсовского) сжатия. Показано, что для феноменологически приемлемых и космологически интересных значений параметров эта плотность пренебрежимо мала. Этот результат представляется типичным для моделей F(R)-гравитации общего вида, предложенных как альтернатива космологической постоянной [53].

Предложенная для объяснения явления тёмной энергии модель Старобинского модифицированной гравитации можно рассматривать в астрофизическом контексте. В частности, недавно было указано, что осцилляции кривизны в сжимающихся (коллапсирующих) областях (гало галактик, протозвёзды и др.) могут привести к рождению частиц высоких энергий, дающих вклад в поток космических лучей. Нами были выполнены

вычисления соответствующих процессов в эйнштейновской системе и показано, что такие осцилляции могут привести только к рождению мягких фотонов (низкочастотного излучения) [54].

Рассмотрены Q-шары в теории, описывающей скалярное поле, взаимодействующее с U(1) калибровочным полем в (3+1)-мерном пространстве-времени, и исследованы их общие свойства. Показано, что широко известное и часто встречающееся в научной литературе ограничение на максимальный заряд калибровочного Q-шара является неправильным. Предложен простой метод, позволяющий получать основные характеристики U(1) калибровочных Q-шаров (заряд, энергия) в случае слабого взаимодействия скалярного и векторного полей без решения соответствующих линеаризованных уравнений движения, используя только решение для некалибровочного Q-шара, играющего роль фонового решения. Получены явные аналитические решения для калибровочных Q-шаров в случае слабого взаимодействия скалярного и векторного полей, в том числе и в кусочно-параболическом потенциале скалярного поля, произведено сравнение характеристик таких Q-шаров с характеристиками обычных Q-шаров. В частности, показано, что энергий калибровочного Q-шара всегда больше энергии некалибровочного Q-шара с таким же значением заряда. Исследована стабильность калибровочных Q-шаров относительно распада на свободные частицы и распада на Q-шары с меньшими зарядами, а также связь между стабильностью относительно распада на Q-шары с меньшими зарядами для калибровочных Q-шаров и Q-шаров в аналогичной теории без векторного поля. Предложена модель, описывающая Q-шары в теории комплексного скалярного поля с кусочно-параболическим, непрерывным и дифференцируемым при всех значениях модуля скалярного поля потенциалом. Найдены точные решения для Q-шаров в данной модели и построены зависимости энергий Q-шаров от их зарядов при различных значениях параметров теории, изучена стабильность полученных решений. Показано, что при определенных значениях параметров модели диапазон зарядов и энергий стабильных Q-шаров много меньше, чем абсолютные значения зарядов и энергий соответственно. Данный результат представляет интерес для исследований в космологии, так как Q-шары являются возможными кандидатами на роль тёмной материи. Изучалась устойчивость заряженных конфигураций с ненулевым моментом в теории с двумя пространственными измерениями. Было показано, что критерий Вахитова-Колоколова (Q-критерий) не работает для решений с числом намоток $n>0$ и найдены моды, отвечающие этому типу нестабильности [55].

Произведена оценка числа блазаров, которые станут доступны для наблюдения в эксперименте следующего поколения CherenkovTelescope Array (CTA), а также распределения блазаров по красному смещению с учетом вклада вторичных фотонов от космических лучей, испущенных удаленными объектами. Показано, что данный эксперимент способен

зарегистрировать излучение с энергией выше 30 ГэВ от блазаров с красным смещением до 8. По результатам опубликована статья [56].

В рамках коллаборации Telescope Array нами исследовалась анизотропия направлений прихода космических лучей в области энергий большей 57 ЭеВ. Использовался набора данных, собранных коллаборацией Telescope Array за пять лет наблюдений, с мая 2008 по май 2013. Обнаружен кластер событий, названный нами "горячее пятно". Угловой рамер пятна на небесной сфере составляет порядка 20 градусов, а его центр имеет координаты R.A. = 146.7 градусов, Dec. = 43.2 градусов в экваториальной системе координат. Центр пятна сдвинут на 19 градусов относительно супергалактической плоскости. В эту область попадает 19 из зарегистрированных на сегодняшний день 72 событий. Горячее пятно имеет статистическую значимость на уровне 5.1 сигма. Вероятность случайного появления пятна с такой значимостью, с произвольным размером и где-либо на небе, в изотропном распределении направлений прихода равна четырем десятитысячным. Горячее пятно может быть первым указанием на источники космических лучей сверхвысоких энергий. По материалам соответствующей публикации [57] был сделан пресс-релиз и большое количество популярных статей в зарубежной и российской прессе.

Изучение глобальной анизотропии направлений прихода космических лучей представляет собой другую важную задачу, которой мы занимались в отчетном году. Инструментом для решения этой задачи является исследование сферических мультипольных моментов в распределении по небу направлений прихода первичных частиц. Для измерения полного набора гармонических коэффициентов требуется покрытие всего неба картой данных. Этой цели можно достичь лишь объединяя данные различных обсерваторий, расположенных в северном и южном полушариях Земли. Ранее такая процедура не проводилась. В этом году мы впервые объединили данные обсерватории им. Пьера Оже, расположенной в южном полушарии, с данными нашей обсерватории, расположенной в северном полушарии. В соответствующей процедуре использовались события с энергиями большими 10 ЭэВ, для которых уже можно ожидать неисчезающую анизотропию вследствие неоднородности Вселенной, достаточно малых отклонений в магнитных полях и относительно большой набранной статистики. Значимых отклонений от изотропного распределения мы не нашли. Получены верхние ограничения на амплитуды дипольного и квадрупольного моментов [58].

1.4 Заключение

В заключении приведем наиболее важные результаты, полученные коллективом Отдела теоретической физики в 2014 г.:

1) Исследована статистическая анизотропия спектра первичных возмущений по данным WMAP за 9 лет наблюдения.
2) Показано, что нарушение симметрии Лоренца на транспланковских масштабах приведет к тому, что атмосфера станет прозрачной для фотонов ультравысоких энергий (> ЭэВ).
3) Обнаружено горячее пятно на карте космических лучей с энергиями выше 57 ЭэВ по данным 5 лет наблюдений наземной решетки Telescope Array
4) Исследован ансамбль всех источников гамма-излучения с энергией выше 100 ГэВ. Показано, что наблюдаемые Fermi LAT и черенковскими гамма-телескопами спектры не содержат экспоненциального подавления, ожидаемого даже в наиболее консервативных моделях инфракрасного фона.
5) Проведен слепой поиск гамма-пульсаров, использующий только данные Fermi LAT. В результате слепого поиска, построен каталог из 25 гамма-пульсаров, только 9 из которых зарегистрированы также в радио-диапазоне.
6) Дан обзор современного состояния исследований моделей со стерильными нейтрино.
7) Показано, что лоренцева симметрия (или несколько ее копий) с необходимостью возникает в унитарной теории в двух пространственно-временных измерениях как следствие изотропной масштабной инвариантности и конечной скорости распространения сигналов.
8) Получены редукционные формулы Лемана - Симанзика - Циммермана в некоммутативной теории поля.
9) Сформулирован конформно-инвариантный предел четырехмерной квантовой электродинамики в рамках теоретико-возмущенного разложения по константе связи и изучены следствия конформной симметрии в теории сильных взаимодействий.
10) Построено расширение модели статической кротовой норы Айхелбурга-Шайна.
11) В модели Кулагина-Петти выполнены расчёты сечений рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах в области энергий нейтринного эксперимента LBNE
12) Получены новые ограничения на потоки нейтрино и мюонов от аннигиляции тёмной материи, на скорость аннигиляции, спин-зависимое и спин-независимое сечения рассеяния частиц тёмной материи (WIMP) на протоне, с использованием данных Байкальского нейтринного телескопа НТ-200.
13) В рамках моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии предложено объяснение недавно обнаруженного избытка гамма-лучей с энергией 3.5 кэВ из Андромеды и ряда кластеров галактик.
14) Проведено исследование возможного влияния нестандартных взаимодействий нейтрино на сигнал от аннигиляции тёмной материи в Солнце.

Данные результаты являются результатами мирового уровня в области теоретической физики.

1.5 Список публикаций

1. S. Ramazanov, G. Rubtsov, Constraining anisotropic models of the early Universe with WMAP9 data, Phys.Rev. D89 (2014) 043517.

2. S.Ramazanov, G.Rubtsov, "Probing primordial statistical anisotropy with WMAP and Planck data", Quarks-2014, Suzdal 2-8.06.2014.

3. S. Ramazanov, G. Rubtsov, “Primordial scalar perturbations via conformal mechanisms: statistical anisotropy”, EPJ Web Conf. 70 (2014) 00042.

4. G. Rubtsov, P. Satunin, S. Sibiryakov, Prospective constraints on Lorentz violation from UHE photon detection, Phys.Rev. D89 (2014) 123011

5. N.M. Budnev et al., TAIGA the Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy — present status and perspectives, JINST 9 (2014) 09, C09021

6. M. Kunnas, ... B. Lubsandorzhiev, ... P. Satunin, G. Rubtsov et al, Hardware and first results of TUNKA-HiSCORE, Nucl.Instrum.Meth. A742 (2014) 269-270.

7. G.Rubtsov, S. Troitsky, "Primary composition of ultra-high-energy cosmic rays with the Telescope Array surface detector", Quarks-2014, Suzdal 2-8.06.2014.

8. T. Abu-Zayyad et al, Energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays observed with the Telescope Array using a hybrid technique Astropart.Phys. 61 (2015) 93-101

9. G. Rubtsov, S. Troitsky, Statistical methods for cosmic ray composition analysis at the Telescope Array Observatory, 16-ая конференция по сложным вычислениям и методам анализа в физике ACAT'2014, устный доклад, 1-5.09.2014

10. R.U. Abbasi et al., “Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater Than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment”, Telescope Array Collaboration (R.U. Abbasi (Utah U.) et al.), Astrophys.J. 790 (2014) L21

11. Г. Рубцов, И.И. Ткачев, Telescope Array и Pierre Auger Observatory: статус, результаты, 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, устный доклад, 11-15.08.2014

12. Г. Рубцов, Горячее пятно на карте космических лучей с энергиями выше 57 ЭэВ по данным обсерватории Telescope Array, семинар "Астрофизика космических лучей и физика космоса", НИИЯФ МГУ, 10.09.2014

13. A. Aab et al.[Telescope Array and Pierre Auger Collaborations], Searches for Large-Scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays Detected above Energy of 10^19 eV at the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array, Astrophys.J. 794 (2014) 2, 172.

14. B.K. Shin et al. [Telescope Array Collaboration], Gain Monitoring of Telescope Array Photomultiplier Cameras for the First 4 Years of Operation, Nucl.Instrum.Meth. A768 (2014) 96-103

15. G. Rubtsov, S. Troitsky, Breaks in gamma-ray spectra of distant blazars and transparency of the Universe, приглашенный доклад на семинаре Обсерватории Туорла, Финляндия, 26.09.2014
16. G.I. Rubtsov, S.V. Troitsky, Breaks in gamma-ray spectra of distant blazars and transparency of the Universe, Письма в ЖЭТФ 100 (2014) 397-401.
17. M. Piskunov, "Time Stretching of the GeV Emission of GRBs: Fermi LAT data vs geometrical model", Quarks-2014, Suzdal 2-8.06.2014.
18. G.I. Rubtsov, E.V. Sokolova, Blind search for radio-quiet and radio-loud gamma-ray pulsars with Fermi-LAT data, Zh.Eksp.Teor.Fiz. 100 (2014) 787-792
19. D.S. Gorbunov, “Sterile neutrinos and their role in particle physics and cosmology”, Phys.Usp. 57 (2014) 503-511
20. S. Sibiryakov, “From scale invariance to Lorentz symmetry”, Phys.Rev.Lett. 112 (2014) 241602
21. K. V. Antipin, M. N. Mnatsakanova, Yu. S. Vernov, “LSZ reduction formula in many-dimensional theory with space-space noncommutativity”, e-print arXiv:1401.5739
22. A.L.Kataev, “Conformal symmetry limit of QED and QCD and identities between perturbative contributions to deep-inelastic scattering sum rules”. JHEP 1402 092 (2014)
23. Alexey L. Smirnov, “Interacting thin shells in the interior of a Reissner-Nordstrom black hole”, Gen. Rel. Grav. 46, 1676 (2014).
24. MINERvA Collaboration, "Measurement of Ratios of nu_mu Charged-Current Cross Sections on C, Fe, and Pb to CH at Neutrino Energies 2-20 GeV", Phys.Rev.Lett. 112 (2014) 231801
25. MINERvA Collaboration, "Measurement of muon plus proton final states in \nu_{\mu} Interactions on Hydrocarbon at < E_{\nu} > = 4.2 GeV", FERMILAB-PUB-14-330-E e-Print: arXiv:1409.4497 [hep-ex], Experiment: FNAL-E-0938
26. S.A. Kulagin, "Understanding the nuclear effects in the energy region relevant for neutrino oscillation experiments", доклад на международной программе CETUP*2014 "Near Detector Physics" (10-20 июля 2014, Deadwood, South Dakota, USA)
27. S.A. Kulagin, "Nuclear Effects for Electron and Neutrino Inelastic Scattering", доклад на совещании нейтринной коллаборации LBNE (февраль 2014), Fermilab, USA
28. S.A. Larin, Quantum chromodynamics with massive gluons, Plenary talk at the MIAPP workshop Challenges, Innovations and Developements in Precision Calculations for the LHC, Munich, July 28-August 22, 2014.
29. S.A. Larin, Quantum chromodynamics with massive gluons, “Plenary talk at the XI International Conference Quark Confinement and Hadron Spectrum”, Saint- Petersburg, September 8-12, 2014.
30. S.A. Larin, QCD with massive gluons, Plenary talk at the XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, September 15-22, 2014.

31. S.A. Larin, Perturbative series and the 1/N expansion for the QED \beta-function, Phys.Part.Nucl.Lett. 11 (2014) 713-715.
32. Baikal Collaboration, “Search for neutrino emission from relic dark matter in the Sun with the Baikal NT200 detector”, arXiv:1405.3551, Astroparticle Physics (2015), pp. 12-20
33. M.M. Boliev, S.V. Demidov, O.V. Suvorova, “Neutrino physics with the Baksan Underground Scintillation Telescope”, Nuovo Cim. C037 (2014) 03, 193-19
34. S.V.Demidov, O.V.Suvorova, “Indirect searches for dark matter at Baksan and Baikal”, Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei (2015) 46 2
35. International Workshop on Prospects of Particle Physics: Neutrino Physics and Astrophysics, January 26 - Ferbuary 2, 2014, Valdai, Russia. доклад S.Demidov, "Indirect searches for dark matter at Baksan and Baikal".
36. Dark Ghosts - 1st GNN Workshop on Indirect DM Searches 10-11 April 2014, Spain, Valencia доклад S.Demidov, "Indirect Search for DM at Baikal ".
37. S.V. Demidov, D.S. Gorbunov, “SUSY in the sky or keV signature of sub-GeV gravitino dark matter”, Phys. Rev. D90, 035014
38. QUARKS-2014, 18th International Seminar on High Energy Physics Suzdal, Russia, 2-8 June, 2014. доклад S.Demidov, "NSI and neutrino signal from dark matter annihilations in the Sun"
39. K.O.Astapov, S.V.Demidov, “Sgoldstino-Higgs mixing in models with low scale supersymmetry breaking”, arXiv:1411.6222
40. I. I. Tkachev, “Fast Radio Bursts and Axion Miniclusters”, arXiv:1411.3900
41. S. A. Kulagin, “Nuclear parton distributions and the Drell-Yan process”, R. Petti, Phys. Rev. C 90, 045204 (2014)
42. Jean-Marie Frère, Maxim Libanov, Simon Mollet, Sergey Troitsky, “Exploring variations in the gauge sector of a six-dimensional flavour model”, ЖЭТФ том 147 вып. 3
43. D. Gorbunov, A. Makarov, I. Timiryasov, “Decaying light particles on board the SHiP (I): Signal rate estimates for hidden photons”, arXiv:1411.4007
44. A.L. Kataev, S.V. Mikhailov, “$\{\beta\}$-expansion in QCD, its conformal symmetry limit: theory + applications”, arXiv:1410.0554
45. A.L. Kataev, S.V. Mikhailov, “Generalization of BLM within the $\{\beta\}$-expansion and the Principle of Maximal Conformality”, arXiv:1408.0122
46. Dahai Yan, Oleg Kalashev, Li Zhang, Shuangnan Zhang, “A self-consistent interpretation of the GeV-TeV emission from a distant blazar PKS 1424+240”, arXiv:1412.4894
47. O.E. Kalashev, S.V. Troitsky, “IceCube astrophysical neutrinos without a spectral cutoff and (10^15-10^17) eV cosmic gamma radiation”, JETP Lett. 100 (2014) 865
48. O. Kalashev, D. Semikoz, I. Tkachev, “Neutrinos in IceCube from AGN's”, J.Exp.Theor.Phys.

147 (2015), arXiv:1410.8124
49. O.E. Kalashev, E. Kido, “Simulations of Ultra High Energy Cosmic Rays propagation”, J.Exp.Theor.Phys. 147 (2015), arXiv:1406.0735
50. D.S. Gorbunov, A.G. Panin, “Are R2- and Higgs-inflations really unlike?”, arXiv:1412.3407
51. F.Bezrukov, D. Gorbunov, “On the applicability of approximations used in calculation of spectrum of Dark Matter particles produced in particle decays”, arXiv:1412.1341
52. S.V. Demidov, D.S. Gorbunov, D.V. Kirpichnikov (2014), “Collider signatures of Hylogenesis”, arXiv:1411.6171
53. D. Gorbunov, A. Tokareva, “Scalaron production in contracting astrophysical objects”, arXiv:1412.3413
54. D. Gorbunov, A. Tokareva, “No Cosmic Rays from Curvature Oscillations during Structure Formation with F(R)-gravity”, arXiv:1412.3770
55. E. Nugaev, A. Shkerin,” Investigation of Q-tubes stability using the piecewise parabolic potential”, Phys.Rev. D90 (2014) 016002
56. O. E. Kalashev, A. Kusenko, “Prospects for future very high-energy gamma-ray sky survey: impact of secondary gamma rays”, Astropart.Phys. 54 (2014) 118-124.
57. Telescope Array Collaboration (R.U. Abbasi (Utah U.) et al.), “Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater Than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment”, Astrophys.J. 790 (2014) L21
58. Telescope Array and Pierre Auger Collaborations (Alexander Aab (Siegen U.) et al.), “Searches for Large-Scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays Detected above Energy of 1019 eV at the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array”, Astrophys.J. 794 (2014) 2, 172

2 Отдел ускорительного комплекса

Руководитель работ д.ф.-м.н. А.В.Фещенко.

Физика и техника сильноточных ускорителей на средние и промежуточные энергии.

Обеспечение работы ускорителя.

Модернизация ускорителя.

Модернизация отдельных систем ускорителя.

Сотрудничество с Российскими и зарубежными научными центрами.

Исследование и разработка каналов транспортировки сильноточных пучков протонов и отрицательных ионов водорода с минимальными потерями в экспериментальном комплексе ИЯИ РАН.

Исследование и разработка новых узлов ускорителя «Большой адронный коллайдер».

Развитие ядерных технологий на протонных пучках Московской мезонной фабрики.

LINAC4 - повышение светимости пучка ускорительного комплекса Большого адронного коллайдера.

Руководитель работ д.т.н.Л.В.Кравчук

Разработка ускорительного проекта НИКА и подготовка экспериментов с пучками тяжёлых ионов низких энергий.

Руководители работ д.т.н. Л.В.Кравчук, з.д.н. А.Б. Курепин

2.1 РЕФЕРАТ

3 рис. 23 публ.

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ИОНОВ, КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ, ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Комплекс сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН, включающий непосредственно линейный ускоритель, а также каналы транспортировки пучков, является уникальным многофункциональным научно-исследовательским объектом, предназначенным для проведения исследований по физике средних энергий, нейтронных исследований, исследований в области производства радиоизотопов, лучевой терапии и других как фундаментальных, так и прикладных работ. Регулярная работа ускорителя началась в 1993 году и к настоящему времени проведено 113 сеансов общей продолжительностью примерно 41,6 тысяч часов. Хотя проектная энергия и составляет 600 МэВ, в последние несколько лет главным образом по экономическим причинам работы ведутся с энергией до 209 МэВ и интенсивностью протонного пучка до 120 мкА. Но даже с такими параметрами линейный ускоритель ИЯИ РАН и в настоящее время является крупнейшим линейным ускорителем протонов в Европе и одним из крупнейших в мире.

Основной целью исследований в 2014 году было обеспечение работы и модернизация ускорителя и каналов пучков экспериментального комплекса ИЯИ РАН.

Проведено пять сеансов, направленных на разработку технологии получения радиоизотопов и наработку радиоизотопов, на исследования и модернизацию ускорительного комплекса. Проведена модернизация канала транспортировки пучка на установку РАДЭКС экспериментального комплекса, проведена успешная проводка пучка по модернизированному каналу.

Выполнен ряд работ по разработке узлов и элементов ускорителей для ведущих Российских и зарубежных ускорительных центров, таких как ИФВЭ, ОИЯИ, ЦЕРН (Швейцария), GSI (Германия), LANSCE (США), STFC (Великобритания).

2.2 ВВЕДЕНИЕ

Основные усилия отдела ускорительного комплекса в 2015 году были направлены на обеспечение работы линейного ускорителя и его модернизацию. В связи с объединением отделов ускорительного комплекса и экспериментального комплекса в единый отдел ускорительного комплекса возникли задачи по освоению методик транспортировки пучка, модернизации оборудования экспериментального комплекса, а также создании единой системы контроля ускоритель – экспериментальный комплекс.

Среди работ по модернизации ускорителя можно выделить работы по модернизации инжектора протонов. Результатом проведенных исследований стало обеспечение устойчивой работы инжектора на частоте 100 Гц и минимизация внутриимпульсной модуляции фазового портрета пучка а, следовательно, и уменьшение эффективного эмиттанса.

Проведен анализ состояния каналов транспортировки пучка экспериментального комплекса. На основе проведенного анализа было принято решение временно отказаться от режима одновременной транспортировки пучков протонов и ионов Н-минус. При этом отпадает необходимость использования минус единичной оптики и расположения фокусирующих элементов со смещением по вертикали, что упрощает задачу транспортировки пучка, в том числе и с точки зрения устойчивости движения. Появляется возможность реализации традиционного расположения фокусирующих магнитных элементов без их относительного смещения по вертикали. Также отпадает потребность в транспортировке на подъёме пучков протонов и ионов Н-минус по раздельным трассам. В 2014 году основные усилия по модернизации ускорительного комплекса были направлены на совершенствование канала транспортировки пучка с выхода ускорителя до установки РАДЭКС.

В 2014 году в отделе ускорительного комплекса был выполнен ряд инновационных работ по договорам с ведущими Российскими и зарубежными ускорительными центрами по разработке ускорителей, а также разработке и изготовлению элементов ускорителей.

2.3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2014 году проведено пять сеансов по программе получения радиоизотопов и по программе модернизации ускорителя и экспериментального комплекса. Общая продолжительность сеансов составила свыше 1800 часов. Наработка ускорителя по программе получения радиоизотопов в режимах с интенсивным пучком превысила 90000 мкА·часов при среднем токе до 120 мкА и энергии 143 МэВ. Работа на экспериментальный комплекс велась с энергией 209 МэВ с низкой интенсивностью пучка, менее 1 мкА.

Выполнены завершающие исследования из цикла работ по изучению изменения фазового портрета пучка протонов в течение высоковольтного импульса инжектора протонов. Показано, что в результате ряда последовательных усовершенствований инжектора (осуществление бесшумового режима работы дуоплазматрона, установка и настройка высоковольтного ёмкостного делителя ускорительной трубки инжектора, установка нового стабилизированного блока питания разряда источника ионов и уменьшение амплитуды высокочастотных колебаний на вершине высоковольтного импульса) минимизированы изменения эмиттанса протонного пучка в течение высоковольтного импульса инжектора протонов.

На рисунке 1 показана модернизированная система формирования пучка из ионного источника, а также импульсы тока пучка протонов на выходе инжектора до и после модернизации.

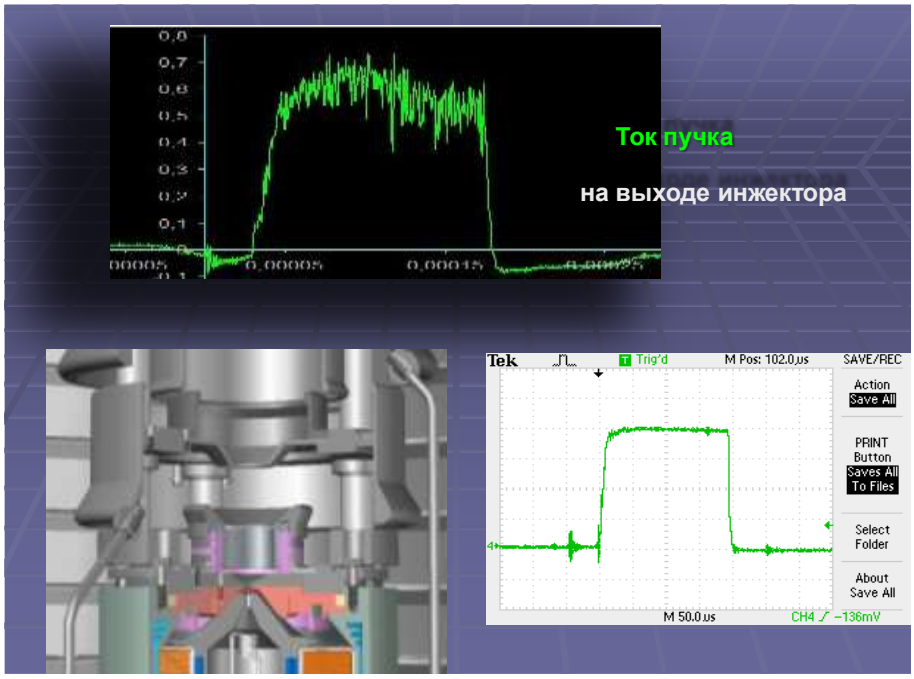


Рис. 1 Модернизированная система формирования пучка из ионного источника, а также формы импульсов тока пучка протонов на выходе инжектора до и после модернизации.

Рисунок 2 демонстрирует поведение фазового портрета пучка протонов на выходе инжектора в течение импульса тока пучка длительностью 200 мкс до (a) и после (b) модернизации. Показано, что в пределах точности измерений отсутствуют изменения формы и положения фазового портрета пучка протонов из инжектора в течение импульса инжектора длительностью 200 мкс. Полученные результаты являются существенными для работы линейного ускорителя ИЯИ РАН, в том числе для минимизации потерь пучка в ускорителе.

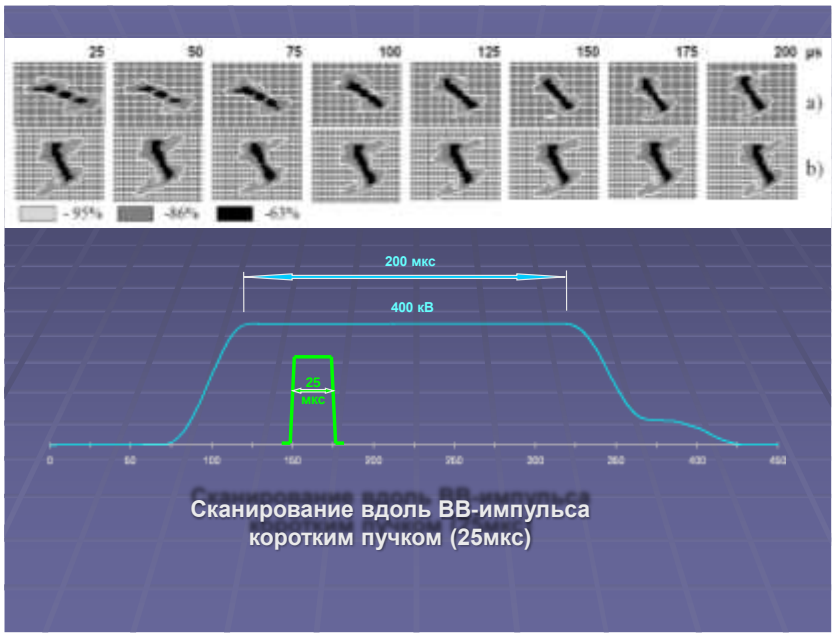


Рис. 2 Границы фазового портрета , содержащие 95%, 86% и 63% общего тока пучка, полученные при сканировании ВВ импульса.

Исторически каналы транспортировки экспериментального комплекса были спроектированы таким образом, чтобы обеспечить одновременную транспортировку пучков протонов и отрицательных ионов водорода, а также деление пучков для работы одновременно на несколько установок. В настоящее время стало очевидно, что реализовать изначально поставленную задачу невозможно как в силу технических причин, так и вследствие недостатка людских и финансовых ресурсов.

На основе проведенного анализа было принято решение временно отказаться от режима одновременной транспортировки пучков протонов и ионов Н-минус. При этом отпадает необходимость использования минус единичной оптики и расположения фокусирующих элементов со смещением по вертикали, что упрощает задачу транспортировки пучка, в том числе и с точки зрения устойчивости движения. Появляется возможность реализации

традиционного расположения фокусирующих магнитных элементов без их относительного смещения по вертикали. Также отпадает потребность в транспортировке на подъеме пучков протонов и ионов Н-минус по раздельным трассам. В течение года выполнен комплекс работ по вертикальному смещению фокусирующих элементов и элементов ионопровода. Модернизирован участок подъема: исключена вторая трасса, что позволило не только упростить канал, в два раза уменьшив количество поворотных магнитов, но и увеличить его апертуру. Выполнена геодезическая съемка положения оборудования и коррекция его положения.

С целью удобства эксплуатации изменено расположение элементов вакуумной системы. Произведена замена восемнадцати из двадцати магниторазрядных насосов, модернизированы посты предварительной откачки.

Начаты работы по модернизации систем диагностики пучка и измерения потерь пучка. Модернизированы профилометры пучка, что позволило обеспечить дистанционное управление их вводом-выводом. Разработана, изготовлена и испытана высокочувствительная электроника для электростатических датчиков положения пучка, а также для индукционных датчиков тока. Разработана, изготовлена и испытана система измерения потерь пучка на основе имевшихся промышленных нейтронных детекторов, появилась возможность наблюдать потери в отдельных импульсах тока пучка. На ускорителе проведены испытания предельных возможностей ионизационных камер экспериментального комплекса, по результатам которых приняты технические решения, разработана, изготовлена и испытана быстрая высокочувствительная многоканальная электроника для регистрации сигналов с ионизационных камер, что также позволило измерять потери в отдельных импульсах. Продемонстрировано, что сигналы с ионизационных камер могут быть использованы в системе быстрой аварийной защиты.

Выполнен ряд работ по модернизации системы блокировок экспериментального комплекса и ее интеграции в систему блокировок ускорителя.

Начато создание единой системы контроля ускоритель – экспериментальный комплекс. Обеспечено управление основными системами экспериментального комплекса, в том числе и системой питания электромагнитными элементами с пульта линейного ускорителя.

Выполненный комплекс работ позволил обеспечить надежную транспортировку ускоренного пучка с энергией 209 МэВ на установку РАДЭКС, а также контроль и управление оборудованием каналов экспериментального комплекса с пульта ускорителя. В качестве примера на рис. 3 приведена информация с пульта ускорителя о профилях пучка непосредственно на входе РАДЭКС.

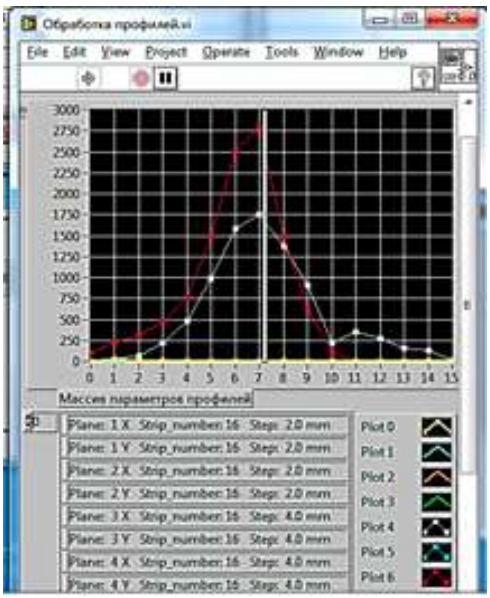


Рис. 3. Профили пучка на входе установки РАДЭКС.

В 2014 году был выполнен ряд инновационных работ по договорам с ведущими Российскими и зарубежными ускорительными центрами по разработке ускорителей, а также разработке и изготовлению элементов ускорителей:

Завершено выполнение НИР по договору с ОИЯИ по теме «Разработка оборудования диагностики пучка для ЛУ-20 и HILAC комплекса NICA ОИЯИ».

Завершено выполнение НИР по договору с Los Alamos National Security, LLC, США по теме «Разработка, изготовление, поставка и наладка двух измерителей формы сгустков (BSM) для линейного ускорителя Лос-Аламосского центра LANSCE». Измерители поставлены в LANSCE, выполнена сборка, наладка и лабораторные испытания измерителей. Измерители подготовлены для установки на ускорителе.

Продолжено выполнение НИР по договору с ЦЕРН, Швейцария по теме «Разработка, изготовление, лабораторные испытания, поставка и наладка измерителя продольного распределения заряда в сгустках для канала транспортировки из ускорителя Linac-4 в бустер». Ведется изготовление оборудования.

Завершено выполнение НИР по договору с ФБГУ ГНЦ ИФВЭ по теме «Оптимизация, разработка и исследование ускоряющих структур и схем фокусировки участков нормально проводящего сильноточного линейного Ускорителя (ЛУ) отрицательных ионов водорода в диапазоне энергий от 18 МэВ до 400 МэВ для проекта ОМЕГА».

Начато выполнение НИР по договору с ФБГУ ГНЦ ИФВЭ по теме «Разработка технического проекта модернизации источника ионов водорода в каскаде ускорителей ЛУ-30 и У-1.5».

Завершено выполнение НИР по договору с лабораторией STFC (Великобритания) по теме «Исследование и разработка систем резонатора фотоинжектора для формирования сгустков электронов сверхвысокой яркости».

2.4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение приведем наиболее важные результаты, полученные коллективом отдела ускорительного комплекса в 2014 г.

На сильноточном линейном ускорителе ИЯИ РАН проведено пять сеансов, направленных на разработку технологии получения радиоизотопов и наработку радиоизотопов, на исследования и модернизацию ускорительного комплекса. Общая продолжительность сеансов в 2014 году составила 1812 часов. Наработка ускорителя по программе получения радиоизотопов составила свыше 90000 мкА·часов при среднем токе пучка до 120 мкА и энергии 143 МэВ.

Проведен комплекс работ по модернизации ускорителя, среди которых можно выделить завершение цикла работ по изучению изменения фазового портрета пучка протонов в течение высоковольтного импульса инжектора протонов. Показано, что в результате ряда последовательных усовершенствований инжектора минимизированы изменения эмиттанса протонного пучка в течение высоковольтного импульса инжектора протонов.

На основе детального анализа оптики и каналов транспортировки пучка экспериментального комплекса было принято решение временно отказаться от режима одновременной транспортировки пучков протонов и ионов Н-минус, сохраняя возможность их транспортировки раздельно. Такое решение существенно упрощает проблему транспортировки, что позволит уменьшить проблемы транспортировки интенсивных пучков. В 2014 году был модернизирован прямой канал от выхода ускорителя до установки РАДЭКС. Выполнена проводка пучка с энергией 209 МэВ по данному каналу, в результате чего подтверждена правильность принятых решений.

Выполнен ряд инновационных работ по договорам с ведущими Российскими и зарубежными ускорительными центрами по разработке ускорителей, а также разработке и изготовлению элементов ускорителей.

2.4 ПУБЛИКАЦИИ

S.E.Bragin, A.V.Feschenko, A.N.Mirzojan, V.A.Moiseev, O.M.Volodkevich. Beam formation for different energies on the target of inr isotope complex with the transversephase space parameters demande. Proceedings of XXIV Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2014, Obninsk, Russia, October 6-10, 2014.

O.Volodkevich, S.Bragin, A.Feschenko, O.Grekhov, Yu.Kiselev, V.Kokhanyuk, V.Mikhailov, A.Mirzojan, V.Serov . Use of fast magnetic beam raster system for INR isotope production facility. Proceedings of XXIV Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2014, Obninsk, Russia, October 6-10, 2014.

E.S. Nikulin, A.S. Belov, O.T. Frolov, L.P. Nechaeva, A.V. Turbabin, V.N. Zubets, “INR RAS LINAC PROTON INJECTOR 100 Hz OPERATION MODE”, Report on Russian Particle Accelerator Conference RUPAC 2014, Obninsk, Russia, 2014.

O.T. Frolov, A. S. Belov, S.E. Golubovskyi, E. S. Nikulin and V. N. Zubets, “Time dependence of ion beam transverse phase-space portrait orientation during linac proton injector pulse”, Report on Russian Particle Accelerator Conference RUPAC 2014, Obninsk, Russia, 2014.

A. S. Belov, “Design of Transversal Phase Space Meter for Atomic Hydrogen Beam Source”, Report on 21th International Symposium on Spin Physics, SPIN 2014, October 20-24, 2014, Beijing, China.

V.V. Fimushkin, A.D. Kovalenko, L.V. Kutuzovaa, Yu.V. Prokofichev, A.S. Belov, V.N. Zubets, A.V. Turbabin, “STATUS OF THE NEW SOURCE OF POLARIZED IONS FOR THE JINR ACCELERATOR COMPLEX”, Report on 21th International Symposium on Spin Physics, SPIN 2014, October 20-24, 2014, Beijing, China.

CAST collaboration (A. S. Belov, S. N. Gninenko from INR RAS), “Search for Solar Axions by the CERN Axion Solar Telescope with 3He Buffer Gas: Closing the Hot Dark Matter Gap”, http://arxiv.org/abs/1307.1985, PRL 112, 091302 (2014).

AEGIS collaboration, (A. S. Belov, S. N. Gninenko, V. A. Matveev from INR RAS), “A moiré deflectometer for antimatter”, Nature Communications, 5, 453, doi:10.1038/ncomms5538, 2014.

AEGIS collaboration, (A. S. Belov, S. N. Gninenko, V. A. Matveev from INR RAS), “Detection of low energy antiproton annihilations in a segmented silicon detector”, JINST, 9, P06020, 2014.

S. Gavrilov, P. Reinhardt-Nickoulin, I. Vasilyev. Electrostatic pick-ups for debunched beams at INR linac. Proceedings of «XXIV Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2014», Obninsk, Russia, October 6-10, 2014.

S. Gavrilov, P. Reinhardt-Nickoulin, I. Vasilyev. Electrostatic pick-ups for debunched beams. 2014 JINST 9 T1007.

S. Gavrilov, A. Feschenko, P. Reinhardt-Nickoulin, I.Vasilyev. Two-dimensional non-destructive diagnostics for accelerators by Beam Cross section Monitor. 2014 JINST 9 P01011.

O.M. Volodkevich, V.N. Zubets, Yu.V. Kiselev, V.S. Klenov. Development of remote control system for H-minus ions source of INR Linac. Proceedings of XXIV Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2014, Obninsk, Russia, October 6-10, 2014.

B.A.Frolov, V.S.Klenov,, V.N.Mihailov, O.M. Volodkevich. Simulation and optimization of ion optical extraction, acceleration and h- ion beam matching systems. Proceedings of XXIV Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2014, Obninsk, Russia, October 6-10, 2014.

K. Floettmann, V. Paramonov. Beam dynamics in transverse deflecting rf structures. Physical Review ST Accelerators and Beams, v 17, 024001, 2014.

J.W. McKenzie, P.A. Goudket, T.J. Jones, B.L. Militsyn, L.S. Cowie, G. Burt, V.V. Paramonov, Cavity design for S-band Photoinjector RF Gun with 400 Hz Repetition Rate, Proc. IPAC 2014, p. 2983, 2014.

V. Paramonov, L. Kravchuk, P. Orlov, K. Floettmann, Deflecting RF Structures with Reduced Level of Aberrations for Transformation of Particle Distribution in the Bunch. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2014, Vol. 11, No. 5, pp. 636–641, ISSN 1547-4771, 2014.

J.W. McKenzie, G. Burt, L.S. Cowie, P. Goudket, T.J. Jones, B.L. Militsyn, V. Paramonov. High Repetition Rate S-band Photoinjector Design for the CLARA FEL, Proc. FEL 2014, 2014

V. Paramonov, Comparison of Normal ConductingHigh Energy Accelerating Structures for a Moderate Operating Frequency, Proc. Linac 2014, MOPP125, 2014

V. Paramonov, Liëmitations for Acceleration of Intermediate Mass Particles with Traveling Wave Structure. Proc. Linac 2014, TUPP121, 2014

B.L.Militsyn, L.S. Cowie, P. Goudket, J.W.McKenzie, G. Burt,T.J. Jone, V.V. Paramonov, A.K. Skasyrskaya, Design of the High Repetition Rate Photocathode Gun for the CLARA project, Proc. Linac 2014, THPP126, 2014

V.V. Paramonov, V. N. Leontiev, A.P. Durkin, A.A. Kolomiets, Single Frequency High Intensity High Energy Normal Conducting Hadron Linac, Proc. RuPAC 2014, THPSC07, 2014

L.V. Kravchuk, V.V. Paramonov, Experience in Research, Development, Construction and Commissioning of Normally Conducting Accelerating Structures. Proc. RuPAC 2014, THX02, 2014

3 Лаборатория исследования редких процессов

Руководитель работ к.ф.-м.н. Н.А.Титов.

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Физика атомного ядра, динамика ядерных и фотоядерных реакций, физика радионуклидов и тяжёлых ионов.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов.

Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов. Руководитель работ д.ф.-м.н. В.С.Пантуев

Поиск редких мюонных процессов с нарушением лептонных чисел (эксперимент Mu2e). Руководитель работ д.ф.-м.н. Р.М.Джилкибаев

Поиск тёмной материи Вселенной. Руководитель работ д.ф.-м.н. Б.М.Овчинников.

Исследование подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях. Руководитель работ д.ф.-м.н. Э.Я.Парьев.

Изучение роли собственной энергии в переходах нейтрон-антинейтрон. Обобщение на ab переходы в поглощающей среде. Руководитель работ к.ф.-м.н. В.И.Назарук.

Статистическая модель образования каонов, гиперонов и гиперядер в аннигиляции антипротона на ядрах. Руководитель работ к.ф.-м.н. Е.С.Голубева.

Исследования релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX. Руководитель работ д.ф.-м.н. В.С.Пантуев.

Барионные системы и ядра с необычными свойствами в топологических (киральных) солитонных и других моделях. Руководитель работ Руководитель работ к.ф.-м.н. В.Б.Копелиович.

Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на установках НСВП-ТРОНС ОЭФ ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР-2М ЛНФ ОИЯИ. Руководитель работ д.ф.-м.н. Ю.В.Рябов.

Исследование и подготовка физ. обоснования интенсивного источника нейтронов для экспериментальных целей. Руководитель работ к.ф.-м.н. Г.Н.Вялов.

Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах. Руководитель работ к.ф.-м.н. С.Г.Лебедев.

Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных резонаторов (НФР). Руководитель работ к.ф.-м.н. С.Г.Лебедев.

Поиск массы нейтрино прямым методом в бета–распаде трития. Руководители работ чл.-корр. РАН И.И.Ткачёв, д.ф.-м.н. В.С.Пантуев, к.ф.-м.н. Н.А.Титов.

Изучение космических лучей сверхвысоких энергий международной коллаборацией «Telescope array». Руководитель работ чл.-корр. РАН И.И.Ткачёв

Поиск конверсии мюона в электрон на ядрах и проверка фундаментальных законов сохранения лептонных чисел. Руководитель работ д.ф.-м.н. Джилкибаев Р.М

Исследование взаимодействия нейтронов с ядрами на импульсных нейтронных пучках. Руководитель работ д.ф.-м.н. Рябов Ю.В.

3.1 Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов

Руководители темы: д.ф.-м.н. В.С.Пантуев, к.ф.-м.н. Н.А. Титов

Исполнители темы:

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. Е.В. Гераскин

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. С.В.Задорожный

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. А.А. Голубев

Научный сотрудник к.ф.-м.н. А.А. Нозик

Младший научный сотрудник Н.А. Лиховид

Заведующий сектором В.И. Парфёнов

Ведущий инженер А.И. Белесев

Научный сотрудник А.К. Скасырская

3.1 Реферат

МАССА НЕЙТРИНО, БЕТА РАСПАД, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск массы нейтрино в бета распаде. В 2014 году проведены предварительные измерения бета-спектра с целью получения оценок чувствительности установки для поиска тяжёлых нейтрино. Проведена модернизация высоковольтной системы с целью прецизионного контроля необходимых потенциалов. Разработан, изготовлен и испытан новый вариант наконечника электронной пушки с катодом из золотой фольги, работающий в отражённом свете. Измерены спектры потерь электронов на изотопах водорода протии и дейтерии при энергии 14 кэВ, 17 кэВ и 19 кэВ. Полученные результаты обрабатываются. Проведена обширная теоретическая работа по оценке влияния различных систематических эффектов на измеряемый спектр электронов. Постоянно проводились модернизация и ремонт отдельных элементов вакуумной и крио систем.

3.1 Введение

Стандартная модель физики частиц не полна. Об этом свидетельствуют ненулевая масса нейтрино и существование темной материи во Вселенной. Природа частиц темной материи неизвестна. К числу наиболее естественных кандидатов на роль темной материи относятся стерильные нейтрино. Эти частицы появляются в большинстве расширений Стандартной модели на случай массивных нейтрино. Стерильные (правые) нейтрино это

нейтральные лептоны. Являясь SU(2) синглетами они не участвуют с слабых взаимодействиях. Однако, за исключением специальных вырожденных случаев, они смешиваются с активными (левыми) нейтрино и приводят к появлению дополнительных массовых состояний в спектре.

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

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

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

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

3.1 Полученные в 2014 году результаты

3.1.1 Проведение методических измерений

Измерены спектры потерь электронов на изотопах водорода протии и дейтерии при энергии 14 кэВ, 17 кэВ и 19 кэВ. Из полученных спектров восстанавливаются функции возбуждения молекул водорода, Рис.1. Такого рода измерения необходимы для получения оценки влияния рассеяния электронов на рабочем газе на измеряемый энергетический спектр. Процесс обработки данных находится в промежуточной стадии, готовится статья с результатами измерений.

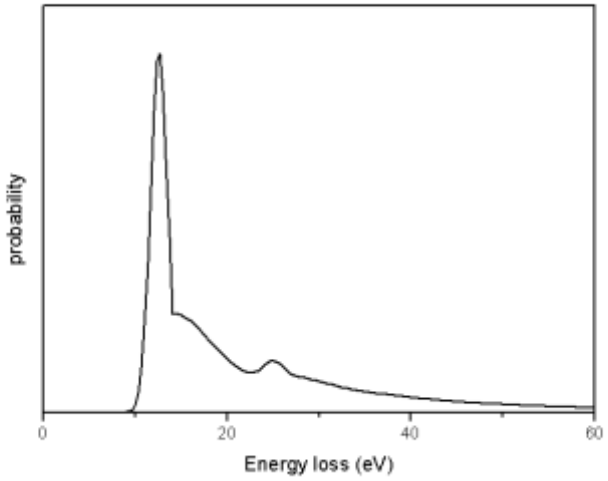


Рисунок 1 - Предварительные результаты по восстановлению функции возбуждения и ионизации молекул водорода H2, полученные методом рассеяния электронов с энергией 19 кэВ. Пик справа соответствует двукратному рассеянию электронов на молекулах H2

3.1.2 Предварительные оценки верхнего предела на возможную примесь стерильных нейтрино в спектре бета-электронов в интервале масс до 3 кэВ

Проведены предварительные измерения бета-спектра с целью получения оценок чувствительности установки для поиска тяжёлых нейтрино, Рис.2. Выполнен ряд экспериментальных измерений и оценок по выявлению влияния систематических эффектов, таких, как рассеяние электронов на рабочем газе, точность определения функции пропускания. Готовится полное описание проекта эксперимента.

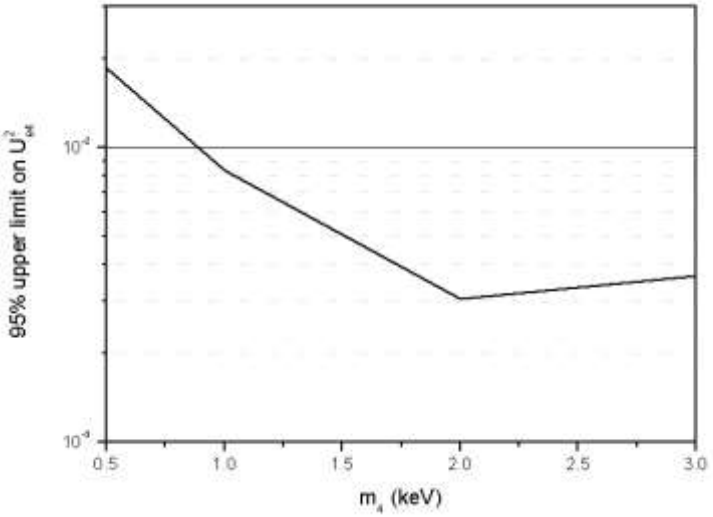


Рисунок 2 - Результаты предварительных измерений на предел параметра смешивания электронного и стерильного нейтрино в сеансе 2014г. Приведён 95% верхний предел в зависимости от массы тяжёлого нейтрино.

3.1.3 Модернизация установки «Троицк ню-масс»

В 2014 г. проведена модернизация высоковольтной системы с целью прецизионного контроля необходимых потенциалов до 30 кВ с точностью +/- 0.1 В. В частности, выполнена взаимная калибровка двух высокоточных делителей и измерены их отклонения с изменением температуры. Разработан, изготовлен и испытан новый вариант наконечника электронной пушки с катодом из золотой фольги, работающий в отражённом свете. Использование фольги, а не полупрозрачной напылённой плёнки существенно повышает устойчивость к парам ртути, которые проникают из ртутных диффузионных насосов. Проведены измерения энергетического разрешения спектрометра с использованием монохроматора света от дейтериевой лампы, которая используется в электронной пушке. Был заменён ряд вакуумных датчиков давления, установлен новый универсальный блок питания магнито-разрядного насоса.

3.1 Заключение. Наиболее важные достижения в 2014 году

- На установке проведено два сеанса измерений.

- Проведены оценочные измерения бета спектра электронов в интервале до 5 кэВ ниже предельной энергии.

- Получены предварительные оценки чувствительности на примесь стерильных нейтрино с массами в интервале 1-3 кэВ.

- Проведены измерения рассеяния электронов на изотопах водорода H2 и D2 с энергией 14-19 кэВ.

- Изготовлена и испытана электронная пушка с высоким энергетическим разрешением, лучше 0.3 эВ с энергией электронов до 20 кэВ.

- Проведены измерения с монохроматором света для электронной пушки.

3.2 Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов

Руководитель темы к.ф.-м.н. Н.А. Титов

Исполнители темы:

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. Д.Н. Абдурашитов

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. Е.В. Гераскин

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. А.А. Голубев

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. С.В.Задорожный

Научный сотрудник к.ф.-м.н. А.В. Лохов

Заведующий сектором В.И. Парфёнов

3.2 Реферат

МАССА НЕЙТРИНО, БЕТА РАСПАД, СПЕКТР ВОЗБУЖДЕНИЯ, МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ИОН, АРГОН-37, СТАТИСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ.

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск массы электронного нейтрино в электронном распаде трития. Рассматривалась применимость простой модели, связывающей ширину ротовибрационного пика в спектре возбуждения остаточного молекулярного иона, возникающего при распаде молекулярного трития, и «нулевых» колебаний материнской молекулы. Показано, что данная модель не удовлетворяет требованиям точности, предъявляемым к параметрам спектра возбужденных состояний. Были подготовлены предложения по использованию изотопа Аргон-37 для исследования условий хранения распадных электронов в объёме основного спектрометра. Разрабатывались статистические критерия для выявления указаний на новую физику в спектре бета-распада трития (стерильные нейтрино, степ-эффект)

3.2 Введение

Впечатляющий прогресс исследования нейтринных осцилляций надежно продемонстрировал отличие от нуля массы нейтрино и позволил измерить расщепление массовых состояний нейтрино. При этом абсолютная шкала масс, т.е. общий сдвиг массовых состояний, остаётся неизвестной. Установление абсолютной шкалы массовых состояний нейтрино представляет важнейшее значение как для физики частиц, поскольку позволяет

сделать выбор между различными моделями генерации массы, так и для космологии, где сумма масс всех типов нейтрино определяет динамику эволюции Вселенной.

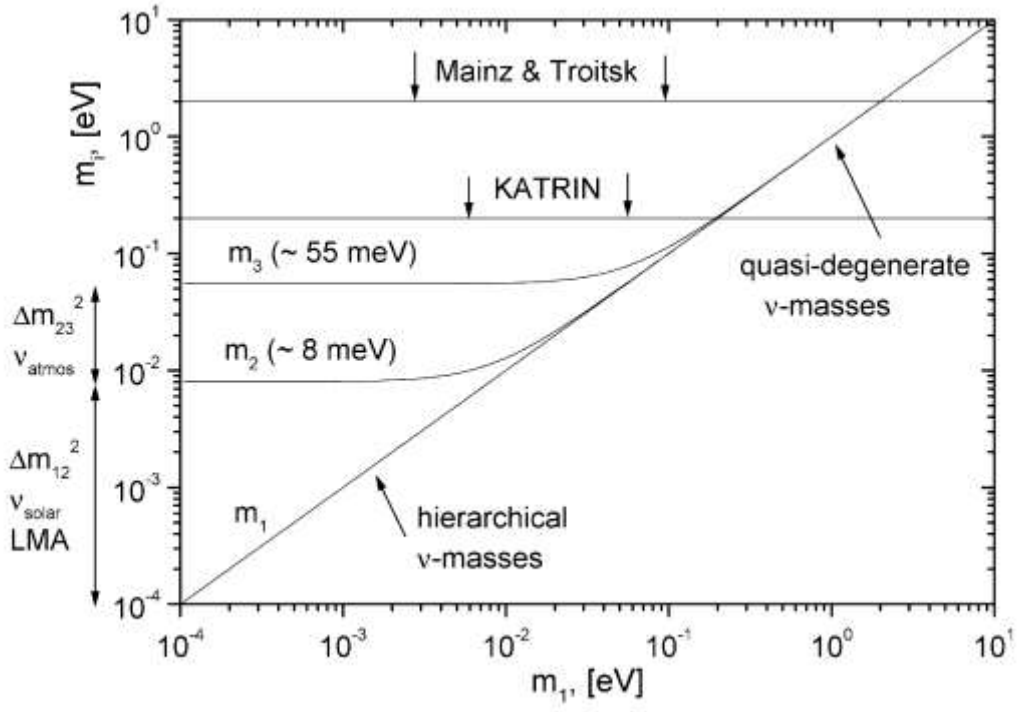


Рисунок 1 - Масса «массовых состояний» нейтрино, как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия).

При исследовании абсолютной шкалы масс в лабораторных экспериментах, в обсуждаемом в настоящее время диапазоне выше 0,1 эВ, все типы нейтрино имеют одинаковую массу (см. рис.1) и наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино.

Наиболее продвинутыми в экспериментальном отношении лабораторными методами поиска массы электронного нейтрино является поиск двойного бета-распада (Майорановские нейтрино) и исследование кинематических ограничений в спектре одиночного бета-распада (Майрановские и Дираковские нейтрино). В свою очередь, в поиске массы нейтрино по кинематическим ограничениям в конце спектра бета-распада лучшая чувствительность достигнута в экспериментах с тритием в Майнце и Троицке. Опубликованы близкие ограничения на верхний предел массы на уровне примерно 2 эВ /1,2/. В ближайшем будущем, в Технологическом институте в Карлсруэ (KIT, Karlsruhe, Germany) будет запущена новая установка по проекту КАТРИН, которая позволит поставить верхний предел на массу электронного антинейтрино на уровне 0,2 эВ /3/.

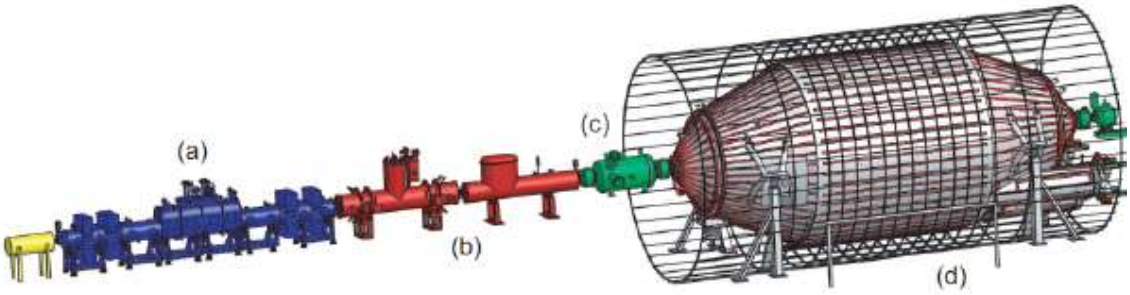


Рисунок 2 - Установка КАТРИН. a – безоконный газовый источник трития, b – канал транспортировки электронов с дифференциальной откачкой, c – предварительный спектрометр, d – основной спектрометр, e – сегментированный детектор /3/.

Чувствительность болометрических экспериментов по бета-распаду рения-187 /4/ пока остается существенно ниже возможностей КАТРИН, но надо отметить наличие амбициозных планов проекта MARE /5/. Эксперимент по К-захвату в гольмии-163 находится на начальной стадии разработки /6/.

Из изложенного выше следует, что на обозримое будущее, в классе экспериментов по поиску кинематических эффектов массы нейтрино, проект КАТРИН должен дать лучшее ограничение на массу электронного антинейтрино.

Одновременно проект КАТРИН является полигоном для применения самых передовых экспериментальных технологий в вакуумной, криогенной технике, технике высоких напряжений, количественном анализе изотопных смесей и т.д.

Группа ИЯИ РАН участвует в проекте КАТРИН с момента формирования предложения эксперимента, основываясь на опыте работы с установкой «Троицк ню-масс», которая является прототипом установки КАТРИН.

3.2.1 Проект КАТРИН

3.2.1.1. Состояние проекта КАТРИН на конец 2014 года

Из основных узлов установки КАТРИН: торцевая секция (RS), безоконный газовый источник (WGTS), фронтальная транспортная секция (DPS-2F), криогенная откачная секция (CPS) находятся в разной степени изготовления. Предварительный спектрометр (PS) был изготовлен первым и его испытания завершены. Основной спектрометр (MS) и детектор (D) смонтированы и проходят совместные тесты.

В настоящее время начало запуска установки планируется на середину 2016 года. Указанная дата определяется сроком готовности WGTS.

3.2.1.2 Новые направления исследований, возникшие в 2014 году

Выявлена проблема, которая не возникала ранее, состоящая в эманация Радона-219 из сварных швов. Электроны, возникающие при распаде радона, захватываются в ловушки в объеме спектрометра и производят вторичную ионизацию до своей полной остановки. В результате возникают интенсивные серии фоновых сигналов. При высоком вакууме в спектрометре такие серии сливаются в непрерывный фон на уровне до 800 Гц. К непропорциональному увеличению фона Радона-219 привела, по-видимому, необходимость значительно усилить сварные швы при увеличении размеров установки по сравнению с аналогичными установками в Майнце и Троицке. Для выработки методов устранения фона ловушечных электронов в настоящее время проводится детальное изучение условий удержания электронов в ловушках в спектрометре.

3.2.1.3 Работы по проекту КАТРИН и ИЯИ РАН

3.2.1.3.1 Исследование спектра ровибрационных состояний

Процесс извлечения данных об эффективной массе электронного антинейтрино в бета-распаде трития состоит составлении баланса утечек и добавок кинетической энергии образующейся бета-частицы. Результирующая утечка, после проверки на правильную сигнатуру в спектре бета-частиц, приписывается массе покоя нейтрино. Ниже рассмотрена часть вопросов, связанных с молекулярной природой источника трития.

При вылете быстрой бета-частицы остаточный молекулярный ион (T3He)+ или (H3He)+ оказывается в состоянии ротационного и вибрационного возбуждения. Спектр возбужденных состояний неоднократно рассчитан теоретически, но никогда не исследовался экспериментально /7,8/. Вместе с тем, дисперсию спектра ровибрацинных состояний необходимо знать с точностью лучше 1%. Недавно Р.Г.Х. Робертсоном было отмечено, что в первом приближении ширину спектра ровибрициионных состояний можно приписать движению распадающегося атома за счет нулевых колебаний начальной двухатомной молекулы /9/:

Среднеквадратичная ширина спектра состояний

	$\sigma(T^3He)^+$, eV	$\sigma(H^3He)^+$, eV
A.Saenz e.a.	436	379
Zero vibration	410	349

Было высказано предположение, что остающаяся разница в 4 - 8% процентов может быть связана с неучётом ротационного возбуждения исходной молекулы.

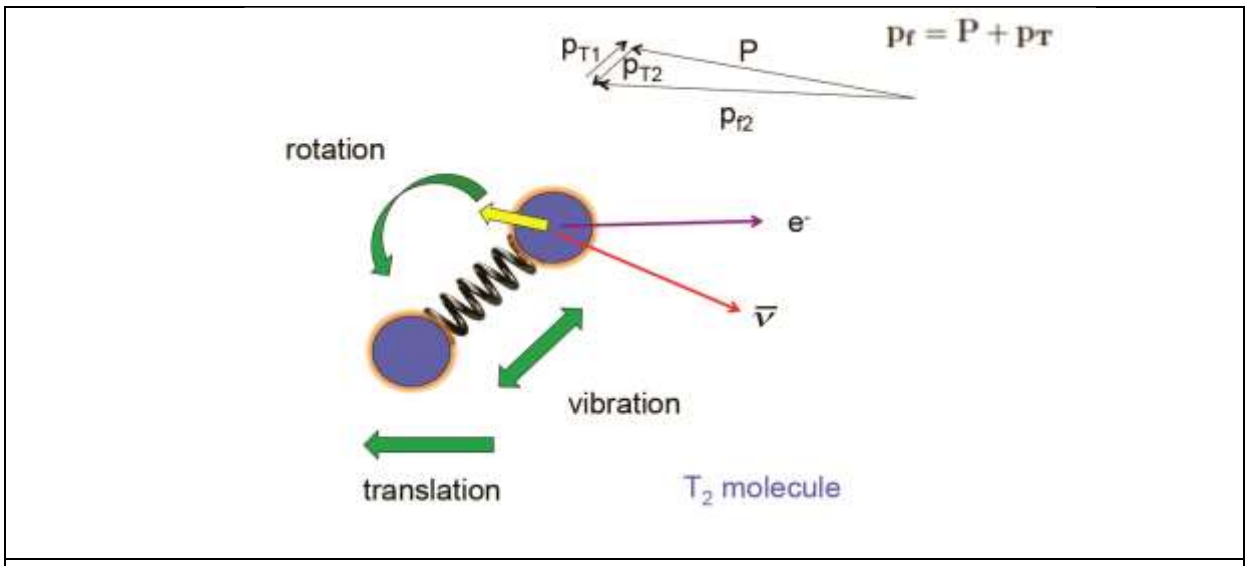


Рисунок 3 - Бета-распад молекулы T2 находящейся в состоянии «нулевых» колебаний (не зависят от температуры) и ротационных возбуждений в соответствии с температурой источника. Из работы /9/.

Нами была отмечена возможность проверки данной картины на спектрометре «Троицк ню-масс» при замене отдачи от вылета бета-частицы на отдачу от рассеяния на большой угол электрона соответствующей энергии. Анализ предложения велся по двум направления. Были проанализированы поправки связанные с нулевыми ротационными состояниями и с непараболическими поправками к потенциалу взаимодействия в T-T молекуле и показано, что они не описывают имеющееся расхождение. Соответствующий доклад был представлен на XXVII совещание по проекту КАТРИН. Кроме того были проанализированы имеющиеся экспериментальные данные по рассеянию электронов на молекуле T2. Как оказалось, экспериментально было зафиксировано, что нулевым колебаниям молекулы T2 соответствует чисто Гауссовская форма спектра потер энергии рассеивающегося электрона в том случае, если энергия отдачи лежит выше порога диссоциации молекулы («квазисвободный режим») /10/.

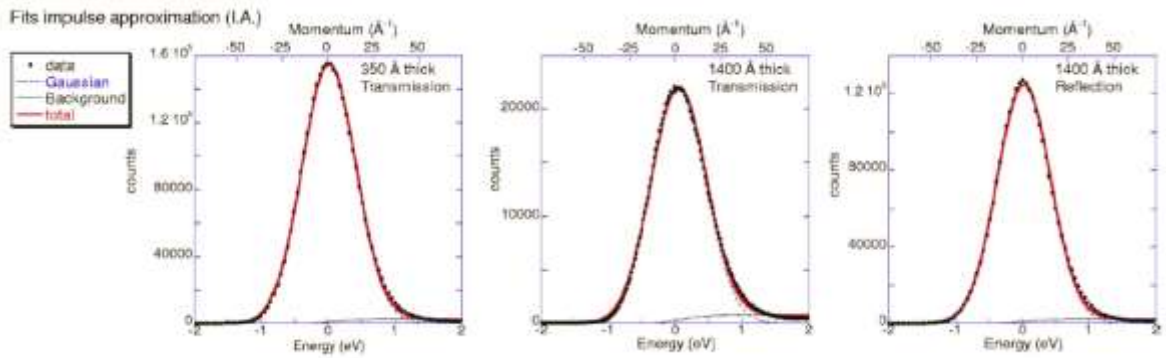


Рисунок 4 - Уширение энергетического спектра пучка электронов вследствие рассеяния на молекуле T2. Из работы /10/.

Такая картина качественно не согласуется с расчетным спектром при отдаче в бета-распаде. Принимая во внимание тот факт, что в случае бета-распада энергия отдачи лежит ниже или чуть выше энергии диссоциации молекулярных ионов (T3He)+ или (H3He)+, напрашивается вывод о том, что имеющееся расхождение в оценке ширин возбужденных состояний связано со структурой возбужденных состояний конечных молекулярных систем.

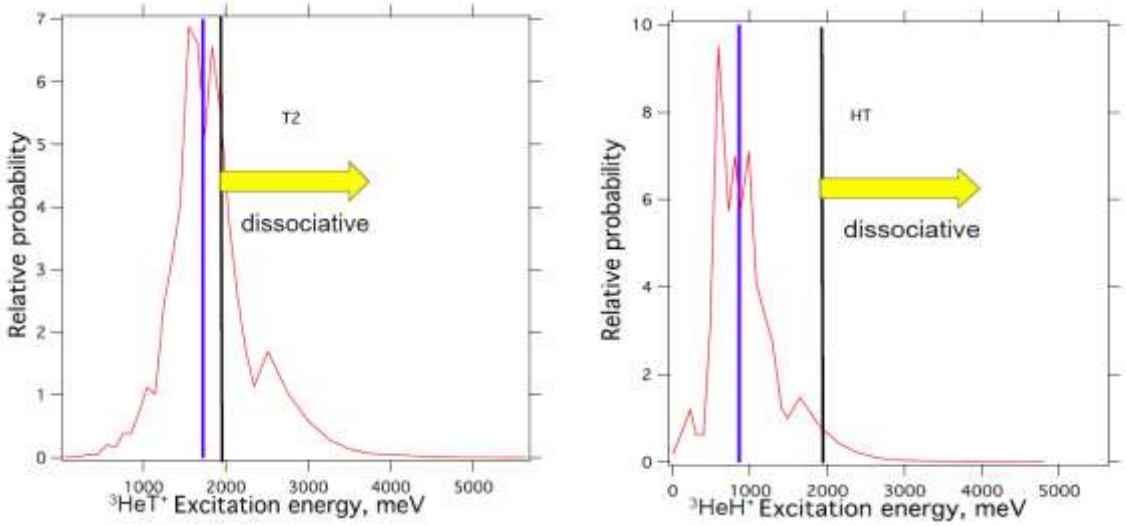


Рисунок 5 - Расчетный спектр возбуждений. Синяя линия - средняя энергия, черная - порог диссоциации. Из работы /9/.

3.2.1.3.2 Исследование накопления электронов в спектрометре

Как было указано выше, определяющим источником фона в основном спектрометре является распад Радона-219 и Радона-220. Имеются планы для исследований искусственно вводить в спектрометр повышенное количество Радона-220.

Нами было предложено вместо Радона-220 вводить в спектрометр контролируемые количества Аргона-37. Преимущество Аргона-37 состоит в отсутствии долгоживущих продуктов распада. На XXVII совещание по проекту КАТРИН был представлен доклад, описывающий технологию получения Аргона-37 и демонстрирующий отсутствие других радиоактивных примесей в полученных образцах.

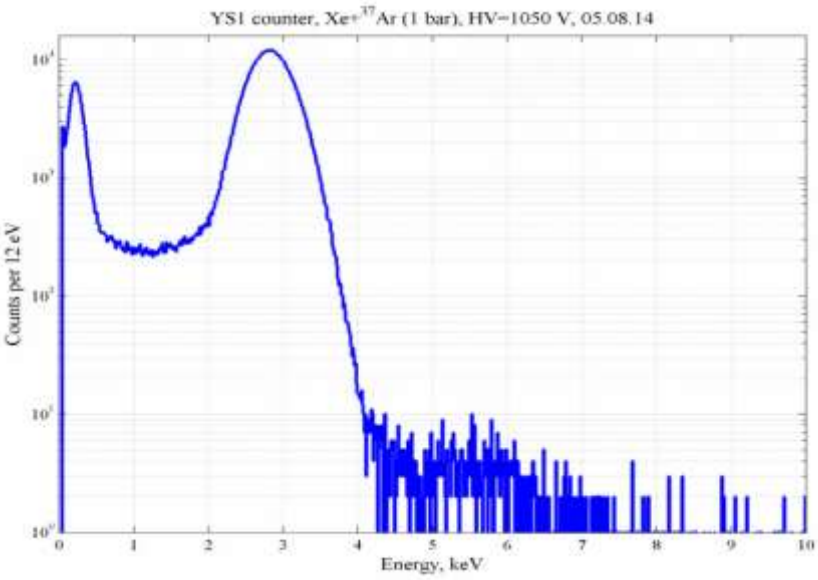


Рисунок 6 - Спектр электронов источника Аргон-37. Присутствует только линия 2,6 кэВ Аргона-37

3.2.1.3.3 Разработка статистических критериев выделения возможных указаний на новую физику в бета-распаде трития

В качестве дальнейшей программы исследований на установке КАТРИН рассматривается поиск сигнала от стерильных нейтрино с массой в области кэВ. Для этого необходимо исследовать спектр бета-распада трития в широком интервале энергии электронов. Уровень примеси нового массового состояния может находиться на уровне 10^{-5} — 10^{-7}. При этом имеющаяся точность описания основного распада может оказаться недостаточной. Необходимо разработать методы анализа, позволяющие обходить данную проблему. Нами предложены новые подходы, основанные на методе квазиоптимальных моментов. Промежуточные результаты доложены на конференции PANIC 2014.

3.2 Список литературы

1. C. Kraus et al. Eur. Phys. J. C 40, 447–468 (2005)

2. V.M.Lobashev. Nuclear Physics A, Volume 719, 19 May 2003, pp. 153-160.

3. arXiv: hep-ex 0109033, 21 Sept 2001. http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7090.pdf

4. M. Sisti et al., NIM A520 (2004) 125

F.Gatti, Nucl. Phys. B91 (2001) 293

5 http://crio.mib.infn.it/wig/silicini/proposal/proposal_MARE_v2.6.pdf

6.http://artico.mib.infn.it/numass2013/images/slides/Gastaldo_ECHo_experiment_NuMass2013.pdf

7. A.Saenz, S.Jonsell, Froelich; PRL 84, 242 (2000).

8. N. Doss, J. Tennyson, A. Saenz, and S. Jonsell Phys. Rev. C 73, 025502 (2006)

9.https://neutrino.ikp.kit.edu/katrin/images/0/09/Hamish-Robertson-Phenomenology-of-the-Final-State.pdf

10. M. Vos and M. R. Went Phys. Rev. B 74, 205407 (2006)

Конференции и рабочие совещания.

1. A.V. Lokhov, F.V. Tkachev Statistical criteria for possible indications of new physics in tritium beta-decay spectra. PANIC 2014

XXVI совещание по проекту КАТРИН:

2. С.В. Задорожный Status of Troitsk nu-mass setup

3. А.В. Лохов Sensitivity limit method: confidence intervals with apriori parameters bounds

Рабочее совещание по исследованию спектра конечных состояний:

3. Н.Титов "Troitsk ν-mass“ KATRIN activity – 2014

XXVII совещание по проекту КАТРИН:

4. А.В. Лохов Possible test of T2-molecule initial states spectrum.

5. Д.Н. Абдурашитов Ar-37 production for the test purposes.

3.2 Публикации

1. F.M. Fraenkle, F. Glueck, K. Valerius, K. Bokeloh, A. Beglarian, J. Bonn, L. Bornschein, G. Drexlin, F. Habermehl, M.L. Leber, E.W. Otten, M. Steidl, T. Thuemmler, C. Weinheimer, J.F. Wilkerson,, J. Wolf, S.V. Zadorozhny Penning discharge in the KATRIN pre-spectrometer F M Fränkle *et al* 2014 *JINST* 9 P07028 doi:10.1088/1748-0221/9/07/P07028

3.2 Результаты

1. Рассмотрены возможности исследования спектра ровибрацинных состояний в распаде молекулы T2.

2. Подготовлены предложения по применению изотопа Аргон-37 для исследования условий хранения электронов распада в основном спектрометре.

3. Разрабатывались критерии выделения аномалий в спектре бета-распада трития (стерильные нейтрино, степ – эффект).

3.2 План Российской группы в 2015 г.

Разработка критериев выделения аномальных структур в спектре бета – распада трития (стерильные нейтрино).

Расчет систематических эффектов, связанных с рассеянием электронов в поверхностном слое детектора.

3.3 Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «mu2e»

3.3 РЕФЕРАТ

мюон, редкие распады мюона, нарушение лептонных чисел

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы сохранения лептонных квантовых чисел. Обнаружение связи между семействами лептонов будет свидетельством существования новых физических явлений вне рамок Стандартной модели. Цель работы - поиск процесса конверсии мюона на ядре, идущего с нарушением закона сохранения лептонных чисел с уровнем чувствительности превышающем на пять порядков современное экспериментальное ограничение, в международном эксперименте Mu2e проводимом в FNAL (Chicago) США. Основная идея эксперимента предложена (1989 г.) и разработана сотрудниками института ядерных исследований. Повышение уровня чувствительности в эксперименте Mu2e на несколько порядков может привести к обнаружению новых взаимодействий, порождаемых новыми тяжелыми частицами с массами ≈1000 ТэВ, которые невозможно получить в ближайшем будущем на ускорителях. Основная цель группы из ИЯИ РАН заключается в экспериментальном исследовании основного элемента калориметра на основе кристалла LYSO с новым фото детектором APD (Avalanche Photodiode) большой площади и разработке новой концепции эксперимента (3in1), позволяющей поиск трех редких распадов μ->e конверсии, μ->eγ и μ->eee на одной установке.

3.3 Введение

Поиск явлений и процессов, выходящих за пределы Стандартной модели, представляет собой одну из главных задач современной физики. Поиск возможен как в экспериментах на коллайдерах с максимально доступной энергией (LHC, Tevatron), так и в прецизионных экспериментах, осуществляемых при относительно низких энергиях. При этом два указанных класса экспериментов дают взаимно дополняющую информацию. Важнейшей проблемой, стоящей перед прецизионными экспериментами, является обнаружение процессов, идущих с нарушением закона сохранения лептонных квантовых чисел. В то время, как Стандартная модель не содержит в себе механизмов нарушения электронного, мюонного и тау лептонного чисел, они естественным образом возникают практически во всех теориях, расширяющих Стандартную модель. Наибольший прогресс достигнут в экспериментальном исследовании редких мюонных процессов, идущих нарушением электронного и мюонного квантовых чисел. На рисунке 1 представлены результаты экспериментов по измерению верхнего предела на относительную вероятность процессов идущих с нарушением лептонного квантового числа.

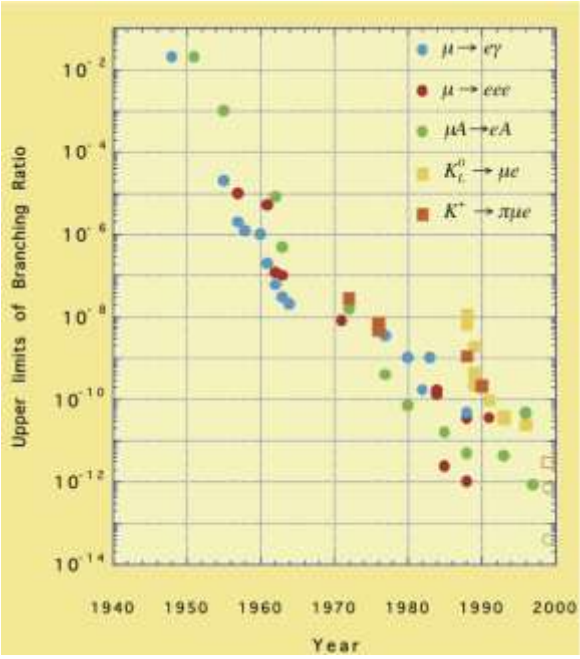


Рисунок 1 - Результаты экспериментов по измерению верхних ограничений трех мюонных и двух каонных процессов идущих с нарушением лептонных чисел.

Современная теория элементарных частиц не может предсказать процесс наиболее чувствительный к поиску нарушения лептонных чисел. Поиск трех редких мюонных процессов (μ->e конверсии, μ->eγ и μ->eee) чувствительных к трем возможным новым взаимодействиям лептон-кварк, лептон-фотон и лептон-лептон на базе одной установки повышает вероятность открытия новых физических явлений связанных с нарушением лептонных чисел. Эксперимент Mu2e по поиску процесса конверсии мюона на ядре был принят DOE (Department of Energy, US) 11 ноября 2009.

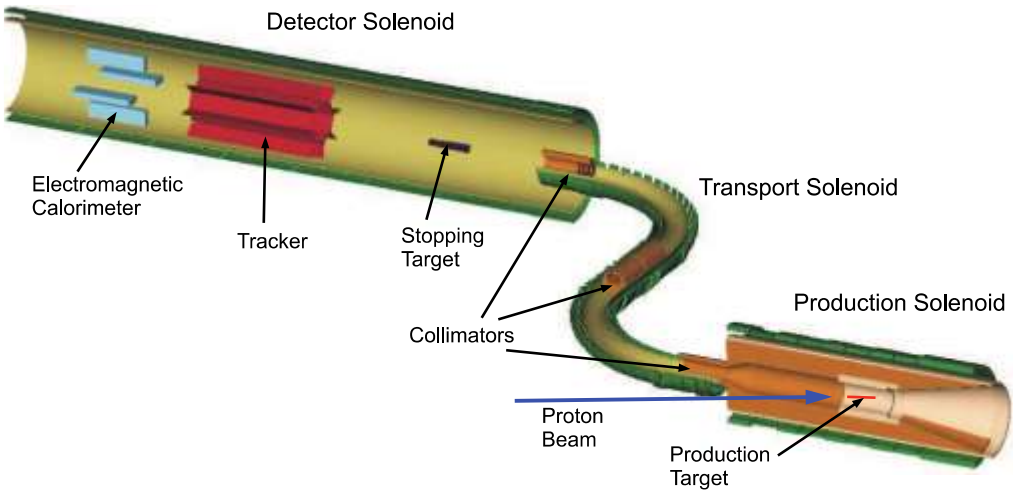


Рисунок 2 - Эксперимент Mu2e по поиску процесса конверсии мюона на ядре.

3.3.1 Состояние эксперимента «Mu2e» на конец 2014 года

В 2014 г. завершена стадия CD-1 эксперимента: разработка концепции, оценка стоимости эксперимента. Подготовлен TDR (Technical Design Report), который завершает эту работу. Одобрен и утвержден бюджет следующей стадии CD-2/3 эксперимента комитетом DOE США в 2014 г. Планируется завершить стадию CD-2 в 2015 г. и переход к стадии CD-3 завершающей создание установки.

3.3.2 Разработка новой концепции (3in1) эксперимента Mu2e

Разработка новой концепции эксперимента (3in1) позволит вести поиск трех редких процессов (μ->e конверсии, μ->eγ и μ->eee) на одной установке с одним общим набором модулей детекторов. Переход от одного из трех экспериментов к другому осуществляется простой перестановкой модулей. Велись работы по разработке нового метод поиска редких мюонных процессов, основанного на использовании пульсирующего протонного пучка и объединении источника мюонов, системы формирования пучка и детектирующей части установки в одну магнитную систему с неоднородным полем. Результаты детального моделирования искомых процессов и основных фонов процессов показывает, что разработанный метод повышает чувствительность эксперимента по поиску процессов (μ->e конверсии, μ->eγ и μ->eee) по сравнению с существующим уровнем в 105 , 300 и 100 раз соответственно.

3.3.3 Исследования основного элемента калориметра на основе кристалла LYSO

В рамках темы создана установка для исследования основных характеристик кристаллов LYSO, необходимых для прототипа калориметра эксперимента Mu2e. Экспериментальная установка с системой съема информации на основе КАМАК, показана на рисунке 3. Установка создавалась с помощью отделов КОРЭ (О. Каравичев, В. Постоев), ОЭФ (Ю. Рябов) и лаборатории ЛФЯР (В. Недорезов, А. Русаков).

Использование двух фотоприемников для регистрации света в кристалле LYSO, позволяет провести измерения основного вклада в энергетическое разрешение с помощью радиоактивного источника. Измерение разницы A1 – A2 и суммы A1 + A2 амплитуд сигналов APD позволяет оценить стохастический вклад в разрешение калориметра, обусловленный флуктуациями фото статистики и шумами электроники, в области низких энергий. Измерение основных характеристик кристаллов LYSO сопряжено с трудностями, связанными с собственным свечением в кристалле от радиоактивных примесей редко земельного элемента Lu. Интенсивность собственных сцинтилляций составляет величину равную 500 Hz/cm3. Для исследуемого кристалла LYSO:Ce (95% Lu/ 5% Y) размером 3x3x5 cm3 , производства

PROTEUS (USA), частота собственных сцинтилляций составляет величину - 18 kHz. Энергетический спектр этих сцинтилляций лежит в области до 1 МэВ.

Основную характеристику кристалла - энергетическое разрешение можно измерить при помощи радиоактивных гамма-источников с интенсивностью превышающих в несколько раз частоту собственных сцинтилляций или с помощью космических мюонов.

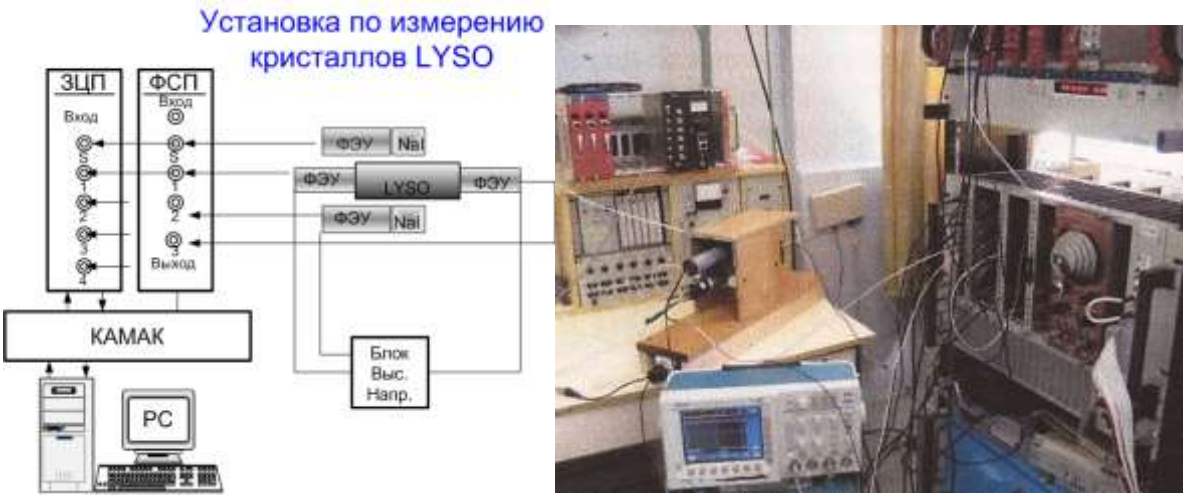


Рисунок 3 - Схема установки (слева) и внешний вид установки (справа) для исследования свойств кристаллов LYSO .

Использование APD позволит улучшить энергетическое разрешение калориметра практически в два раза, по сравнению с ФЭУ, за счет увеличения квантовой эффективности фотодетектора. Квантовая эффективность APD больше, чем фото-электронного умножителя (ФЭУ) в 3-3.5 раза и составляет величину равную 70-80%. Для работы с APD необходим быстрый малошумящий зарядочувствительного предусилитель-формирователь. На рис. 4 показана схема предусилителя и внешний вид сборки 2х каналов предусилителя-формирователя с высоковольтным фильтром.

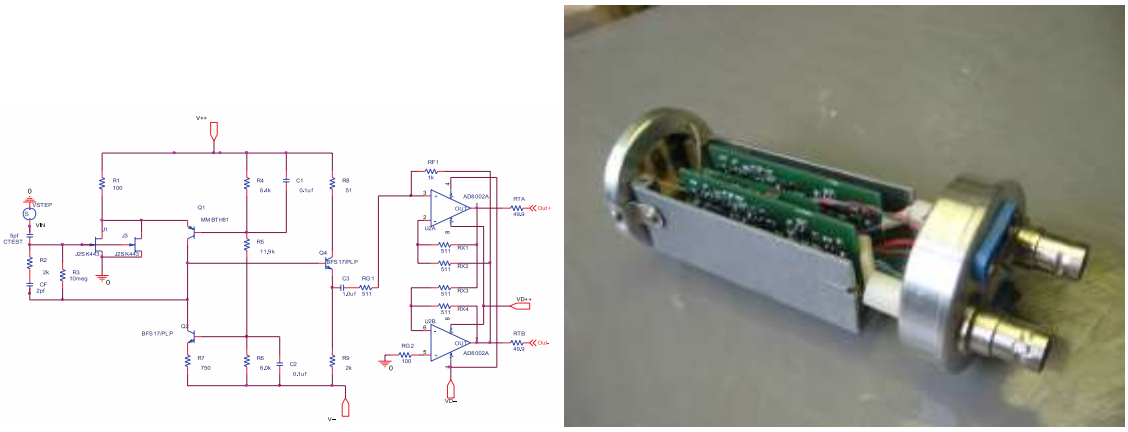


Рисунок 4 - Схема предусилителя (слева) и внешний вид сборки 2х каналов предусилителя-формирователя с высоковольтным фильтром.

Спектр ионизационных потерь космических мюонов в кристалле, смоделированное с помощью GEANT3, хорошо описывается распределением Ландау с максимумом потерь равным 28 МэВ (рис. 5).

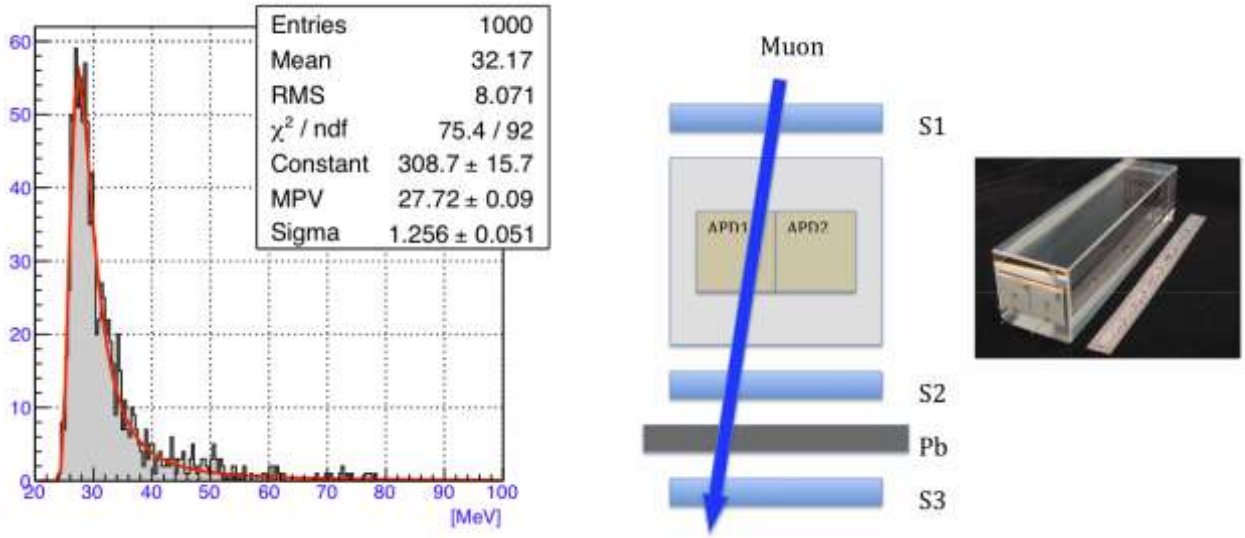


Рисунок 5 - Спектр ионизационных потерь космических мюонов в кристалле (а). Схема измерения разрешающей способности кристалла LYSO с помощью космических мюонов (б) и внешний вид кристалла LYSO с приклеенными APD1-2 (в).

Относительная разрешающая способность кристалла LYSO ($\sigma E/E$) может быть оценена из спектра (A1-A2)/(A1+A2) (рис. 6 б) и составляет величину равную $\sigma E/E = 0.18\%/\sqrt{E}$, где E – наиболее вероятная энергия выделенная в кристалле мюоном равная 0.028 ГэВ.

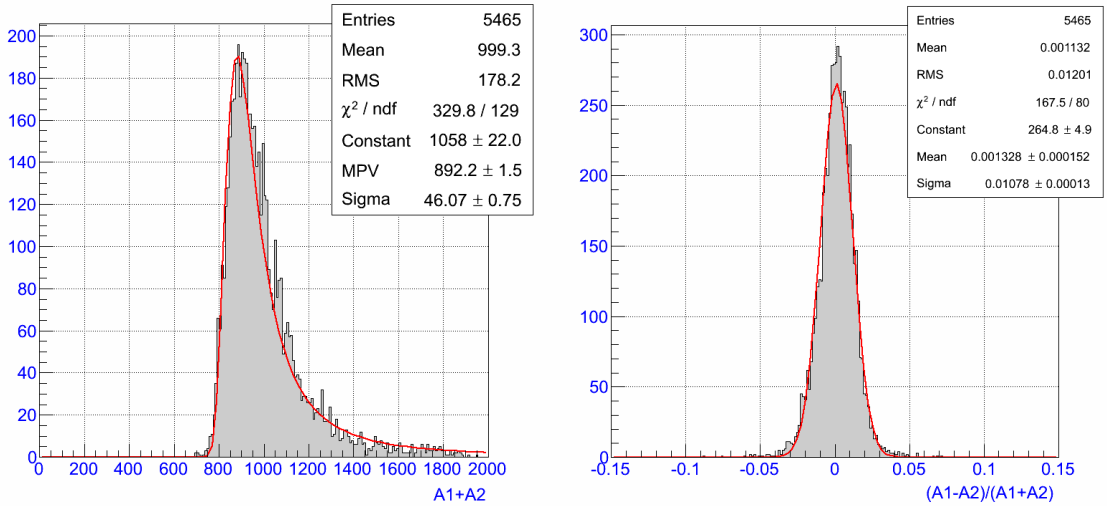


Рисунок 6 - Спектр суммы (а) и относительной разности (б) сигналов от двух фото детекторов (APD) при регистрации космических мюонов в кристалле.

Подготовлена система для измерения энергетического разрешения кристалла LYSO с новыми APD (S1315, RMD, USA) большой площади 13x13мм2. Использование новых APD позволит увеличить светосбор в 1.7 раза. Следует отметить, что темновой ток APD S1315 при комнатной температуре больше чем для APD Hamamatsu S8664.

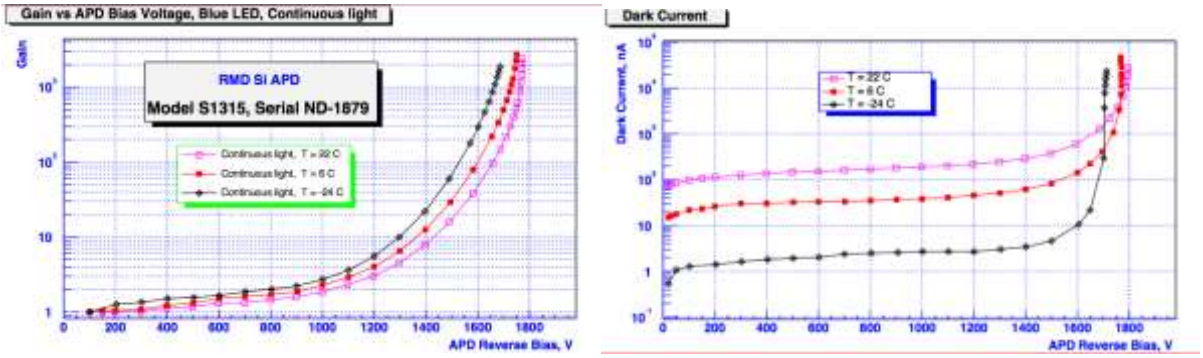


Рисунок 7 - Зависимости коэффициента усиления (слева) и темнового тока APD (справа) S1315 от напряжения.

Подготовлена система для измерения энергетического разрешения кристалла LYSO с новыми APD (S1315, RMD, USA) большой площади 13x13мм2. Использование новых APD позволит увеличить светосбор в 1.7 раза и тем самым улучшить энергетическое разрешение кристалла LYSO. Измерена относительная дисперсия сигнала APD, которая выражается через фактор F (axcess noise factor) и число первичных фотоэлектронов Ne , $\sigma/N = \sqrt{F}/Ne$. Фактор F характеризует величину флуктуаций коэффициента умножения APD. В случае большого коэффициента умножения M >> 1 фактор F может быть выражен в следующем виде F = 2 + k M. Квадрат относительной дисперсии сигнала (Q = Ne M) за вычетом шумов электроники может быть записан в следующем виде $(\sigma 2 - \sigma e2)/Q = 2/Ne + Q\ k/Ne2$. На рис. 8 показана зависимость квадрата относительной дисперсии сигнала за вычетом шумов электроники от амплитуды сигнала Q, выраженной в единицах заряда электрона. Число первичных фотоэлектронов Ne и коэффициент k можно оценить по результатам фита рис. 2: Ne = 2/p0 = 1300, k = p1 Ne2 = 2 10-3 . Таким образом можно определить, что фактор F = 2.4 для коэффициента умножения равного 200.

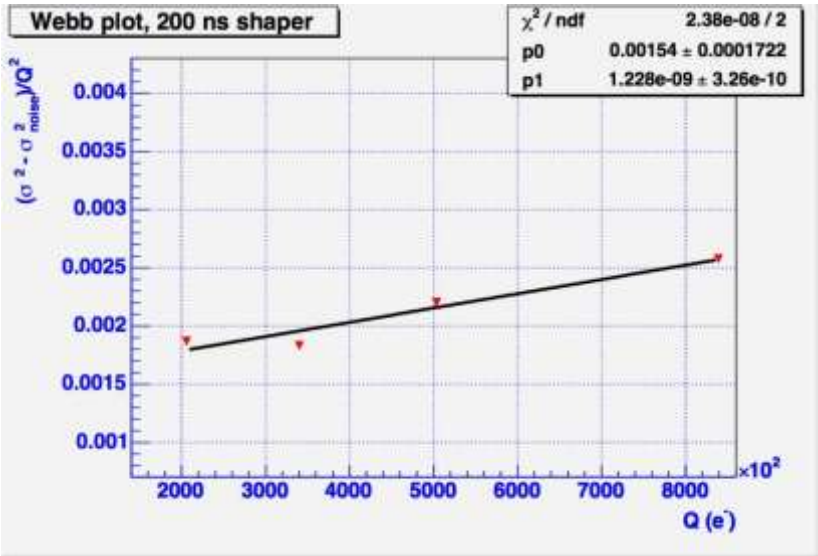


Рисунок 8 - Зависимость квадрата относительной дисперсии сигнала

3.3 Заключение. Наиболее важные достижения в 2014 году

Проведено измерение с помощью космических мюонов разрешающая способность кристалла LYSO с двумя фото детекторами Hamamatsu APD S8664-1010, которая составляет величину равную σE/E = 0.18%/√E . Подготовленна система для измерения относительной дисперсии сигнала и темнового тока APD.

Адресс web-страницы проекта: mu2e.fnal.gov

3.3 Публикации

Отправлены в журналы две работы:

K. Afanaciev, … R. Djilkibaev et al., Response of LYSO:Ce scintillation crystals to low energy gamma rays. Письма в ЭЧАЯ.

R. Djilkibaev, V. Karavichev, V. Postoev, LYSO scintillator studies for a fast low-energy calorometer. В JINST.

3.3 План Российской группы в 2015 г.

Проведение измерений энергетического разрешения, с помощью космических мюонов, нового кристалла LYSO (3x3x11 см3) производства Saint-Gobain с разными лавинным фото-диодом (APD) большой площади Hamamatsu S8664 10x10 mm2 и RMD 13x13 mm2. Измерение эффективности регистрации заряженных частиц для базового элемента годоскопа, сцинтилляционного волокна новым кремниевым фото-умножителем (SiPM) SensL MicroFC-30035_SMT с пониженным уровнем шумов. От ИЯИ в эксперименте участвует 2 человек. Запрашиваемые средства на 2015 год: Покупка кремниевых ФЭУ и электроники APD – 200 т. руб.

3.4 Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX

3.4 Реферат

Исследования направлены на решение проблемы создания и изучение свойств плотной и горячей ядерной материи в релятивистских ядро-ядерных столкновениях. Поставленная задача связана с исследованием КХД вещества при экстремальной температуре и плотности, которая затрагивает многие фундаментальные проблемы физики, такие как: природа конфайнмента и восстановление киральной симметрии, космология ранней вселенной, астрофизика компактных объектов. Работа выполняется в рамках соглашения о сотрудничестве ИЯИ РАН с Брукхэвенской национальной лабораторией, США. Эксперимент PHENIX продолжается уже 14 лет. Основная цель группы из ИЯИ РАН заключается в поддержании работоспособности дрейфовых камер центрального плеча установки, а так же в работе над статьями, готовящимися к печати.

3.4. Введение

Построение квантовой хромодинамики (КХД) явилось поворотным пунктом в понимании природы сильного взаимодействия между элементарными частицами. КХД стала фундаментальной теорией сильного взаимодействия. Вскоре на стыке нескольких областей физики - ядерной физики, физики элементарных частиц, квантовой хромодинамики и в некоторой степени астрофизики - стало развиваться новое направление: исследование КХД вещества при экстремальной температуре и плотности. Это направление привлекает все большее внимание экспериментаторов и теоретиков последние 30 лет. Важным этапом в этом направлении был запуск в 2000 году ускорителя на встречных пучках, Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC, в Брукхевенской Национальной Лаборатории США. Он был разработан и построен преимущественно под программу изучения столкновений ядер с массой вплоть до золота и энергией 200 ГэВ в системе центра масс двух нуклонов. В течение 14-ти лет на ускорительном комплексе ведёт измерения эксперимент PHENIX. В ближайшее время начнётся набор статистики в 2014 году. Основной проблемой для столь длительного эксперимента является поддержание и функционирование всех элементов установки, в частности, дрейфовых камер центрального плеча. В.С. Пантуев является ответственным экспертом, следящим за работоспособностью этих детекторов. Набор статистики, безусловно связан с обеспечением круглосуточной работы в течение полугодового периода измерений.

Помимо экспериментальных работ, проводящихся на установке «PHENIX», ведётся подготовка к публикации научных статей. В.С. Пантуев в 2014 г. являлся руководителем внутренней группы по редактированию одной из статей от имени всей коллаборации.

3.4 Работы, проведённые на установке «PHENIX» в 2014 году

На установке успешно завершён ремонт одной из дрейфовых камер. Камера, размер которой 2 на 4.5 метра, была вскрыта. Произведён визуальный осмотр проволок. Все порванные нити были удалены по специально разработанной технологии. Работа проводилась на выведенной из экспериментальной зоны камере. В октябре месяце работа была успешно завершена. Камеры проверены как по высокому напряжению, так и по системе считывания и готовы к началу новых измерений в феврале 2015 года.

В качестве руководителя смены принято участие в 8-ми дневном дежурстве на сменах.

Как член комитета по детекторам В.С. Пантуев участвует в ежемесячных совещаниях комитета.

3.4 Заключение. Наиболее важные достижения в 2014 году

Успешно выполнен ремонт дрейфовых камер. Принято участие в сменах по набору статистики.

3.4 Публикации

1. A. Adare et al., Cross Section and Transverse Single-Spin Asymmetry of η Mesons in p+p Collisions at s√=200 GeV at Forward Rapidity, Phys.Rev. D90 (2014) 7, 072008.

2. A. Adare et al., Low-mass vector-meson production at forward rapidity in p+p collisions at s√=200 GeV, Phys.Rev. D90 (2014) , 052002.

3. A. Adare et al., Inclusive double-helicity asymmetries in neutral-pion and eta-meson production in p +p collisions at s√=200 GeV, Phys.Rev. D90 (2014) 1, 012007.

4. A. Adare et al., Measurement of transverse-single-spin asymmetries for midrapidity and forward-rapidity production of hadrons in polarized p+p collisions at s√=200 and 62.4 GeV, Phys.Rev. D90 (2014) 1, 012006.

5. A. Adare et al., Heavy-flavor electron-muon correlations in p+p and d+Au collisions at sNN√ = 200 GeV, Phys.Rev. C89 (2014) 3, 034915.

6. A. Adare et al., System-size dependence of open-heavy-flavor production in nucleus-nucleus collisions at sNN√=200 GeV, Phys.Rev. C90 (2014) 034903.

7. A. Adare et al., Centrality categorization for Rp(d)+A in high-energy collisions, Phys.Rev. C90 (2014) 034902.

8. A. Adare et al., Low-mass vector-meson production at forward rapidity in p+p collisions at s√=200 GeV, Phys.Rev. C90 (2014) 5, 054905.

9. S.S. Adler et al., Transverse-energy distributions at midrapidity in p+p , d+Au , and Au+Au collisions at sNN√=62.4–200 GeV and implications for particle-production models, Phys.Rev. C89 (2014) 4, 044905.

10. A. Adare et al., Azimuthal-angle dependence of charged-pion-interferometry measurements with respect to second- and third-order event planes in Au+Au collisions at sNN√=200 GeV, Phys.Rev.Lett. 112 (2014) 22, 222301.

11. A. Adare et al., Cold-Nuclear-Matter Effects on Heavy-Quark Production at Forward and Backward Rapidity in d+Au Collisions at sNN√=200GeV, Phys.Rev.Lett. 112 (2014) 25, 252301.

3.4 План группы ИЯИ в 2015 г.

Принять участие в планируемом сеансе измерений в 2015г.

Обеспечить текущий ремонт дрейфовых камер центрального спектрометра установки в периоды технологических остановок.

Плановый ремонт дрейфовых камер перед сеансом 2016.

Как член комитета по детекторам, участие в ежемесячных совещаниях комитета.

Участие в подготовке и обсуждении текущих статей с экспериментальными данными, полученными на PHENIX.

3.5 Поиск тёмной материи Вселенной

В процессе разработки проекта ранее были выполнены следующие работы:

- Разработаны методы сверхглубокой очистки газов (10-11 экв. O2).

- Разработаны сверхчувствительные методы определения чистоты газов по содержанию электроотрицательных примесей (до 10-12 экв. O2).

- Разработаны надёжные и стабильные GEM.

- Впервые разработан светозащитный экран, устраняющий обратную связь по фотонам.

В 2014 году разработан макет камеры, заполняемого аргоном с 10% водородом.

3.5 Публикации

Б.М. Овчинников, В.В. Парусов, "Многоканальные проволочные газовые электронные умножители". ПТЭ №1 (2014)53

Б.М. Овчинников, В.В. Парусов, "Многоканальные проволочные газовые электронные умножители с металлическими электродами". ПТЭ №1 (2014)77

B.M. Ovchinnikov, V.V. Parusov, "Wire GEM", arXiv: 0.911.4811. "RET GEM with polyvinyl electrodes". arXiv: 1001.4815

B.M. Ovchinnikov et al "Multichannel gas electron multipliers", arXiv: 1003.1240(2013).

B.M. Ovchinnikov, V.V. Parusov, "A multichannel wire gas electron multipliers with gaps 1 and 3 mm", arXiv: 1005.1556.

B.M. Ovchinnikov, V.V. Parusov, "Wire GEM", arXiv: 0.912.4807(2013)

B.M. Ovchinnikov, V.V. Parusov, "The gas electron multipliers with high reliability", arXiv: 0.1012.4716.

B.M. Ovchinnikov, V.V. Parusov, "Proposal on large-seal liquid argon detector for Dark Matter searches", arXiv: 0.1102.3588

Д.С. Косолапов, Б.М. Овчинников, В.В. Парусов, В..И. Разин "Газовый электронный умножитель с металлическими электродами", Препринт ИЯИ РАН 1354(2013).

B.M. Ovchinnikov, V.V. Parusov, I.I. Tkachev, " Search for WIMP with masses ≥20 GeV", Международная конференция в Новосибирске 2013 год.

Б.М. Овчинников, В.В. Парусов, "Многоканальные электронные умножители с металлическими электродами", Препринт ИЯИ РАН 1351(2013).

Б.М. Овчинников, В.В. Парусов, "Исследование газовых смесей Ar+C2H4 и Xe+CF4", Препринт ИЯИ РАН 1352(2013).

Б.М. Овчинников, В.В. Парусов, "Методы детектирования событий в двухфазных Ar камерах", ПТЭ №5(2013)24.

B.M. Ovchinnikov, V.V. Parusov, "The experiment for direct DM searches with liquid Ar Detekror", Universal Journal of Physics, vol. 1(2)2013, p60.

Б.М. Овчинников, В.В. Парусов, "Терапия смесями БГ с кислородом", Препринт ИЯИ РАН 1373(2013)

Б.М. Овчинников, В.В. Парусов, "Исследование газовых смесей Ar+C2H4 и Xe+CF4". ПТЭ №1 (2014)56

3.6 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях. Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ

На импульсных нейтронных источниках РАДЭКС и ИН-06 группа ТРОНС ЛИРП ОЭФ проводила только фоновые измерения для проверки работоспособности спектрометрической аппаратуры и детекторов нейтронов и гамма-лучей, т.к. по техническим причинам в 2014гг. в зд. 25 не проводился протонный пучок линейного ускорителя ММФ. Проведена также работа по созданию нового быстродействующего сцинтилляционного жидкостного шестисекционного (n,γ)-детектора на основе растворителя ЛАБ с гадолиниевым поглотителем нейтронов. В том числе, создана подвижная подставка для установки шести секций (n,γ)-детектора со свинцовой защитой в специальном металлическом корпусе общим весом 1500 кг, проведана пескоструйная полировка внутренней поверхности каждой секции для увеличения светосбора сцинтилляций, созданы и установлены на трех горизонтальных нейтроноводах нейтронного источника РАДЭКС три сильфонных компенсатора для устранения воздушных разрывов в нейтроноводах, чтобы улучшить фоновые условия при измерении времяпролетных спектров. Кроме того, изготовлен нейтроновод и установлен на вертикальном канале источника РАДЭКС, что позволит проводить измерение сечений взаимодействия нейтрона с нейтроном и нейтрона с электроном, а также исследовать резонансную структуру нейтронных сечений радиоактивных ядер

В рамках совместной работы ИЯИ РАН и ОИЯИ на установке ПАРУС 120 метровой пролетной базы импульсного источника ИРЕН ЛНФ ОИЯИ модернизирован накопитель экспериментальной информации, который позволил вести измерение времяпролётных спектров при ширине временного канала 0.1 – 64 мкс, что позволяет увеличить энергетическое разрешение времяпролетного спектрометра в 50 раз.

Подготовлена и испытана установка для нагревания и охлаждения образцов-фильтров в диапазоне температур от 77 К до 1000К с целью изучения влияния допплер-эффекта на резонансную структуру нейтронных сечений реакторных материалов. Ранее подобные исследования не проводились, несмотря на важность их при решении вопросов ядерной безопасности в ядерной энергетике. По результатам работы подготовлена статья в журнал ПТЭ и препринт ИЯИ. По результатам предыдущих исследований резонансной структуры нейтронных сечений U-235, 238, Th-232 и Pu-239 подготовлена статья в журнал «Ядерная физика». Подготовлен пропорциональный счетчик, наполненный дейтериевым газом до давления 2 атм. для поиска бинейтрона, тринейтрона и возможных других мультинейтроных нейтральных ядер. Проведены измерения времяпролетных спектров на тантале-181 на установке РЭПС при проводке протонного пучка на нейтронный источник РАДЭКС с 22 по 27 декабря 2014г. Эти измерения подтверждают успешную проводку протонного пучка сотрудниками ОУК ИЯИ.

Начаты работы на 83 оси ММФ по восстановлению установки для изучения сильно возбужденных ядер-изомеров, созданию стенда в виде призм из Pb, U-238, Th-232 для моделирования различных вариантов мишеней нейтронных источников и решения вопросов АДС, трансмутации радиоактивных отходов атомной промышленности и наработки ядерного топлива электроядерным методом.

Проведена работа по изучению процесса деления на изотопах Th–232, Np-237 ,U-238 (подбарьерное и шансовое деление).

Разрабатывается спектрометр для измерения неупругого рассеяния тепловых нейтронов на основе имеющихся механического и гравитационного монохроматоров.

3.7 Свойства барионов и ядер в топологических и иных солитонных моделях

Аналитическими методами доказано существование эффекта обратной аксиальной фокусировки частиц, вылетающих из ядер на большие углы (В.Копелиович, Г.Матушко, И.Поташникова). Этот эффект подобен оптическому, а также атмосферному явлению глория (или «свету Будды»). Дифференциальное сечение рождения частиц имеет характерную зависимость от угла вылета, как обратный квадратный корень из отклонения от 180 градусов. Статья “'Buddha's light' of cumulative particles” направлена в базу данных HEP (INSPIRE) и опубликована в журнале J.Phys. G [1].

Анализ свойств реакций кумулятивного рождения частиц на ядрах (рождение на большие углы, в областях, кинематически запрещенных для взаимодействия с изолированным нуклоном) и сравнение данных, полученных в последние годы, с предсказаниями механизма последовательных кратных взаимодействий будут продолжены (совместно с Г.К.Матушко и И.К.Поташниковой).

Рассмотрен современный статус теории и возможности экспериментов по поиску осцилляций нейтрон-антинейтрон, которые предсказываются в некоторых вариантах теории великого объединения (GUT). В.Копелиович занимался проблемой интерпретации данных о нестабильности ядер в терминах параметров, описывающих возможный переход нейтрон-антинейтрон в вакууме. Статья помещена в базу данных HEP (INSPIRE) и направлена в журнал Physics Reports [2].

Доклад «'Свет Будды' кумулятивных частиц (ядерный глория-эффект)» представлен на конференциях Quarks-2014, Suzdal', Russia, 2-8 June 2014; XI-th Conference Quark Confinement and Hadron Spectrum, St Ptersburg, Russia, 7-12 September 2014: на Сессии Отделения Ядерной Физики РАН, МИФИ, Москва, 17-21 ноября 2014 г. и на конференции, посвященной 80-летию академика В.М.Лобашева 23-го октября 2014 г. Обобщенная версия этих докладов помещена в базу данных HEP (INSPIRE) [3,4,5].

Продолжено изучение свойств ядерно-подобных систем с необычными свойствами, имеющими квантовые числа странность, очарование или прелесть. Совместно с Д.Е.Ланским (НИИЯФ МГУ) рассчитывается спектр гиперядер с различными значениями странности и изоспина, в рамках киральной (топологической) модели. Готовится к публикации статья «Light multistrange hypernuclei”.

3.7 Публикации

1. 'Buddha's light' of cumulative particles. V.B. Kopeliovich (Moscow, INR & Moscow, MIPT), G.K.Matushko (Moscow, INR), I.K.Potashnikova (Santa Maria U., Valparaiso). e-Print: arXiv:1403.1992 [nuc-th] | J.Phys. G, Nuclear and Particle Physics 41 (2014)12, 125107

2. Neutron-Antineutron Oscillations: Theoretical Status and Experimental Prospects D.G.Phillips, W.M.Snow, K.Babu … V.B.Kopeliovich.... (63 authors) Submitted to Phys.Rept.; e-print arxiv: 1410.1100 [hep-ex]

3 . 'Buddha's light' of cumulative particles (nuclear glory phenomenon). V.B. Kopeliovich (Moscow, INR & Moscow, MIPT), G.K.Matushko (Moscow, INR), I.K.Potashnikova (Santa Maria U., Valparaiso). Talk at the 11th Conference Quark Confinement and Hadron Spectrum, St Petersburg, Russia, 7-12 September 2014 https://indico.cern.ch/event/287920/session/45/contribution/33#

4. “Свет Будды» кумулятивных частиц (ядерный глория эффект). В.Б.Копелиович (ИЯИ РАН и МФТИ, Москва), Г.К.Матушко (ИЯИ РАН), И.К.Поташникова (Санта Мария Университет, Вальпараисо, Чили) Доклад на 18-м Международном семинаре Кварки-2014, Суздаль, Россия, 2-8 июня 2014 г. и на Сессии Отделения Ядерной Физики РАН, МИФИ, Москва, 17-21 ноября 2014 г.

5. Nuclear Glory Phenomenon. V.B. Kopeliovich (Moscow, INR & Moscow, MIPT), G.K.Matushko (Moscow, INR), I.K.Potashnikova (Santa Maria U., Valparaiso). e-Print: arXiv:1412.7707 [nucl-th, hep-ph] |

3.8 Изучение релятивистских потоков в астрофизике

В 2014 году много времени ушло на завершение и издание популярной книги по космологии «Прорыв за край мира», вошедшей в финал премии «Просветитель».

В рамках темы продолжалась работа по двум основным направлениям: радиационно-доминированные ударные волны и механизмы излучения джетов активных галактических ядер.

Численное моделирование релятивистских радиационно-доминированных ударных волн.

Вероятно, радиационно-доминированные ударные волны являются источником излучения гамма-всплесков в диапазоне десятки – сотни КэВ. Аргументом в пользу этого является узкий спектр – заведомо не синхротронный, но с другой стороны и не равновесно-тепловой: энергия фотонов в спектральном пике гамма-всплесков на пару порядков выше той, что можно ожидать для равновесного излучения. Поэтому наиболее вероятным механизмом излучения гамма-всплесков является тепловая комптонизация при большой оптической толще во внутренней ударной волне. Радиационно-доминированная ударная волна, распространяющаяся в оптически-толстой среде, является подходящим явлением для закачки большой энергии в фотоны через тепловую комптонизацию.

Работа по численному моделированию радиационно-доминированныз ударных волн более двух лет ведется Борисом Штерном в соавторстве с Амиром Левинсоном (Университет Тель-Авива). Используется программа моделирования электромагнитных взаимодействий и переноса излучения (Комптон эффект, рождение пар, аннигиляция пар, синхротронное излучение) LPMC, написанная Борисом Штерном и использовавшаяся во множестве астрофизических задач в нелинейной постановке (излучение релятивистских джетов, корона аккреционных дисков в равновесии по рождению пар и т.п.). С точки зрения переноса излучения и рождения пар, которое в радиационно - доминированных ударных волнах играет решающую роль, постановка задачи полна и не содержит упрощающих предположений. С точки зрения гидродинамики ударной волны, задача пока что решается на упрощенном уровне – используется пылевое приближение, либо поток фиксируется.

К настоящему времени проведены прикидочные расчеты ударной волны с Лоренц фактором 4, где излучение задается «руками» - перед ударной волной впрыскиваются тепловые фотоны температуры 150 эВ, которые затем диффундируют туда и обратно через ударную волну, набирая энергию и создавая давление, поддерживающее скачок скорости потока. К настоящему моменту установлены следующие факты:

- Спектр фотонов за ударной волной похож на спектр гамма-всплесков, если сместить его на общий Лоренц-фактор порядка сотни.

- Вблизи ударной волны рождается слой электрон-позитронных пар оптической толщей более десяти (по Томсоновскому сечению), которые затем аннигилируют.

В этом году основные усилия были направлены на поиск самосогласованного решения. Эта задача является крайне сложной из-за медленной сходимости с одной стороны и очень большого объема вычислений (методом Монте-Карло) для одной итерации. Реализован алгоритм поиска самосогласованного решения, но похоже, что задача не сможет быть доведена до конца без распараллеливания кода для суперкомпьютера, чего пока не сделано. Несмотря на то, что на задачу уже потрачено два года, тем не менее, она достаточно важна и амбициозна, чтобы продолжить ее до победного конца. Может оказаться так, что результат объяснит загадочные спектры гамма-всплесков.

По второму направлению, механизмы излучения релятивистских джетов, окончательно завершена работа по обнаружению эффекта фотон-фотонного поглощения в спектре блазаров. В конце прошлого года статья с результатами была отправлена в журнал, в текущем году она была доработана в соответствии с требованиями рецензента и опубликована в «AstrophysicalJournal»: Boris E. SternandJuriPoutanen 2014 ApJ794 8 «TheMysteryofSpectralBreaks: LymanContinuumAbsorptionbyPhoton-PhotonPairProductionintheFermiGeVSpectraofBrightBlazars»

Начата новая задача по численному моделированию излучения релятивиятских джетов. Эта задача решалась в 2006 – 2008 годах совместно с Юрием Поутаненом. Тогда был найден новый механизм диссипации энергии релятивистских джетов – «размножение фотонов» (photonbreeding) через каскадное рождение пар и обмен гамма - квантом между джетом и окружающей средой. С тех пор об излучении джетов стало известно гораздо больше, главным образом из данных гамма - обсерватории «Ферми». На нынешней стадии предполагается провести широкую серию моделирования с разными вариантами ускорения частиц, не ограничиваясь одним механизмом, и выделить наиболее реалистичные механизмы ускорения, наилучшим образом описывающие данные.

3.8 Публикации

1 The Mystery of Spectral Breaks: Lyman Continuum Absorption by Photon-Photon Pair Production in the Fermi GeV Spectra of Bright Blazars Stern, Boris E.; Poutanen, Juri Astrophys.J. 794 (2014) 8 (2014-09-18) DOI: 10.1088/0004-637X/794/1/8 e-Print: arXiv:1408.0793 [astro-ph.HE] |

2 Fermi observations of blazars, constraints on the location of the gamma-ray emission region. Stern, Boris Доклад на международной конференции «Космология и Релятивистская Астрофизика» <http://hea.iki.rssi.ru/zeldovich-100> http://hea.iki.rssi.ru/zeldovich-100/ZELDOVICH100_HEA_v2.3-1.pdf

3 Научно-популярная книга "Прорыв за край мира" (Финалист премии "Просветитель")

3.9 Исследование подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях

3.9 Реферат

В рамках распадов) J/Psi, eta/prime-мезонов и антикаонов в ядерной среде уже при обычной ядерной плотности. Получены предсказания для абсолютных и относительных сечений рождения этих частиц в данных реакциях, часть из которых сравнена с имеющимися экспериментальными данными. В частности, из этого сравнения извлечена величина сдвига массы eta/prime мезонов в ядерной материи и сечение eta/prime-мезон-нуклонного взаимодействия. Также сделан важный вывод о возможности получения информации о “истинном” сечении J/Psi-N взаимодействия из изучения околопорогового рождения чармония в pA реакциях. нового подхода, использующего ядерную спектральную функцию, современные экспериментальные данные о сечениях соответствующих элементарных процессов, исследована в инклюзивных протон- и эксклюзивных фотон-ядерных реакциях модификация свойств (масс, ширин

3.9 Введение

Изучение рождения псевдоскалярных мезонов (заряженных каонов, η и η’ мезонов), а также легких векторных мезонов (ρ, ω, ф) при взаимодействии ядер и элементарных проб (протонов, пионов, фотонов) с ядрами стало предметом весьма интенсивных экспериментальных и теоретических исследований в последние годы. Основной интерес к данным реакциям был обусловлен возможностью изучения в них ренормализации свойств этих частиц, предсказываемой различными теоретическими моделями (киральной теорией возмущений, релятивистскими среднеполевыми подходами, подходами, основанными на использовании эффективных длин рассеяния, и т.д.), в горячей/плотной ядерной материи.

Знание этих свойств является крайне важным, в частности, для понимания таких фундаментальных вопросов теории сильных взаимодействий-квантовой хромодинамики, (КХД), астрофизики и адронной физики как наличие киральной симметрии (приближенной) у лагранжиана КХД и ее частичное восстановление не только в плотной ядерной среде, но уже и при обычных ядерных плотностях, строение необычных звездных объектов-нейтронных звезд и их динамические и статические характеристики, короткодействующая часть нуклон-нуклонного потенциала.

3.9 Основные результаты исследований:

1. Свойства η'- и ω-мезонов в ядерной среде

i) Проведено теоретическое изучение эксклюзивной реакции (γ, η'p) на ядре углерода при энергии первичных фотонов 1.5-2.2 ГэВ, 1.3-2.6 ГэВ. Разработаны современные физическая и математическая модели данной реакции, включающие в себя соответствующие прямой и двухступенчатые процессы, новейшую информацию о сечениях этих процессов.

Написана программа расчета сечения данной реакции в кинематических условиях эксперимента, выполненного коллаборацией CBELSA/TAPS (Германия) на ускорителе ELSA (усредненного по телесному углу рождения η' мезонов их распределения по кинетической энергии при условии вылета детектируемого протона в интервале углов 1-11 градусов в лаб системе). На ее основе проведены расчеты этой наблюдаемой в различных сценариях ренормализации свойств (массы) данных мезонов в ядерной среде, некоторые результаты которых представлены на прилагаемом ниже рисунке.

Проведено сравнение результатов этих расчетов с последними данными эксперимента CBELSA/TAPS. Это сравнение говорит в пользу сделанного в предыдущей работе коллаборации (M. Nanova, V. Metag, E. Ya. Paryev et al., Phys. Lett. B 727 (2013) 417) вывода о величине сдвига массы η' мезонов в ядерной среде.

Знание этого сдвига важно как для понимания механизма генерации масс псевдоскалярных мезонов в QCD, так и киральной симметрии самой

QCD. Следует отметить, что данная тематика представляет в настоящее время большой интерес, что отражается в ряде новейших публикаций в этой области.

Результаты этой работы планируется опубликовать в журнале Phys. Lett. B в текущем году.

ii) Проведено новое теоретическое изучение эксклюзивной реакции (γ, ωp) на ядре углерода при энергии первичных фотонов 1.25-3.1 ГэВ. Разработаны современные физическая и математическая модели данной реакции, включающие в себя соответствующие прямой и двухступенчатые процессы образования ω мезонов, новейшую информацию о сечениях этих процессов. Написана программа расчета сечения данной реакции в кинематических условиях эксперимента, выполненного коллаборацией CBELSA/TAPS (Германия) на ускорителе ELSA. На ее основе проведены расчеты этой наблюдаемой в различных сценариях модификации свойств (массы) ω мезонов в ядерной среде и их сечения поглощения здесь.

Сравнение результатов расчетов с только что опубликованными данными этой коллаборации в работе: S. Friedrich et al., Phys. Lett. B 736 (2014) 26 предварительно подтверждает сделанный в этой работе на основе модельных расчетов японских физиков вывод о величине сдвига массы ω мезонов в ядерной среде. Необходимость выполнения данной работы была вызвана тем, что разработанная нами модель более адекватно отражает как механизм изучаемой реакции, так и кинематические условия эксперимента, выполненного коллаборацией CBELSA/TAPS, и поэтому, как можно надеяться, позволит получить более надежный вывод о величине эффективной массы ω мезонов в ядерной материи. Его знание представляет в настоящее время большой интерес для понимания различных аспектов “in-medium” адронной физики.

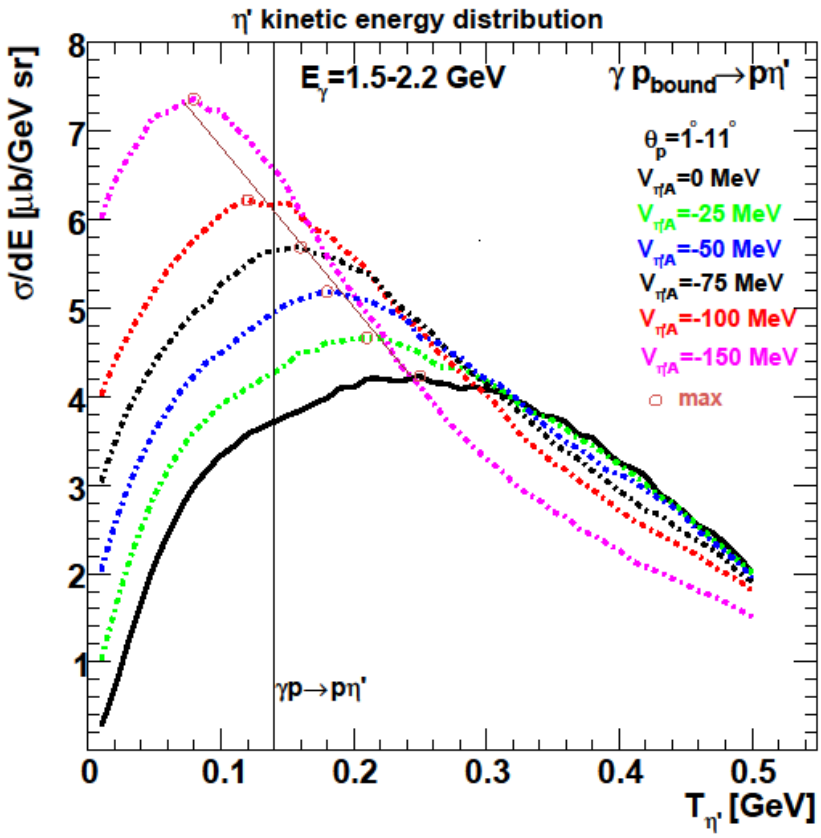


Рисунок 9.

3.9.1 Изучение антикаон – ядерного оптического потенциала

Разработана новая, более совершенная теоретическая модель для анализа полученных впервые коллаборацией ANKE в рамках совместного российско-германского эксперимента на ускорителе COSY-Juelich (Германия) данных по нерезонансному рождению каонных пар в pA реакциях при энергии первичных протонов 2.83 ГэВ с целью определения величины притягивательного антикаон-ядерного оптического потенциала (“мелкого” или “глубокого”), представляющей большой интерес для современной ядерной и адронной физики как с точки зрения возможного существования “странной” ядерной материи—каонного конденсата—в таких компактных звездных объектах как нейтронные звезды, так и с точки зрения возможного существования таких новых ядерных объектов как глубокосвязанные каонные состояния K(-)pp, K(-)ppn, K(-)pnn, K(-)ppnn, каон и мульти-каон связанные ядерные состояния. Данная модель, в отличие от предыдущей версии, учитывает как отличие сечения рождения каонных пар на нейтроне от аналогичного сечения на протоне в прямых процессах, так и более реалистическое выражение для последнего сечения (сплошная темная кривая на прилагаем ниже рисунке).

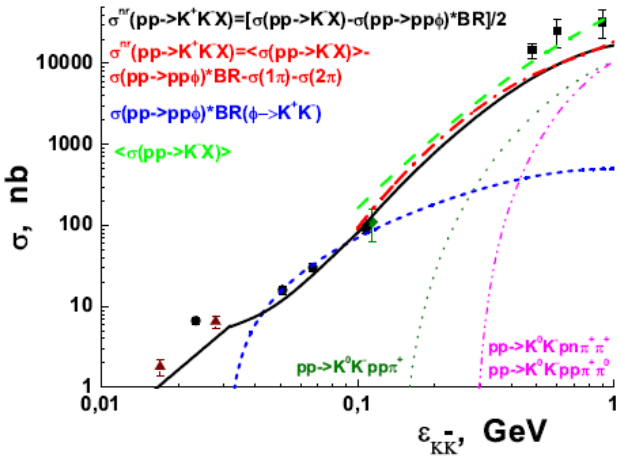


Figure 1: (color online) The kaon and kaon-antikaon production total cross sections in proton–proton collisions as functions of the excess energy above the K^+K^-pp threshold. For notation see the text.

В рамках этой модели, учитывающей прямые и двухступенчатые процессы нерезонансного образования K(+)K(-) пар, проведены новые численные расчеты абсолютных и относительных сечений рождения этих пар на ядрах C, Cu, Ag, Au в аксептансе

спектрометра ANKE. Пример такого расчета для ядер углерода и меди показан на приведенном ниже рисунке. Используя результаты этих расчетов, в настоящее время проводится реанализ соответствующих экспериментальных данных, полученных коллаборацией ANKE с целью более надежного извлечения величины скалярного антикаон-ядерного потенциала.

По результатам проделанной работы подготовлена к печати в зарубежном журнале статья:

E. Ya. Paryev, M. Hartmann, Yu. T. Kiselev. Non-resonant kaon pair production and medium effects in proton-nucleus collisions.

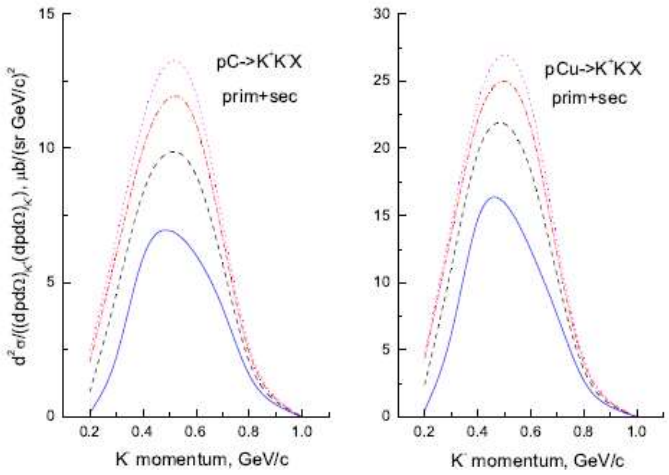


Figure 4: (color online) Exclusive differential cross section for the non-resonant production of K^+K^- pairs from primary plus secondary channels in the ANKE acceptance window as a function of antikaon momentum in the interaction of protons of energy of 2.83 GeV with C (left panel) and Cu (right panel) target nuclei for K^- potential depths $U^0_{K^-} = 0$ MeV (solid lines), $U^0_{K^-} = -60$ MeV (dashed lines), $U^0_{K^-} = -126$ MeV (dot-dashed lines) and $U^0_{K^-} = -180$ MeV (dotted lines).

3.9.2 Изучение околопорогового рождения чармония (J/Psi мезона) в протон - ядерных реакциях

Для нужд планируемого эксперимента CBM на ускорительном комплексе FAIR (GSI-Darmstadt, Germany) впервые были получены предсказания для абсолютных и относительных сечений рождения J/Psi мезонов в протон-ядерных взаимодействиях при околопороговых начальных энергиях (8-14 ГэВ). Для этого была разработана соответствующая физическая модель, учитывающая как поглощение J/Psi мезонов в ядерном веществе, так и их длину формирования в нем, а также ренормализацию их массы, предсказываемой современными основанными на КХД адронными моделями, в ядерной материи. В частности показано, что при данных начальных энергиях эффекты длины формирования чармония незначительны (см рис. ниже), что позволяет определить “истинное” сечение неупругого J/Psi-N взаимодействия из сравнения полученных в будущем данных с результатами модельных расчетов.

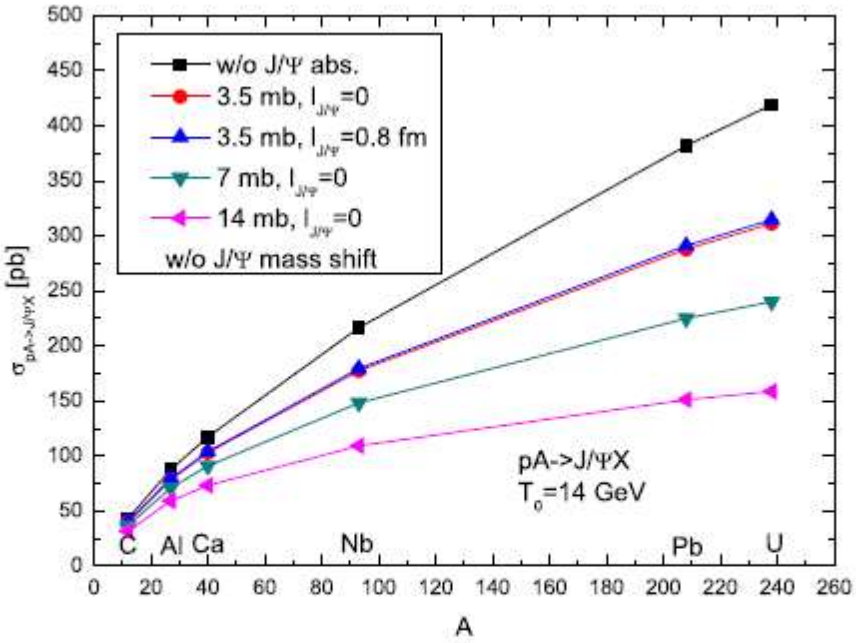


Fig. 1. (Color online) A-dependence of the total cross-section of J/Ψ production by 14 GeV protons from primary $pN \to pNJ/\Psi$ channels in the full phase space in the scenario without J/Ψ mass shift for different values of the $J/\Psi N$ absorption cross-section and J/Ψ formation length indicated in the inset. The lines are included to guide the eyes.

Результатов проведенных теоретических исследований успешно докладывались на 24th CBM Collaboration Meeting, 8-12 September 2014, Krakow, Poland.

3.9 Заключение

Применение результатов проведенных новых теоретических исследований к анализу данных по нерезонансному рождению каонных пар в pA реакциях при энергии первичных протонов 2.83 ГэВ, впервые полученных коллаборацией ANKE в рамках совместного российско-германского эксперимента на ускорителе COSY, позволит надежно извлечь величину антикаон-ядерного скалярного оптического потенциала (или сдвига массы антикаона в ядерной материи), имеющую большое значение для современной ядерной и адронной физики .

Из анализа новых эксклюзивных данных по фоторождению eta/prime-мезонов, полученных недавно коллаборацией CBELSA/TAPS на ускорителе ELSA (Бонн, Германия), также извлечены величина сдвига массы этих мезонов в ядерной материи, предсказываемого современными адронными моделями. Эта величина находится в согласии с той, извлеченной нами в предыдущей работе (M. Nanova, V. Metag, E. Ya. Paryev et al., Phys. Lett. B 727 (2013) 417) из анализа инклюзивных данных. Полученные результаты представляют большой интерес для пониманияв рамках КХД происхождения существенно большей массы eta/prime мезонов по сравнению с массами других членов псевдоскалярного мезонного нонета.

Наконец, сделан важный вывод о возможности получения информации о “истинном” сечении J/Psi-N взаимодействия из изучения околопорогового рождения чармония в pA реакциях.

3.9 Публикации

1. Yu. T. Kiselev, E. Ya. Paryev, Yu. M. Zaitsev . Near-threshold J/Psi production in proton-nucleus collisions. Int. J. Mod. Phys. E, vol. 23, No.12 (2014) 1450085 ; ArXiv: 1409.2428 [nucl-th] (2014).

3.10 Осцилляции частиц в поглощающей среде. Исследование переходов нейтрон-антинейтрон

3.10 Реферат

Целью работы является разработка принципиально новой модели переходов нейтрон-антинейтрон в поглощающей среде и ее обобщение на случай ab-переходов. В рамках указанной модели получить ограничение на период осцилляций нейтрон-антинейтрон в вакууме.

3.10 Введение

Все результаты, полученные нами, являются принципиально новыми. В первую очередь это относится к сути модели - теоретико-полевому подходу, поскольку ранее нами было показано, что только с его помощью можно корректно описать основной эффект индуцируемый средой – поглощение.

3.10 Основные результаты

В 2014 г основное внимание уделено общему вопросу теории реакций и распадов в среде: применимость оптической теоремы в моделях с неэрмитовым Гамильтонианом.

Дело в том, что при работе в рамках направления указанного выше выяснилось, что в стандартной модели расчета переходов нейтрон-антинейтрон в поглощающей среде неправильно используется оптическая теорема. Она должна применяться для унитарной S-матрицы. Однако модель, упомянутая выше, существенно неунитарна. В результате ширина процесса обратно пропорциональна ширине аннигиляции антинейтрона в среде, тогда как в предложенной нами модели с эрмитовым Гамильтонианом она прямо пропорциональна вышеуказанной ширине.

Зависимость от основного эффекта влияющего на скорость процесса (ширина аннигиляции антинейтрона в среде) в обеих моделях противоположна. Этот факт является принципиальным.

Если Гамильтониан неэрмитов и применяется оптическая теорема, то S-матрица должна быть унитаризована. На практике в ряде хорошо известных моделей различных процессов (не только переходов нейтрон-антинейтрон) это требование не выполняется. Таким образом, рассматриваемый вопрос выходит далеко за рамки изучаемого процесса: переходы нейтрон-антинейтрон в поглощающей среде.

3.10 Публикации

1 V.I.Nazaruk, Optical theorem and unitarity. arXiv:1403.3576v2 [hep-ph] (2014)

2 V.I.Nazaruk, Models with non-Hermitian Hamiltonian and optical theorem. arXiv:1408.3295v2 [nucl-th] (2014)

3.11 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах

В рамках экспертной деятельности в качестве федерального эксперта научно-технической сферы опубликован аналитический документ «Выявление ведущих тенденций и основных факторов, определяющих развитие сферы исследований и разработок в тематической области «Энергоэффективность и энергосбережение», с учётом планов стратегического развития и инновационного потенциала отраслей промышленности Российской Федерации в части «Разработка бесконтактных переключателей - ограничителей тока для электрических сетей».

Продолжаются работы по проекту «Разработка бесконтактных переключателей - ограничителей тока для электрических сетей» и функционирование компании ООО «Каррент Лимитед» - резидента инновационного центра «Сколково».

В рамках проекта проводились совместные эксперименты с коллегами из института радиоэлектроники по исследованию переключающих характеристик прототипа углеродного токоограничителя. В рамках исследований удалось повысить токи переключения до 3А и обосновать возможность дальнейшего масштабирования токов. Вместе с тем выявились проблемы охлаждением образцов, нестабильностью работы из-за образования искры, а также различием коэффициентов термического расширения пленки и подложки. Намечены возможные пути преодоления обозначенных проблем.

Обновлен сайт группы http://www.serleb.narod.ru , где представлена информация о проектах группы и всех сопутствующих мероприятиях.

3.11 Публикации

1. S.G.Lebedev “Field Effect Switching in Nano-Graphite Films” Journal Physics and Chemistry of Solids Volume 75, Issue 9, September 2014, Pages 1029–1032, 2014.

2. В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский «Геохронология и мониторинг космических лучей по накоплению космогенных изотопов 53Mn, и 10Be в земных породах» принято к публикации в журнал «Геохимия» 2014.

3. С.Г.Лебедев «Использование эффекта переключения проводимости в нанографитовых пленках для ограничения токов короткого замыкания в интеллектуальных энергосетях» Приглашенный доклад и публикация в Трудах международного форума «HI-TECH-2014», Россия, Крым, 25-27 сентября 2014 г.

4. BENEFITS OF NANO-GRAPHITE FILMS AS SMART STRUCTURE FOR SOLID STATE ELECTRONIC APPLICATIONS. Proc. of 2014 Asia-Pacific Materials Science and Information Technology Conference, December 13-14, 2014, Shanghai, China.

5. С.Г.Лебедев, аналитический документ: «Выявление ведущих тенденций и основных факторов, определяющих развитие сферы исследований и разработок в тематической области «Энергоэффективность и энергосбережение», с учётом планов стратегического развития и инновационного потенциала отраслей промышленности Российской Федерации в части «Разработка бесконтактных переключателей - ограничителей тока для электрических сетей» 07.02.00, ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, 2014.

3.12 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных резонаторов (НФР)

Для разработки новой программы исследований на экспериментальном комплексе ИЯИ РАН создана межотдельская экспертная группа с участием дирекции. В рамках работы группы выделены несколько направлений работы, в том числе по радиационному материаловедению, которое возглавил С.Г.Лебедев. Все участники группы С,Г.Лебедева будут вовлечены в данную деятельность. Для прояснения состояния дел в данной области на одном из заседаний экспертной группы С.Г.Лебедевым был представлен доклад «Радиационные исследования на ММФ».

Произведено обновление курса Э.А.Коптелова «Радиационные физические исследования» для студентов 5 курса МФТИ, обучающихся на кафедре ИЯИ РАН. В осеннем семестре 2014 г.. прочитан курс соответствующих лекций, выполнены и приняты по 2 курсовые работы и произведен прием соответствующего экзамена.

На обновленном сайте группы http://www.serleb.narod.ru представлено описание проекта.

3.12 Публикации

1.С.Г.Лебедев. Доклад «Радиационные исследования на ММФ» в рамках работы межотдельской экспертной группы.19 декабря 2014, ИЯИ РАН

2. В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский, «Геохронология и мониторинг космических лучей по накоплению космогенных изотопов 53Mn, и 10Be в земных породах» принято к публикации в журнал «Геохимия» 2014.

3.12 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями благородных газов с кислородом

Работа проводится совместно с Больницей РАН в г. Троицке. Проведены испытания смесей Ar+O2 для устранения депрессии, стрессов, гипертонии, улучшения репродуктивной функции.

Показано, что терапия смесями Ar+O2 , Xe+O2, Kr+O2 устраняет депрессию, стрессы, гипертонию, улучшает репродуктивную функцию.

4 Лаборатория релятивистской ядерной физики

Физика атомного ядра, динамика ядерных и фотоядерных реакций, физика радионуклидов и тяжёлых ионов.

Руководитель работ з.д.н. А.Б.Курепин.

Исследования по релятивистской ядерной физике.

Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC CERN.

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

Эксперименты по релятивистской физике - эксперимент ALICE. Руководитель работ з.д.н. А.Б.Курепин.

Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия). Руководитель работ к.ф.-м.н. Ф.Ф. Губер

Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН (эксперимент NA-61). Руководитель работ з.д.н. А.Б.Курепин.

Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Дармшадт, Германия). Руководитель работ з.д.н. А.Б.Курепин.

Исследование коллективных эффектов и не нуклонных степеней свободы в ядрах, переходных процессов в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами. Руководитель работ з.д.н. А.Б.Курепин.

4.1 Эксперименты по релятивистской физике - эксперимент ALICE.

Руководитель работ з.д.н. А.Б.Курепин.

Список исполнителей:

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н.	Т.Л.Каравичева
Старший научный сотрудник к.ф.-м.н.	А.И.Решетин
Ведущий научный сотрудник д.ф.-м.н.	И.А.Пшеничнов
Старший научный сотрудник к.ф.-м.н.	Н.С.Топильская
Заведующий сектором к.ф.-м.н.	Д.В.Серебряков
Главный инженер Института	О.В.Каравичев
Заведующий сектором	А.В.Веселовский
Ведущий инженер	И.В.Морозов
Научный сотрудник	А.И.Маевская
Младший научный сотрудник	А.А Тихонов
Младший научный сотрудник	А.Н.Курепин
Ведущий инженер	Н.А.Курепин
Стажер-исследователь	А.С. Коневских
Стажер-исследователь	Д.А.Финогеев
Стажер-исследователь	В.В.Исаков
Стажер-исследователь	А.А.Фурс
Стажер-исследователь	А.И.Шабанов

4 Реферат

КВАРК-ГЛЮОННАЯ МАТЕРИЯ, УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ БЗАИМОДЕЙСТВИЯ, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, ЦЕРН, СТОЛКНОВЕНИЯ ЯДЕР СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ЭКСПЕРИМЕНТ ALICE, СВЕТИМОСТЬ, ТРИГГЕРНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, ДЕТЕКТОРЫ ЧЕРЕНКОВА, КВАРЦЕВЫЙ РАДИАТОР, ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ, ФЭУ НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН, КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, АНАЛОГОВАЯ И ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ПЛОСКОСТЬ РЕАКЦИИ, МНОЖЕСТВЕННОСТЬ.

На детекторе T0 установки ALICE продолжены работы в рамках оптимизации всех детекторных систем с целью модернизации триггерной системы и необходимости работать при выводе пучка с расстоянием 50 нс и 25 нс между банчами. Продолжается анализ экспериментальных данных 2010-2013 гг.

Выполнено перемещение электроники детектора T0 в связи с модернизацией триггерной системы установки ALICE и измерение временных параметров триггерных сигналов детектора T0 после перемещения электроники детектора.

Детектор T0 обеспечивает проведение измерений множественности рожденных частиц, мониторирование и определение светимости, измерение времени-пролета

рожденных заряженных частиц, диагностику пучка и формирует триггерные сигналы нулевого уровня.

T0 детектор стабильно работал во всех измерительных сеансах, проводимых экспериментом ALICE в течение 2009-2013 годов и основные параметры детектора T0 после LS1 должны соответствовать новым требованиям проведения измерений по исследованиях кварк-глюонной материи на пучках Большого адронного коллайдера ЦЕРН, после реконструкции коллайдера в 2013-2014 гг.

В соответствие с планом эксперимента ALICE по модернизации триггерной системы и из-за необходимости детектору T0 работать при выводе пучка с расстоянием 50 и 25 нс между банчами за отчетный период выполнены работы:

1. Перемещение электроники детектора T0 в связи с модернизацией триггерной системы установки ALICE.

2. Измерение временных параметров триггерных сигналов детектора T0 после перемещения электроники детектора и модернизации триггерного модуля для формирования триггерного сигнала LM.

3. Проведен анализ работы детектора T0 в 2013 году.

4. Выполнена калибровка данных LHC10h (ноябрь-декабрь).

5. Продолжены работы по модернизация программного обеспечения системы DCS.

6. Выполнено определение светимости в p-Pb столкновениях.

7. Проведены исследования ультрапериферических взаимодействий ядер.

8. Проведена подготовка к физическому сеансу 2015-2017 гг.

9. Продолжены работы по подготовке технического проекта детектора FIT (Fast Interaction Trigger detector).

10. Предложена и разработана постановка новых экспериментов на фиксированной мишени с использованием пучков БАК.

4.1 Результаты исследований

4.1.1 Перемещение электроники детектора T0

Основной задачей по перемещению электроники детектора T0 является сокращение времени прихода триггерных сигналов детектора T0 на вход центрального триггерного процессора (CTP) с 625нс до 425 нс и формирование нового уровня триггерных сигналов LM1 (L0 минус 1). В феврале был завершен перенос всех подсистем систем детектора на новое место, обеспечивающее сокращение длины триггерных и сигнальных кабелей. Завершена прокладка всех оптических и сигнальных кабелей для коммуникации с основными системами (DCS, CTP, DAQ) установки ALICE (рисунок 1)

Рисунок 1 – Стойки детектора T0 до и после завершения переноса электроники детектора

4.1.2 Измерение временных параметров триггерных сигналов детектора T0 после перемещения электроники детектора

Оценка временных параметров триггерных детекторов выполнена после переноса электроники с использованием лазерной системы для триггера LM1, который будет использоваться в измерениях 2015-2018 гг. (RUN2). Для сеансов измерений 2009-2013 (RUN1) годов оценка сделана по физическим данным. На рисунке 2 представлены все компоненты детектора, влияющие на задержку (latency) триггерных сигналов. Измерения показали, что временные параметры триггерных сигналов находятся в допустимых пределах (менее 425 нс).

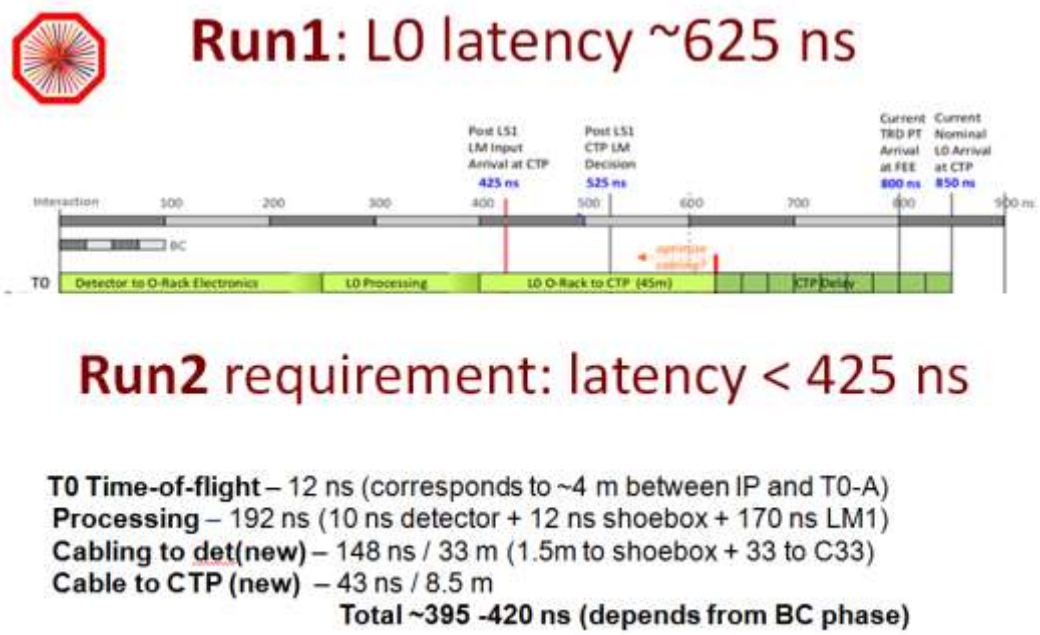


Рисунок 2 – Задержка триггерных сигналов во время RUN1 и планируемая задержка для RUN2

4.1.3 Анализ работы детектора T0 в 2013 году

Анализ работы детектора T0 в 2013 году показал, что основные параметры детектора T0 соответствуют требованиям, однако были выявлены ряд факторов, влияющих на результаты измерений.

Было проведено тестирование модулей QTC, осуществляющего преобразование заряда во время, модуля GRPG, обеспечивающего выработку синхронизирующих сигналов, не позволяющих работать на частоте 20-40 МГц.

В настоящее время проходят испытания нового типа модуля QTC на установке ALICE с использованием лазерной системы и подготавливается техническое задание для доработки нового модуля GRPG.

В 2013 году были проведены испытания лазерной системы с целью выявления причин общей тенденции к падению амплитуд сигналов от лазерной системы в детекторах T0-A и T0-C в течение физических измерений в 2011-2013 гг. Были сделаны выводы, что падение трансмиссии света в коротких кабелях является результатом радиационных повреждений коротких оптических кабелей.

В январе-феврале были изготовлены новые оптические кабели для стороны T0-A и проведена установка и тестирование новых оптических кабелей на установке ALICE.

4.1.4 Калибровка данных LHC10h (ноябрь-декабрь)

Проведена новая амплитудная калибровка для сеансов 2010 года на базе время - амплитудных зависимостей, полученных путем анализа физических данных. В связи с тем, что для основного трекинного детектора TPC разработан новый алгоритм реконструкции, позволяющий существенно улучшить импульсное разрешение, все данные 2010 года будут обработаны повторно. При первой реконструкции для детектора T0 применялась калибровка, основанная на лазерных данных. Время-амплитудная зависимость лазерных сигналов при больших амплитудах отличается от физических данных. Калибровка, выполненная на основе физических данных всего периода при новой реконструкции, позволит получить и передать время пролетному детектору (TOF) сигнал о начале событии взаимодействия ядер свинца (T0) не зависящий от множественности этого события.

4.1.5 Работы по модернизации программного обеспечения DCS

Во время LS1 на установке ALICE проведены замена DCS (Системы управления и контроля за детектором) компьютеров старого поколения на новые (DELL Power Edge R310 1U, X4380 (3.06 GHz) CPU, 16 GB RAM,2x25- GB SATA disk) и переход с используемой системы PVSS (32bit) на WINCC OA (64bit). Новое поколение компьютеров использует вместо шины PCI шину PCIe. В настоящее время на детекторе произведена установка новых компьютеров и новых интерфейсных плат (A3818, CAEN).

Выполнено обновление части управления и контроля детектора T0, которое включало в себя замену серверов, замену плат оптического интерфейса, добавление VME корзины и как следствие добавление элементов управления питанием корзины и добавление оптического интерфейса для управления блоками в новой VME корзине. Замена серверов повлекла и замену операционной системы (сейчас для windows приложений в CERN необходимо использовать Windows 2008 server). Новые сервера имеют только PCIe интерфейс, что повлекло замену плат оптического интерфейса CAEN A2818 на A3818. Формально такая замена должна быть абсолютно совместима при замене на более современную модель оборудования без дополнительных действий, что подтверждалось тестами, но при замене операционной системы пришлось решать проблемы совместимости драйверов. Само функционирование программного пакета, предназначенного для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления (SCADA) системы управления WinCC версии 3.11, было отработано в группе DCS и после

необходимых обновлений и исправлений программные модули среды WINCC (скрипты) функционировали нормально. Однако заставить работать сервер связи с VME контроллером через DIM (Distributed Information Management System for the Delphi experiment) протокол не удалось, так как компания Microsoft изменила политику запуска программ как сервиса и запускать сервер как сервис теперь невозможно.

Для решения этой проблемы было решено использовать два метода. Первый метод заключается в написании программы клиента для DIM сервера и запуске ее под административной учетной записью при помощи стороннего программного обеспечения. В настоящий момент реализован именно этот метод. Были проверены все интерфейсы связи с оборудованием под Windows и они могут функционировать так же, как работали в старой конфигурации. Второй метод заключается в использовании библиотеки от компании CAEN написанной на C++, поставляемой с платой интерфейса. WinCC имеет возможность использования внешних библиотек, но как оказалось, такая библиотека должна быть подготовлена особым способом. Было решено пойти по пути написания библиотеки-моста с включением в нее поставляемой библиотеки интерфейса. Группой DCS был выделен сервер, на котором удалось сделать рабочую связку WinCC и C++ и построить среду программирования. Сейчас готов шаблон для заполнения функциями оригинальной библиотеки. Этот метод более перспективен и идеологически корректен. Таким образом, на сегодняшний момент Windows часть системы управления детектора T0 подготовлена к тестам на пучке.

4.1.6 Определение светимости

Точное определение светимости и его мониторинг необходим, поскольку значение светимости входит в расчеты сечений всех физических процессов. Светимость на ALICE измеряется передними детекторами: V0, T0 и ZDC. Во время фазы запуска LHC, для того чтобы оценить качество пучка, V0 и T0 используются для оценки светимости. Во время p-p и p-Pb столкновений в течении 2011-2013 годов для этих целей использовался детектор T0. В качестве основного сигнала для оценки светимости использовался триггерный сигнал C0TVX (сигнал генерируется, если вершина столкновении находится в пределах +-10 см). Во время Pb-Pb столкновений этот сигнал был включен в триггерную систему установки ALICE. В настоящее время завершен анализ p-Pb данных и подготовлена статья «Measurement of visible cross sections in proton-lead collisions at √sNN = 5.02 TeV in van der Meer scans with the ALICE detector» [6].

4.1.7 Исследования ультрапериферических взаимодействий ядер

В рамках исследований ультрапериферических взаимодействий ядер на коллайдерах ядро-ядро было выполнено моделирование электромагнитных взаимодействий ультрарелятивистских ядер урана на встречных пучках с помощью разработанной в ИЯИ РАН модели RELDIS. Вычисления проводились для энергий столкновений U+U при sqrt(s_{NN})=192.8 ГэВ на RHIC (BNL). При небольших потерях пучков в коллайдере полное сечение взаимодействия ядер, включающее в себя доминирующий вклад электромагнитных процессов, определяет время жизни пучка и может быть непосредственно измерено. Особенностью электромагнитной диссоциации ядер урана является большая доля (~60%) событий их деления. Отмечено хорошее согласие результатов RELDIS с экспериментом. Результаты опубликованы в совместной с соавторами из BNL работе [22].

Подготовлен и представлен доклад на международном совещании «Workshop on photon-induced collisions at the LHC», CERN, Geneve, June 2-4, 2014 на тему *"Electromagnetic fragmentation of nuclei — recent news and future plans"*. В докладе отражены недавно опубликованные ЛРЯФ результаты по измеренным сечениям электромагнитной диссоциации ядер индия и представлены возможности модели RELDIS по моделированию электромагнитных взаимодействий ядер, которые в будущем, помимо ядер свинца, могут быть ускорены на LHC.

Подготовлен и представлен доклад на международном семинаре «The XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems - Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics» на тему «Multifragment break-up of ^{12}C in photonuclear reactions — a theorist's point of view», в котором представлены результаты моделирования взаимодействия фотонов с ядрами углерода с помощью модели RELDIS. Работы проводятся ввиду возможного расширения набора ядер, включая лёгкие, которые можно ускорять в коллайдерах или других ускорителях.

Для проверки применимости модели RELDIS к реакциям фотофрагментации лёгких ядер совместно с лабораторией фотоядерных реакций (В.Г. Недорезов и А.А.Туринге) подготовлена к печати статья «Disintegration of ^{12}C nuclei by 700-1500 MeV photons».

Моделирование взаимодействий ускоренных ядер с тканеподобными материалами

С помощью усовершенствованой модели MCHIT (Monte Carlo Model for Heavy-Ion Therapy) вычислены микродозиметрические характеристики ядер терапевтических пучков (протоны, альфа-частицы, ядра лития и углерода), средние линейные передачи энергии

($<y_f>$, $<y_d>$) при их распространении в воде, включая все рождённые ими вторичные частицы. На основе микродозиметрической кинетической модели вычислены относительные биологические эффективности этих частиц. Даны оценки $<y_f>$, $<y_d>$ для тяжелых ядер космических лучей.Результаты опубликованы в работах [23] и [24].

4.1.8 Подготовка к физическому сеансу 2015-2017 гг.

В настоящее время на установке ALICE, ЦЕРН проводятся работы по подготовке детекторных систем к измерительным сеансам 2015-2017 гг, анализ экспериментальных данных 2010-2013 гг, а также создание и испытания детекторных устройств, предназначенных для использования в составе модернизируемых детекторных установок супердетектора ALICE Большого адронного коллайдера для обеспечения возможности проведения физических экспериментов при повышенных уровнях светимости коллайдера.

В рамках подготовки к измерительным сеансам 2015-2017 г.г проводились работы по детектору T0. Основные параметры детектора T0 после LS1 должны соответствовать новым требованиям проведения измерений по исследованиях кварк-глюонной материи на пучках Большого адронного коллайдера ЦЕРН, после реконструкции коллайдера в 2013-2014 гг., В соответствии с планом эксперимента ALICE по модернизации триггерной системы (CTP), системы управления и контроля, системы сбора данных и необходимости работать при выводе пучка с расстоянием 50 нс и 25 нс между банчами в третьем квартале были выполнены следующие работы:

Для обеспечения сокращения времени прихода триггерных сигналов детектора T0 на вход центрального триггерного процессора (CTP) с 625нс до 425 нс и формирования нового уровня триггерных сигналов LM1 (L0 минус 1) в первом полугодии было выполнено перемещение электроники детектора. Это позволило уменьшить задержку триггерных сигналов до 425 нс. В 3 квартале были выполнены работы по модернизации электронной схемы детектора T0 и отдельных триггерных модулей. Для триггерного модуля T0TU было разработано новое программное обеспечения (Firmware), что позволило дополнительно уменьшить время формирования триггерных сигналов на 25 нс.

Для изучения множественности рождения заряженных частиц и для коррекции зависимости временных параметров детектора от множественности зарегистрированных заряженных частиц требуется стабильное амплитудное разрешение. Для этих целей был разработан прототип модуля QTC, осуществляющий преобразование заряда во время с временем преобразования 25 нс. В июле 2014 годы изготовленный прототип был успешно испытан на установке ALICE и начато изготовление 5 модулей QTC. В ноябре 2014 года

были изготовлены и интегрированы в быструю электронику детектора T0 два типа модулей QTC. Первый тип модуля предназначен для измерения заряда индивидуального канала T0, второй тип -для измерения суммарной амплитуды сигналов с каждой из сторон детектора и предназначен для контроля выработки триггерных сигналов по множественности. На рисунке 3 ,4 представлены фото новых модулей QTC.

Рисунок 3 – QTC модуль для измерения заряда индивидуального канала детектора T0 и имеет 6 независимых каналов измерений

Рисунок 4 – QTC модуль для измерения заряда суммарной амплитуды сигналов с каждой из сторон детектор

Для обеспечения работы триггерной электроники детектора при частоте 40MHz был разработан и изготовлен модуль разветвителей аналоговых сигналов (FANOUT) в динамическом диапазоне до 5 V и завершена разработка модуля GRPG (Gate reference point generator). В соответствие с планом работ модули FANOUT и GRPG (LCC-новое название модуля GRPG) изготовлены и доставлены в ЦЕРН в ноябре 2014 года [рисунок 5,6]. Однако установка этих модулей может быть произведена только после полного тестирования триггерного уровня LM детектором TRD.

Рисунок 5 – Модуль для формирования сигналов запуска лазерной системы и формирования сигналов запуска модулей QTC

Рисунок 6 – Модули FANOUT для разветвления сигналов на быструю и триггерную электронику детектора T0

Была проведена амплитудная калибровка детектора T0-A на пучке PS, CERN . Результаты калибровки приведены в таблице 1 и рисунок 7 и 8. После проведения измерений детектор T0-A был установлен на рабочее положение на установке ALICE.

Проведена модернизация лазерной системы калибровки детектора в связи с перемещением электроники детектора ближе к центральному триггерному процессору и проведен ремонт отдельных элементов оптической системы.

Таблица 1 - Результаты испытаний детектора T0-A

RESULTS
of beam tests for the amplitude calibration of T0-A detectors
(CERN, PS T10 test beam channel, 22-29 July, 30-th Week 2014)

Task description	Goals	Dates	Results	Conclusions	Comments
Dismounting of T0-A detector modules from ALICE: ## 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12 (10 detectors)	Tests and calibration of T0-A detector modules.	On 8 July	Inspection and preparation of T0-A detector modules (10 detectors) for beam tests. DONE		T0-A detector modules ##4 8 and 10 have not been removed from ALICE with aim of the test of a new T0-electronics modules.
Tests of T0-A detector modules on PS T10 test beam channel.	1 mip-calibration on PS T10 test beam channel.	22 - 29 July	Obtaining of test data - PMT HV and signal amplitude for 1-MIP beam particles (negative pions, momentum 6 Gev/c) with goal of the calibration of detector modules and the Laser system at a new location of T0-electronics at ALICE. Calibration of HV-values - DONE (see Slides 2 and 3)	HV supply on T0-A detectors should be increased (amplitude of 100 mV). New HV: #1 1370V #2 1570V #3 1760V #8 1530V #11 1460V #12 1750V	
Reinstallation of T0-A detector modules at ALICE	Preparation for the Laser calibration and commission	01 August	DONE T0-A and T0-C detector systems are ready for the Laser calibration and commission.		DAQ and DCS tests will be performed
Laser calibration of T0-A and T0-C detector systems	Laser 1 mip calibration of HV-values	October	Laser calibration of all HV-values for 1 mip (T0-A and T0-C detector systems) In progress		

Проведены работы по модернизации программного обеспечения T0 DCS и включению новых модулей в систему T0 DCS. Модернизирована системы считывания данных в связи с изменениями протокола триггерных сигналов и увеличения числа триггерных классов до 100.

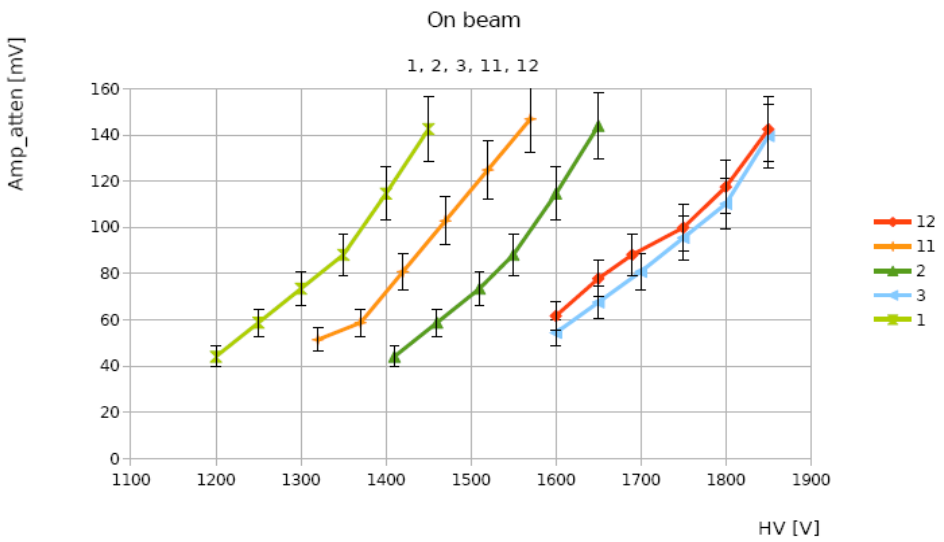


Рисунок 7 – Зависимость амплитуды выходных сигналов детекторов T0-A1, T0-A2, T0-A3, T0-A11, T0-A12 от высокого напряжения ФЭУ-187

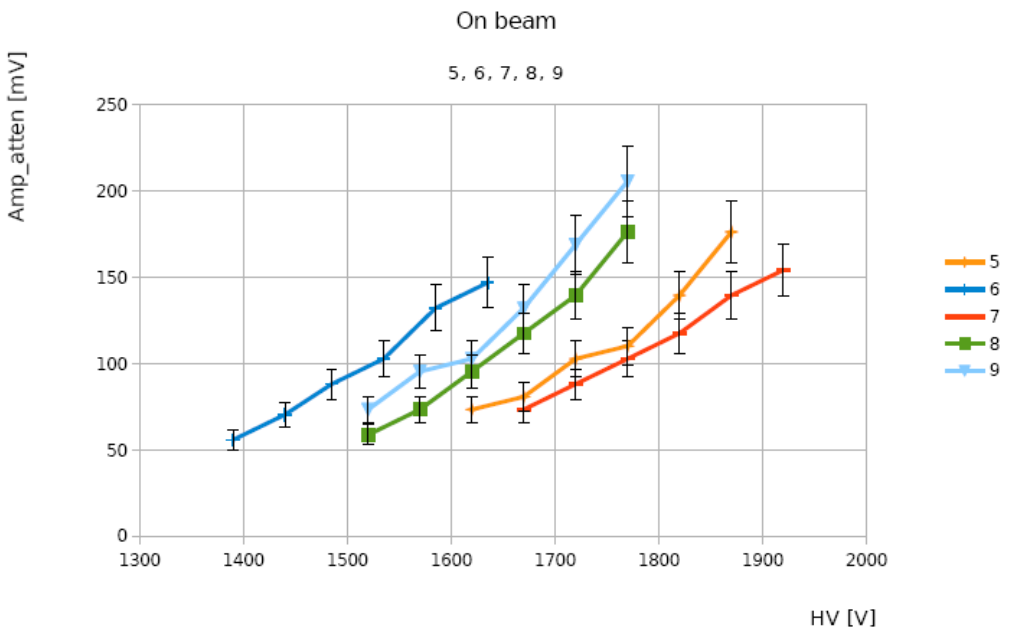


Рисунок 8 – Зависимость амплитуды выходных сигналов детекторов T0-A5, T0-A6, T0-A7, T0-A8, T0-A9 от высокого напряжения ФЭУ-187

В настоящее время проводятся работы по модернизации программного обеспечения детектора T0 . Была подготовлена и встроена в систему HLT (High Level Trigger) программа автоматической калибровки детектора T0 в течение набора данных. Это позволит записать в базу данных OCDB параметры для выравнивания временных сигналов после завершения набора данных и отказаться от существующей двухшаговой схемы автоматической калибровки. Разработана процедура для публикации на странице ALICE QA трендов контроля качества основных результатов реконструкции для каждого рана каждого периода измерений: разрешение детектора и центрирование сигналов о времени взаимодействия вокруг нулевой отметки. На рисунку 9 показаны тренды разрешение детектора T0 и центрирование сигналов о времени взаимодействия вокруг нулевой отметки для периода протонных сеансов периода LHC13g 2013 года.

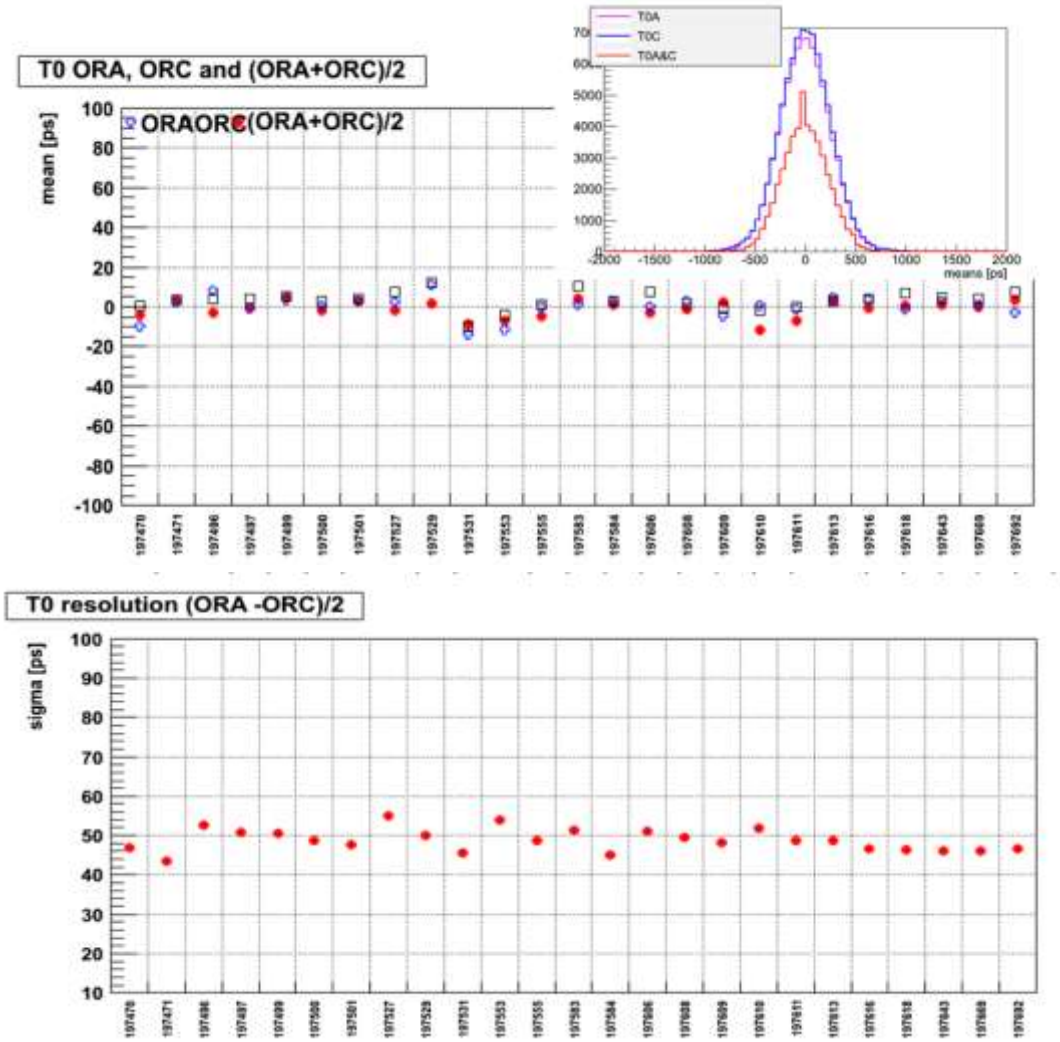


Рисунок 9 – Тренды: разрешение детектора (внизу) и центрирование сигналов о времени взаимодействия вокруг нулевой отметки (вверху)

4.1.9 Работы по подготовке технического проекта детектора FIT (fast Interaction Trigger detector)

В 2013 году был подготовлен TDR (технический проект) по новому детектору FIT (Fast Interaction Trigger, T0-plus), который заменит детектор T0 (из-за его недостаточного аксептанса) и необходимости создания нового мюонного трекера. Технические решения разработки и построения детектора FIT получили одобрение комитета LHCC. В настоящее время ведутся работы по подготовке тестового образца детектора FIT и разработка быстрой электроники.

Усовершенствование детекторных систем мегадетектора ALICE на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН связано с тем, чтобы были обеспечены возможности проведения экспериментальных исследований на пучках БАК после остановки коллайдера в 2017-2018 гг., когда его светимость будет увеличена более, чем в 10 раз, и, соответственно,

откроются возможности исследования редких процессов. Новые условия эксперимента требуют модернизации нескольких ключевых детекторов ALICE, в частности триггерных детекторов. В то же время, в процессе модернизации АЛИСЕ предполагается разработка и добавление других детекторных подсистем, уменьшающих пространство, доступное для монтажа триггерных детекторов на С-стороне. С целью решения этих проблемам, возникает актуальная необходимость разработки и реализации на установке АЛИСЕ нового эффективного метода регистрации элементарных частиц на основе FIT-детектора, который должен обеспечить и, по возможности, расширить функциональные возможности существующих в настоящее время T0, V0 и FMD-подсистем. В настоящее время разработана концепция черенковского T0-Plus-детектора на основе кварцевых радиаторов и микроканальных ФЭУ для триггерного FIT-детектора установки АЛИСА. Для проведения исследований временных и амплитудных характеристик микроканальных ФЭУ был подготовлен прототип элемента детектора. Основными компонентами детектора являются микроканальных ФЭУ XP85012/A1-Q MCP-PMT Planacon с кварцевым окном, кварцевые радиаторы и пассивная быстрая электроника. На рисунке 10 показан механический корпус, четыре кварцевых радиатора, XP85012/A1-Q MCP-PMT. Тестовые испытания были проведены в июле 2014 года на пучке PS, CERN. На рисунке 11 показана экспериментальная установка и расположение триггерных детекторов вдоль оси пучка.

Рисунок 10 – Прототип элемента детектора FIT

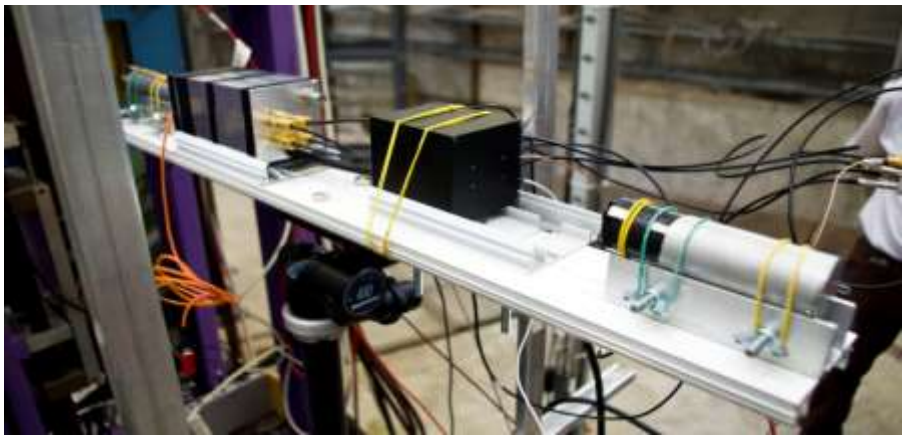


Рисунок 11 – Экспериментальная установка и расположение триггерных детекторов вдоль оси пучка PS, CERN

Для проведения измерений в качестве триггера использовалось совпадение сигналов с двух детекторов T0, расположенных по оси пучка до и после двух прототипов детектор FIT. Микроканальный XP85012/A1-Q MCP-PMT имеет 64 индивидуальных выходов и один общий. Для уменьшения числа каналов была разработана схема, позволяющая иметь один сигнал с 16 анодов MCP-PMT. Объединение этих каналов соответствует положению одного кварцевого радиатора на поверхности MCP-PMT. Три радиатора (1,2,3) имели зеркальную поверхность боковых граней и черненную переднюю поверхность. Четвертый радиатор имел зеркальную поверхность боковых и передней поверхности. Форма сигналов с каждого элемента FIT при прохождении одного пиона через один элемент кварцевого радиатора показана на рисунке 12. Измерения проводились при различных положениях пучка на детекторе ФИТ (рисунок 14).

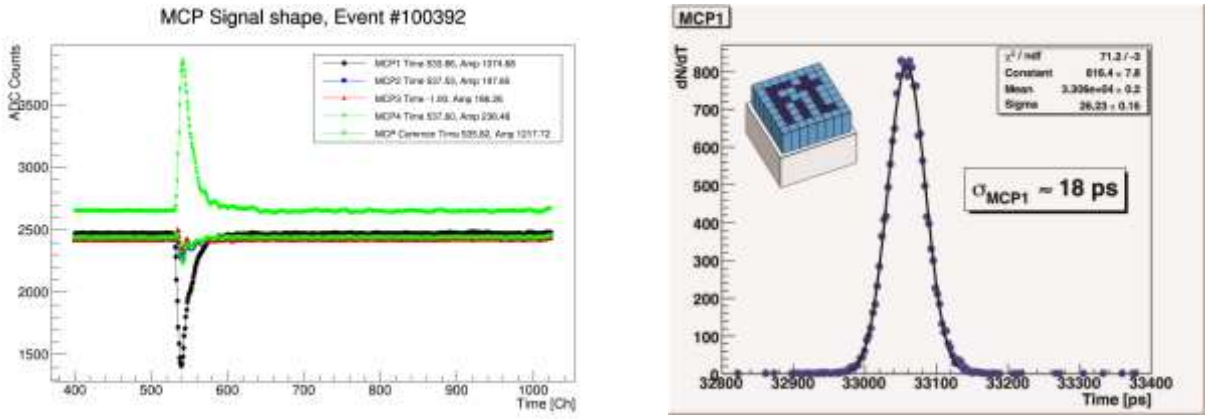


Рисунок 12 – Слева показана форма сигналов с каждого элемента FIT при прохождении одного пиона через один элемент кварцевого радиатора. Справа показано временное разрешение триггерного детектора T0

На рисунке 13 Представлены данные по временному разрешению и положению временного спектра для общего вывода с MCP-PMT.

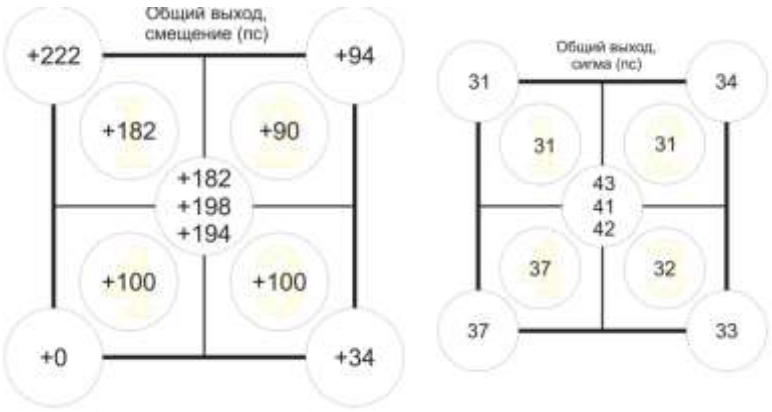


Рисунок 13 – Данные по временному разрешению и положению временного спектра для общего вывода с MCP-PMT

Предварительный анализ этих данных показывает следующее:

1. При использовании общего выхода с MCP-PMT разброс положения временных спектров по площади фотокатода составил около 200 пс, наибольшее отклонение в углах ФЭУ.

2. По квадрантам наибольшее отклонение – в 4-ом квадранте. Однако временное разрешение при направлении пучка в центр этого квадранта (пятно черенковского света имеет диаметр около 4 см, т.е. освещает практически всю площадь, но с большей плотностью фотонов в центре) составило 37 пс.

3. Этот квадрант с зеркалом на передней грани. При облучении детектора с обратной стороны (пучок направлен в центр детектора) временное разрешение составило тоже 37 пс. Однако из-за направленности черенковского излучения и геометрии радиатора освещение фотокатода было более однородным и практически по всей площади, в том числе и в углах. Тем не менее, получено хорошее временное разрешение, позволяющее продолжить работу в направлении использования общего выхода для получения временной информации.

4. Временной разброс при съеме сигналов с квадрантов тоже есть (до 90 пс), но его можно уменьшить правильным съемом сигналов с анодов. Хотя при обратном направлении пучка с квадранта с зеркалом получено разрешение 34 пс.

Run name	MCP-beam orientation	MCPOleg orient. [ch]	Comments MCP_HV=1600V, MCP_Oleg_HV=1763V Noise: 2500	# events / # triggers
26072014-**1025-MCP3-beam**	1 2 / 4 3	10	Beam off. Muon run only.	~2100 / ?
26072014-**1127-MCP3-beam**	1 2 / 4 3	10		59446 / ?
26072014-**1142-MCP3-beam**	1 2 / 4 3	10		50122 / 308028
26072014-**1216-MCP2-beam**	Rot90 Clkwise	11		53540 / 302755
26072014-**1249-MCP1-beam**	Rot90 Clkwise	9		55411 / 302310
26072014-**1325-MCP4-beam**	Rot180 Counter-Clkwise 1 2 / 4 3	No signal		49519 / 286151
26072014-**1353-MCPcenter-beam**	1 2 / 4 3	?		218239 / 1239081
26072014-**1416-MCP-Grease**	?	?		?

Рисунок 14 – Информация о положении пучка во время измерений

Результаты тестирования позволили сформулировать требования к тестовым измерениям ноября 2014.

В ноябре 2014 года были проведены тестовые испытания на пучке PS, CERN с использованием второго прототипа ФИТ детектора.

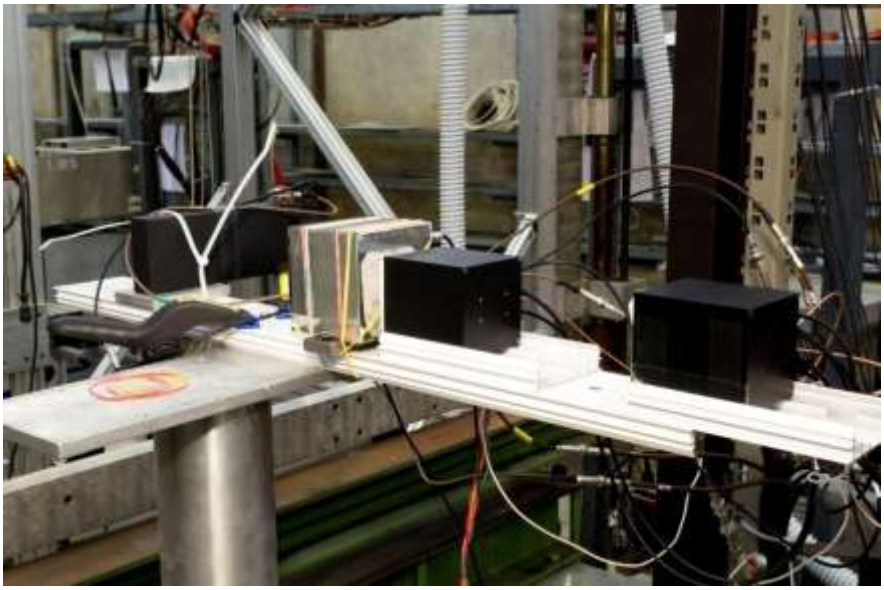


Рисунок 15 – Экспериментальная установка и расположение модулей ФИТ вдоль оси пучка PS, CERN

Тестирование проводилось в широком пучке, т.е. далеко от места выхода пучка. Использовались радиаторы без зачернения передней поверхности на всех радиаторах. На

рисунке 15 показана экспериментальная установка и расположение прототипов ФИТ детекторов вдоль оси пучка. Использование зачернения позволяет хорошо режектировать фоновые события (при облучении детектора с обратной стороны) по амплитуде сигнала. Это хорошо видно на рисунке 16. Однако одной из функции детектора ФИТ является мониторирование фоновых событий. Для этих целей были проведены испытания с радиаторами без зачернения и с зеркальной передней поверхностью. Предварительные результаты обработки показаны на рисунке 16, 17. Детальная обработка данных с оценкой временного и амплитудного разрешения позволит определить тип используемых радиаторов для разработки детектора ФИТ.

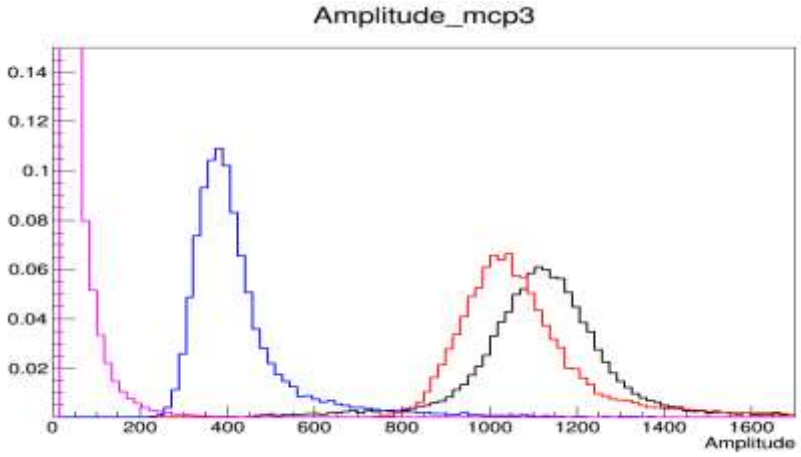


Рисунок 16 – Распределение амплитуд при различных углах облучения прототипа ФИТ детектора с использованием радиаторов с зачернением передней поверхности

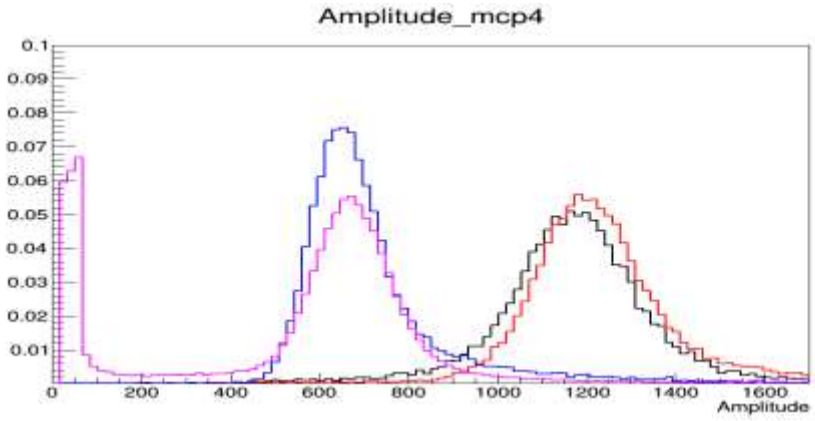


Рисунок 17 – Распределение амплитуд при различных углах облучения прототипа ФИТ детектора с использованием радиаторов с зеркальной передней поверхностью

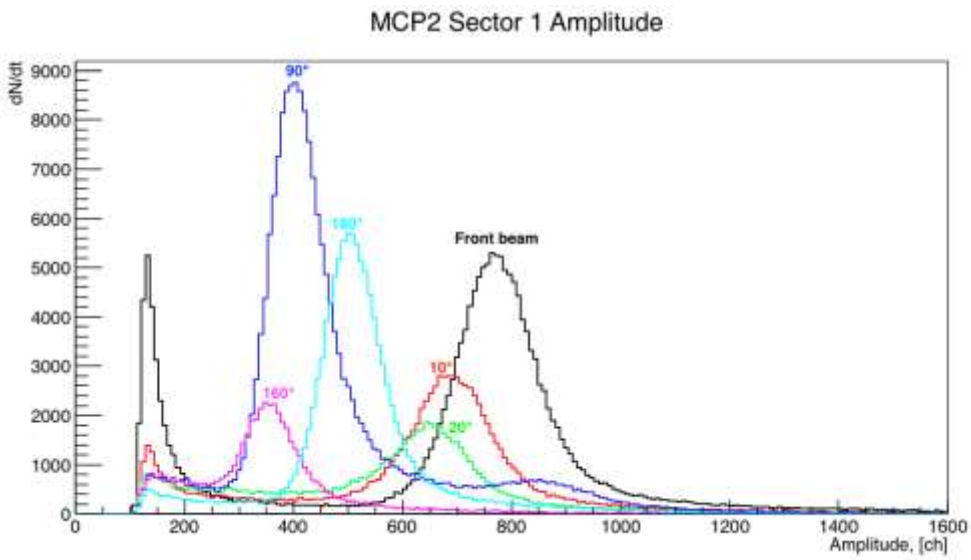


Рисунок 18 – Распределение амплитуд при различных углах облучения прототипа ФИТ детектора с использованием радиаторов без нанесения покрытий на переднюю поверхность

Продолжены работы по моделирование функции отклика детектора ФИТ с учетом реальной геометрии черенковского счетчика и условий эксперимента. Исследовались характеристики детектора ФИТ в зависимости от числа модулей, внутреннего радиуса сборки и расстояния от точки взаимодействия. В систему AliRoot была добавлена директория FIT с программами, описывающими геометрию и отклик детектора. Размер и оптические свойства Черенковских счетчиков в программе соответствуют реальным: MCP-PMT модули размером 64 x 64 x 20 мм с кварцевыми радиаторами 53 x 53 x 20 мм. Каждый радиатор разделен на 4 равные части и работает как независимый регистрирующий элемент. Детекторная система ФИТ-А, состоящая из 24 шт. MCP-PMT модулей, имеет внутренний радиус 2.9 см и расстояние до точки взаимодействия – 330 см.

Детекторная система ФИТ-С (36 модулей) располагается в нише на задней поверхности крепления переднего мюонного трекера. Внутренний радиус составляет 6 см, расстояние до точки взаимодействия – 80 см. Анализ эффективности детектора для протон-протонных и ультра периферических свинцовых взаимодействий был сделан как для полной сборки, так и для 20 внутренних модулей с каждой стороны.

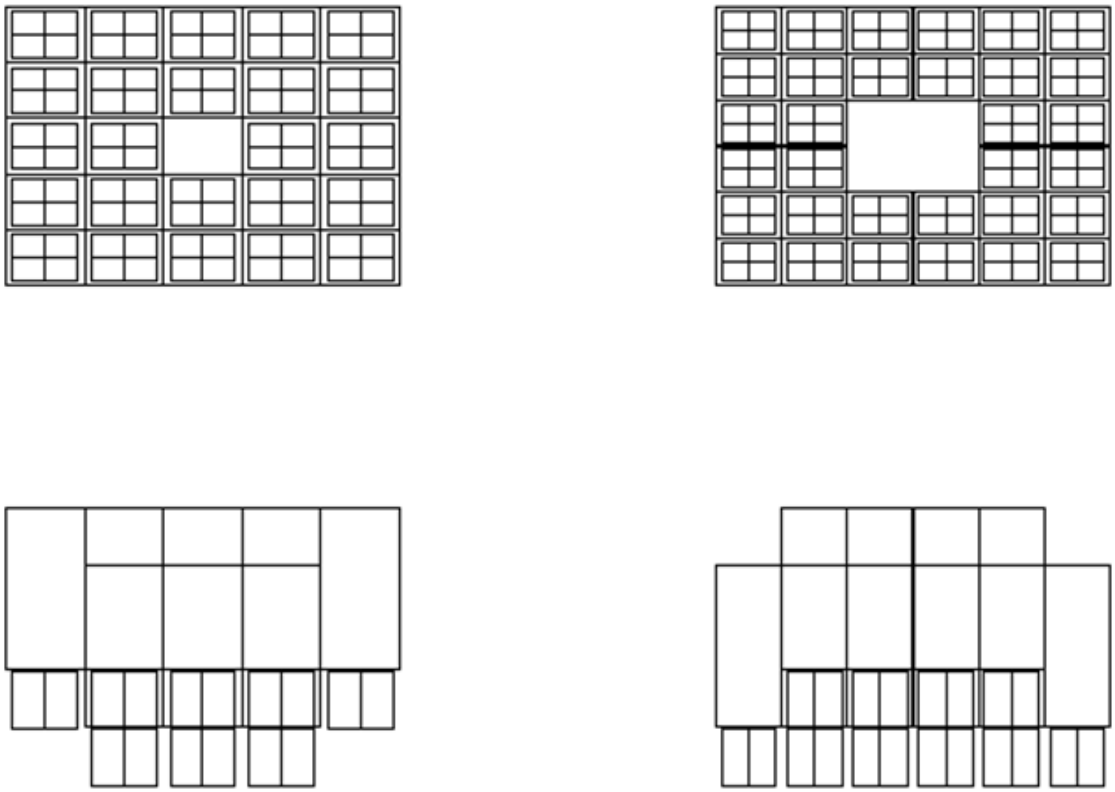


Рисунок 19 – Геометрия детектора ФИТ в новой версии AliRoot. ФИТ-А (слева) и ФИТ-С (справа), фронтальный и боковой виды

Для расчетов протон-протонных взаимодействий с энергией 14 ТэВ использовался генератор PHYTHIA6. На рисунке 20 показаны эффективности срабатывания детектора ФИТ как функции числа первичных частиц. Красная линия соответствует триггеру совпадения А и С , синяя - или А или С для полной сборки: 25 модулей со стороны А и 36 — со стороны С. Полная эффективность в режиме «и» составляет 76%, в режиме «или» 92%. При использовании только 20 внутренних модулей с каждой стороны теряется около 3% событий.

При исследовании ультра периферических взаимодействий детектор ФИТ будет использован как «вето-детектор». Для моделирования эффективности регистрации событий в периферических столкновениях ядер свинца с энергией 5.5 ТэВ события с прицельным параметром 15-21 фм были генерированы программой HIJING. Эффективность регистрации событий детектором ФИТ как функция прицельного параметра при различных конфигурациях детектора показана на рисунке 20. Видно, что ФИТ-А + ФИТ-С обеспечивают практически 100% вето.

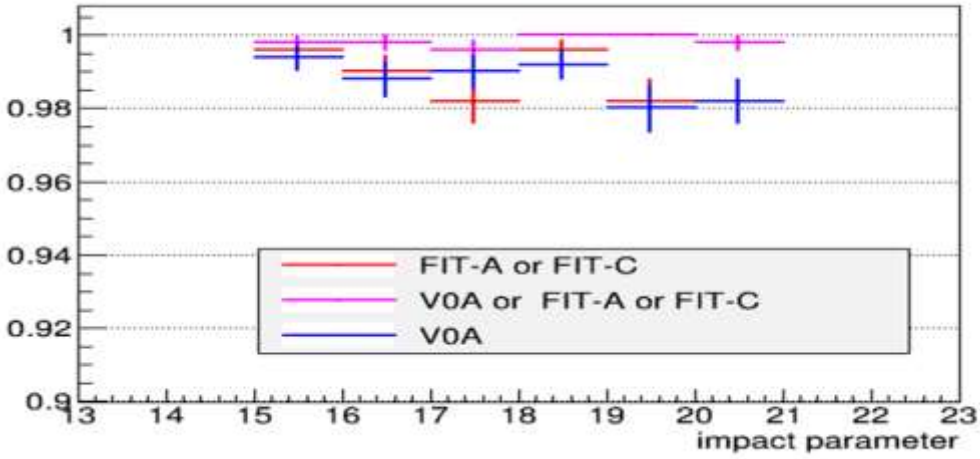


Рисунок 20 – Эффективность регистрации периферических взаимодействий детектором ФИТ как функция прицельного параметра

Подготовлен и представлен доклад на международном совещании:

«XXX-th International Workshop on High Energy Physics «Partical and Astroparticle Physics, Gravitation and Cosmology: Observation and New Project» на тему « ALICE Fast Interaction Trigger detector for the future », 23-27 June 2014.

4.1.10 Предложение постановки новых экспериментов на фиксированной мишени с использованием пучков БАК

Последние эксперименты на LHC показали, что рождение кваркониев (чармония и боттомония) является очень важной частью экспериментов по образованию кварк - глюонной плазмы (КГП) в ядро-ядерных взаимодействиях и необходимо для проверки моделей квантовой хромодинамики (QCD) в протон- протонном рассеянии. Показано, что рождение кваркониев в pp- рассеянии хорошо описывается теорией, в то время как в pPb-столкновениях модели описывают подавление J/ψ, но не могут воспроизвести сильное подавление ψ(2S) и недооценивают подавление Y(1S) при больших быстротах. В экспериментах по PbPb-рассеянию вклад процесса регенерации при малых переданных импульсах достигает 50%; в то же время, он пренебрежимо мал при больших переданных импульсах.

Необходимо проводить такие измерения в большом диапазоне энергий и с высокой статистической точностью для прояснения механизма рождения кваркониев и поиска

условий образования кварк-глюонной плазмы. Известно, что эксперименты с фиксированной мишенью обеспечивают большую светимость по сравнению с экспериментами на коллайдерах.

Наше предложение заключается в возможности использовать фиксированную мишень на пучках БАК в форме тонкого кольца, расположенного в гало пучка, что не мешает другим экспериментам. Это позволяет использовать аппаратуру существующих экспериментов ALICE или LHCb и получать данные с хорошей статистической точностью. Энергия пучков при этом будет находиться между энергиями RHIC и SPS, что даст новую дополнительную информацию.

Группой французских ученых разработан проект нового эксперимента AFTER (A Fixed Target ExpeRiment) на пучках LHC, который использует выведенный в сильном кристаллическом поле пучок. Эксперимент AFTER имеет ряд преимуществ, имеет широкую физическую программу, позволяет использовать мишени большой толщины и получать предельно высокую светимость. Сейчас идет работа над предложением (Letter of intend) по эксперименту на фиксированной мишени для ЦЕРНа, однако стоимость эксперимента AFTER очень высока. Эксперимент с мишенью в форме тонкого кольца мог бы являться первым шагом в эксперименте AFTER.

4.1 Публикации

1.Multiplicity dependence of jet-like two-particle correlations in pPb collisions at sqrt(sNN) = 5.02 TeV with ALICE at LHC , Phys. Lett. B 741 (2015) 38-50

2.Suppression of psi(2S) production in p-Pb collisions at sqrt(s_NN)=5.02 TeV JHEP12(2014)073

3.Measurement of prompt D-meson production in p–Pb collisions at sqrt(sNN) = 5.02 TeV PRL 113, 232301 (2014)

4.Exclusive J/ψ photoproduction off protons in ultra-peripheral p-Pb collisions at √sNN = 5.02 TeV ,Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 232504

5.Production of inclusive Y(1S) and Y(2S) in p-Pb collisions at sqrt(sNN) = 5.02 TeV Phys. Lett. B 740 (2015) 105-117

6.Measurement of visible cross sections in proton-lead collisions at sqrt(s_NN)=5.02 TeV in van der Meer scans with the ALICE detector ,JINST 9 (2014) 1100

7.Multi-particle azimuthal correlations in p-Pb and Pb-Pb collisions at the CERN Large Hadron Collider,Phys. Rev. C 90 (2014) 054901

8.Event-by-event mean pT fluctuations in pp and Pb-Pb collisions at the LHC Eur. Phys. J. C (2014) 74-3077

9.Freeze-out radii extracted from three-pion cumulants in pp, p-Pb and Pb-Pb collisions at the LHC Phys. Lett. B 739 (2014) 139-

10.Neutral pion production at midrapidity in pp and PbPb collisions at sqrt(sNN) = 2.76 TeV , Eur. Phys. J. C (2014) 74-3108

11.Suppression of Upsilon(1S) at forward rapidity in Pb-Pb collisions at sqrt(s_NN) = 2.76 TeV, Phys. Lett. B 738 (2014) 361-372

12.Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC Int. J. Mod. Phys. A 29 (2014) 1430044

13.Beauty production in pp collisions at sqrt(s) = 2.76 TeV, measured using semi-electronic decays PLB 738 (2014) 97-108

14. Transverse momentum dependence of inclusive primary charged-particle production in pPb collisions at sqrt(sNN) = 5.02 TeV: Eur. Phys. J. C 74 (2014) 3054

15.Azimuthal anisotropy of D meson production in Pb-Pb collisions at sqrt(s_NN) = 2.76 TeV , Phys. Rev. C 90 (2014) 034904

16. Measurement of quarkonium production at forward rapidity in pp collisions at √s = 7 TeV, Eur. Phys. J. C 74 (2014) 2974

17. Production of charged pions, kaons and protons at large transverse momenta in pp and Pb–Pb collisions at sqrt(sNN) = 2.76 TeV, PLB 736 (2014) 196-207

18. Centrality, rapidity and transverse momentum dependence of J/psi suppression in Pb-Pb collisions at sqrts(s_NN)=2.76 TeV,Phys. Lett. B 734 (2014) 314-327

19. Measurement of charged jet suppression in Pb-Pb collisions at √sNN=2.76 TeV,JHEP03(2014)013

20. J/Psi production and nuclear effects in p-Pb collisions at sqrt(s)=5.02 TeV, JHEP 02 (2014) 073

21.Two and Three-Pion Quantum Statistics Correlations in Pb-Pb Collisions at sqrt(sNN)=2.76 TeV at the LHC, Phys. Rev. C 89 (2014) 024911

22.W. Fischer, A. J. Baltz, M. Blaskiewicz, D. Gassner, K. A. Drees, Y. Luo, M. Minty, P. Thieberger, M. Wilinski, and I. A. Pshenichnov, Measurement of the total cross section of uranium-uranium collisions at sqrt(sNN)=192.8 GeV, Phys. Rev C 89, 014906 (2014)

23. L. Burigo, I. Pshenichnov, I. Mishustin, M. Bleicher,

Microdosimetry spectra and RBE of 1H, 4He, 7Li and 12C nuclei in water studied with Geant4, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. With Mater. Atoms. 320 (2014) 89–99. doi:10.1016/j.nimb.2013.10.018.

24. L.N. Burigo, I. a Pshenichnov, I.N. Mishustin, M. Bleicher, Radiation quality of cosmic ray nuclei studied with Geant4-based simulations, J. Phys. Conf. Ser. 503 (2014) 012021. doi:10.1088/1742-6596/503/1/012021

Выступления на международных совещаниях и конференциях

1. Igor Pshenichnov, "Electromagnetic fragmentation of nuclei: recent news and future plans" Workshop on photon-induced collisions at the LHC, CERN, Geneva, June 2-4, 2014
2. T.Karavicheva, A.Kurepin and W.Trsaska, “ALICE Fast Interaction Trigger detector for the future” XXX-th International Workshop on High Energy Physics “Particle and Astroparticle Physics, Gravitation and Cosmology: Predictions, Observations and New Projects” Protvino, 23-27 June 2014
3. N.S.Topilskaya and A.B.Kurepin- “Charmonium production in heavy ion collisions and suggestion of new experiments on fixed target.” XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics, Dubna, 14-20 September 2014.
4. I.A.Pshenichnov, “Multifragment break-up of ^{12}C in photonuclear reactions — a theorist's point of view” XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems - Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics, Dubna, 14-20 September 2014.

4.2 Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)

Руководитель работ к.ф.-м.н. Ф.Ф.Губер.

Список исполнителей:

Зав. Лабораторией з.д.н. А.Б. Курепин
Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. А.П. Ивашкин
Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. А.И. Решетин
Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. Т.Л. Каравичева
Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. А.С. Садовский
Научный сотрудник М.Б. Голубева
Научный сотрудник С.В. Морозов
Младший научный сотрудник О.А. Петухов
Младший научный сотрудник О.В. Андреева
Техник С.К. Попов

4.2 Введение

Актуальность проблемы. Основные цели эксперимента ХАДЕС

Физическая программа работ на широкоапертурном магнитном спектрометре ХАДЕС направлена на поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии – фундаментальной симметрии сильных взаимодействий. При нулевой температуре и барионном химическом потенциале физический КХД-вакуум обладает двумя основными характеристиками: конфайнментом и спонтанно нарушенной киральной симметрией. Нарушение киральной симметрии определяет базовые свойства наблюдаемого мира, в частности, массовый спектр легких адронов. В столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях устанавливаются экстремальные температуры и плотности, при которых ожидается «плавление» кирального конденсата и формирование кирально-симметричной среды. Однако, уже при энергиях налетающих ядер порядка 1 ГэВ на нуклон в лабораторной системе данные эффекты могут проявиться, в частности, в изменении свойств легких векторных мезонов (сдвиг массы и изменение ширины резонансов), рожденных в ядро-ядерных столкновениях. Изучение свойств этих мезонов посредством детектирования их распадов с испусканием электрон-позитронных пар является важнейшим направлением исследований на установке ХАДЕС.

Исследование коллективных потоков заряженных частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ядер, также является одним из важных направлений на ХАДЕСе.

При энергиях пучка порядка 1-2 ГэВ на нуклон, основная мотивация для изучения потоков связана с исследованием уравнения состояния ядерной материи. Исследование уравнения состояния ядерной материи посредством оценки её сжимаемости позволяет на макроскопическом уровне поставить предел массам нейтронных звезд, что важно для понимания эволюции звезд и астрофизики в целом.

Для корректной интерпретации данных, полученных в столкновениях тяжелых ионов, необходима также информация об элементарных нуклон-нуклонных столкновениях, которая позволит выделить эффекты в ядерных столкновениях. В настоящее время установка ХАДЕС является единственным спектрометром в мире, изучающим образование дилептонов, а также заряженных пионов, каонов и фрагментов ядер в различных сталкивающихся системах: pp, dp, pA, AA в области энергий столкновений ~1-4 ГэВ на нуклон.

Группа ИЯИ РАН (11 чел. из них 2 молодых ученых) участвуют в международной коллаборации ХАДЕС (ГСИ, г. Дармштадт, Германия) с 1998 года. Коллаборация ХАДЕС включает в свой состав 17 Институтов из 9 Европейских стран.

4.2 Наиболее важные научные достижения группы ИЯИ РАН в эксперименте ХАДЕС в 2014 г.

В 2014 г. группа ИЯИ РАН продолжала анализ азимутальных потоков частиц, полученных в результате изучения реакции Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон на установке ХАДЕС. Анизотропные потоки частиц являются независимыми наблюдаемыми для описания свойств и эволюции системы, образующейся в ядро-ядерном взаимодействии. Исследование азимутальных потоков легких изотопов водорода (протонов, дейтронов и ядер трития) расширено на высшие гармоники. Впервые в данном диапазоне энергий удалось определить ненулевой вклад третьей и четвертой гармоник ряда Фурье, что еще не было достигнуто в других экспериментах при этих энергиях. Предварительные результаты были доложены на двух внутренних совещаниях коллаборации ХАДЕС, на международной конференции QM, которая состоялась в конце мая в Дармштадте и на XXII международном семинаре им. Балдина по проблемам физики высоких энергий в Дубне в сентябре 2014 г. По материалам семинара готовится публикация в сборнике материалов конференции.

Группа ИЯИ РАН продолжила в 2014г. участие в создании новой детекторной системы установки ХАДЕС – электромагнитного калориметра для исследований на пучках как действующего ускорителя SIS18 в GSI, так и создаваемого ускорителя SIS-100 на ФАИР

в г.Дармштадте, Германия. Были проведены тестовые измерения энергетического разрешения модулей электромагнитного калориметра с различными типами ФЭУ как космическом излучении, так и на пучке электронов в Майнце. При активном участии ИЯИ РАН был подготовлен технический проект калориметра, который после прохождения внешней экспертизы был одобрен и принят исполнительным комитетом ФАИР.

4.2 Отчёт об участии групп ИЯИ РАН в эксперименте ХАДЕС в 2014г.

В 2014 году работа по эксперименту ХАДЕС группой ИЯИ РАН проводилась по трём основным направлениям:

- анализ экспериментальных данных по столкновению тяжелых ионов золота Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с фиксированной мишенью, полученных на установке ХАДЕС в 2012г.;

- разработка, моделирование и тестирование электромагнитного калориметра, создаваемого для установки ХАДЕС для работы на пучках, как на действующем ускорителе SIS18 в GSI, так и на создаваемом ускорителе SIS-100 комплекса ФАИР в Дармштадте;

– участие в сеансе на пучке пионов, проведенном в 2014 году, с последующей калибровкой переднего годоскопа.

Впервые были получены параметры гармоник третьего (v_3) и четвертого (v_4) порядков для азимутальных распределений потоков протонов (Рисунок 1). Антисимметрия v_3 и симметрия v_4 распределений, в зависимости от быстроты y_0 (и проинтегрированных по поперечному импульсу для p_t > 303 МэВ/с) хорошо согласуются с ожидаемой симметрией относительно быстроты С.Ц.М. сталкивающихся ядер для этих гармоник. Предварительная оценка вклада максимальной систематической ошибки составляет порядка ±0.005 для v_3 и ±0.002 v_4. Вклад части эффектов систематики, изученных к настоящему моменту, позволяет утверждать, что эти гармоники также отличны от нуля. Для определения угла плоскости реакции, относительно которой определяются потоки частиц, используется передний 300 канальный сцинтилляционный годоскоп, разработанный группой ИЯИ РАН. В 2004 г. была подготовлена и опубликована статья с подробным описанием переднего годоскопа и метода определения плоскости реакции [О.В. Андреева, М.Б.Голубева, Ф.Губер и др., ПТЭ, № 2, с. 1–18, 2014].

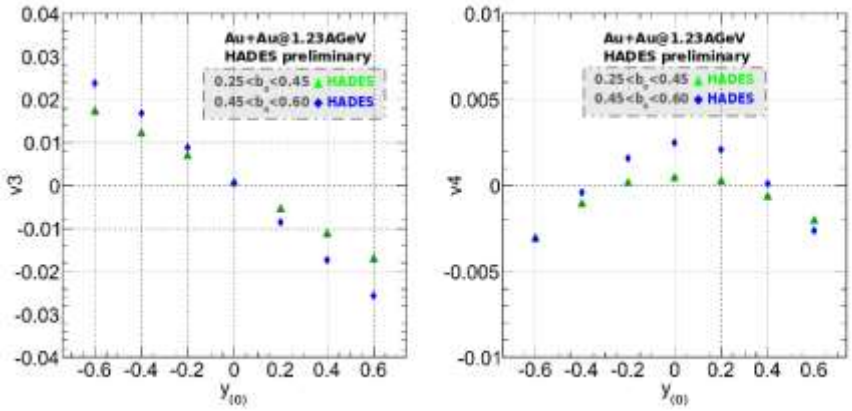


Рисунок 1 – Азимутальные потоки v3 и v4 протонов, впервые получаемых в реакции Au+Au при энергии налетающего пучка ядер золота 1.23 ГэВ на нуклон в эксперименте ХАДЕС

Предварительное изучение v_1, v_2, v_3 и v_4 потоков было проведено (аналогично анализу для протонов) также для ядер дейтрона и трития. Сравнение полученных результатов с результатами эксперимента FOPI при аналогичных условиях отбора показывает их хорошее согласие.

В 2014 г. был также продолжен анализ азимутальных потоков для подпорогового рождения положительно заряженных каонов. Получены предварительные распределения по быстроте для первых двух гармоник v_1 и v_2. Однако изучение влияния эффектов отбора, в отличие от соответствующего анализа для протонов, дейтронов и трития, заметно сказываются на систематике распределений. В настоящее время ведется работа по разработке более аккуратной методики вычитания фона. Процесс изучения потоков нейтральных каонов также требует более тщательного изучения систематики в зависимости от настроек отбора треков.

Предварительные результаты анализа по потокам заряженных частиц были доложены в 2014г. на двух внутренних совещаниях коллаборации ХАДЕС, были включены в обзорный доклад по результатам ХАДЕСа на международной конференции QM, которая состоялась в конце мая в г.Дармштадте и были доложены на XXII международном семинаре им. А.М. Балдина по проблемам физики высоких энергий в Дубне в сентябре 2014 г. По материалам семинара готовится публикация.

Группа ИЯИ РАН продолжила в 2014г. участие в создании новой детекторной системы установки ХАДЕС - электромагнитного калориметра. Ранее планировалось, что данный электромагнитный калориметр будет использоваться как одна из детекторных систем ХАДЕСа в экспериментах на ускорителе SIS100 на ФАИР. Однако, в связи со

сдвижкой планов сооружения и ввода в эксплуатацию ускорительного комплекса ФАИР, электромагнитный калориметр планируется собрать в течение 2015-2016гг и начать физические эксперименты с использованием этого калориметра на пучках действующего ускорителя SIS18 в GSI уже 2017 г.

Ещё в 2008г. группа ИЯИ РАН предложила использовать в качестве основных элементов существующие модули использованного ранее калориметра установки OPAL в ЦЕРНе. Более 1000 этих модулей были отобраны силами ИЯИ РАН в ЦЕРНе и доставлены в ГСИ. Коллаборация ХАДЕС оценила это как “in-kind” вклад ИЯИ РАН в данный проект на сумму 1 млн. евро. Радиатором модулей калориметра является свинцовое стекло марки CEREN 25 с размерами 92x92x420 мм. Геометрия калориметра повторяет общую структуру детекторных систем ХАДЕСа и также состоит из 6 секторов, каждый из которых собран из 163 модулей (Рисунок 3, слева).

Для использования этих модулей в калориметре ХАДЕСа группа ИЯИ РАН уже несколько последних лет ведет работу по их полной реконструкции с заменой фотоумножителей, отражателей и реконструкцией корпусов. К концу 2014г. силами группы ИЯИ РАН полностью реконструированы около 800 модулей из 978 модулей, необходимых для сборки 6 секторов калориметра. Испытания реконструированных модулей калориметра на космике проводятся в ГСИ на специальном стенде, созданном ИЯИ РАН, позволяющем тестировать одновременно 5 модулей калориметра.

В начале 2014 года был проведен сеанс на пучке «меченных» гамма квантов на электронном ускорителе в Майнце (Германия) с участием ИЯИ РАН. В качестве системы сбора данных группой ИЯИ РАН была разработана система с использованием 16 канального модуля CAEN DT-5742 для считывания амплитуды сигналов с модулей калориметра. Целью данного сеанса было исследование энергетического разрешения модулей электромагнитного калориметра в зависимости от энергии гамма квантов для различных типов фотоумножителей, которые предполагается использовать при окончательной сборке модулей. Результаты измерений энергетического разрешения для различных типов фотоумножителей показаны на рисунке 2, справа. Здесь же приведены значения стохастического члена в энергетическом разрешении. Видно, что наилучшее разрешение получено для трехдюймовых ФЭУ Hamamatsu R6091. Получена хорошая линейность отклика для модулей с ФЭУ EMI 9903KB и Hamamatsu R6091.

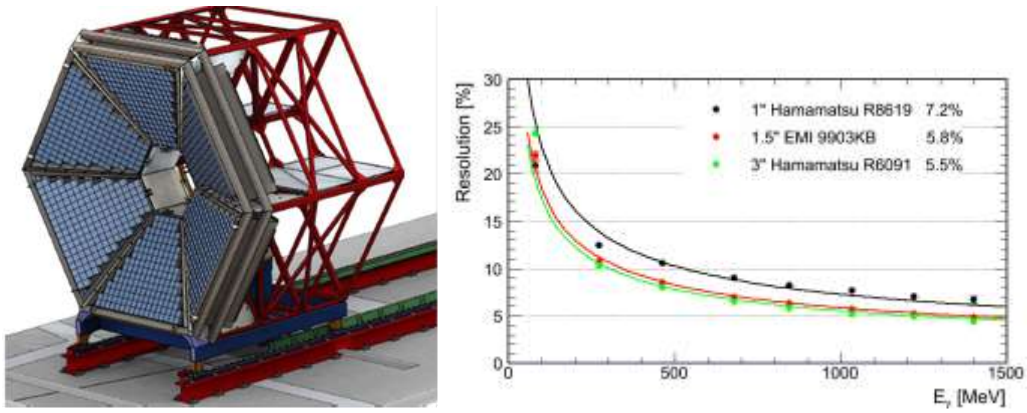


Рисунок 2 – Слева - схема общего вида электромагнитного калориметра установки ХАДЕС; справа - Зависимость энергетического разрешения модуля калориметра от энергии гамма квантов

Однако, эти фотоумножители достаточно дорогие и, в качестве альтернативы, группой ИЯИ РАН в 2014 г. было предложено использовать российские трехдюймовые ФЭУ производства МЭЛЗ – ФЭУ-184ТД. Были закуплены образцы этих ФЭУ и проведены тестовые измерения энергетического разрешения модуля калориметра на космических мюонах с использованием этих ФЭУ и, для сравнения, аналогичные измерения проведены с ФЭУ Hamamatsu R6091.

Полученное энергетическое разрешение модуля с ФЭУ-184ТД ($\sigma \sim 6.1\%$), более чем в полтора раза лучше, чем разрешение модуля, полученное с ФЭУ Hamamatsu R6091. В дальнейшем планируется продолжить работы по подбору режимов ФЭУ-184ТД таким образом, чтобы обеспечить требуемые значения как временных, как и амплитудных характеристик модуля калориметра и провести измерения отклика модуля калориметра, как на космическом излучении, так и на пучке.

В 2014 г. была завершена работа с участием ИЯИ РАН по подготовке технического проекта калориметра (arXiv:1109.5550 [nucl-ex]). Окончательный вариант проекта был направлен на внешнюю экспертизу в ФАИР в начале мая 2014г. (Рисунок 3, слева) и в октябре 2014 г. проект утвержден ФАИР (Рисунок 3, справа).

Рисунок 3 – Титульная страница технического проекта электромагнитного калориметра (слева) и письмо из ФАИР с одобрение данного проекта (справа)

В техническом проекте приведены также распределения работ и координаторы направлений работ по созданию калориметра между институтами, входящими в коллаборацю ХАДЕС (Таблица 1). В соответствии с этим распределением ИЯИ РАН участвует в реконструкции и сборке модулей калориметра и в их тестовых испытаниях.

Таблица 1. Распределение работ и координаторы направлений работ по созданию калориметра между институтами, входящими в коллаборацю ХАДЕС.

Organization

Organization	Coordinator	Responsibility	Manpower (FTE/year)
IP Bratislava	S. Hlavac	optical read-out, magnetic shielding	1
TU / GSI Darmstadt	W. Koenig	FE Electronics	2
TU / GSI Darmstadt	T. Galatyuk	FPGA-TDC based readout electronics	3
Frankfurt University	C. Blume	FE electronics, calibration	1
Krakow University	P. Salabura	ADC-base FEE, Ecal main frame construction, DAQ	3
INR Moscow	F. Guber	modules assembly and tests	2
TU Munich	L. Fabbietti	simulations	1
NPI Rez	P. Tlusty	modules assembly, optical read-out, LED monitoring system	3

В июле – сентябре 2014 г. на установке ХАДЕС впервые были проведены эксперименты на пучке пионов. Вторичный пучок пионов формировался каналом транспортировки частиц от пионообразующей мишени (Be) до мишени установки ХАДЕС. Интенсивность пучка пионов во время сеанса составляла порядка (1-2)x10^5 пионов в сек.

Во время первого сеанса проводились измерения выходов K мезонов, Λ и φ в реакциях взаимодействия отрицательных пионов с ядрами при импульсе налетающих пионов 1.7 ГэВ/с с ядрами вольфрама м углерода. Полученные данные важны для исследования эффектов поглощения странных частиц и корреляций нуклонов в холодной ядерной среде.

Во втором сеансе программа измерений была направлена на исследование выходов электрон-позитронных пар от барионных резонансов с целью изучения подпороговой связи ρ-мезона с барионными резонансами из второй резонансной области (N(1520) и N1535)). В частности, были проведены измерения выходов электрон-позитронных пар при взаимодействии отрицательно заряженных пионов с импульсом 0.69 ГэВ/с (√s = 1.49 ГэВ) с полиэтиленовой мишенью. При этой энергии (ниже порога образования η мезона), можно разделить с помощью кинематических ограничений вклады от пион-протонных и пион-углеродных взаимодействий и, таим образом, изучить одновременно эксклюзивный канал pi-p->e+e- n и инклюзивное образование e+e- на ядрах углерода. Были проведены также измерения вблизи этой центральной энергии функции возбуждения образования одного и двух пионов. Измерения выполнены для √s=1.46 (p=0.656 ГэВ/с), √s=1.49 (p=0.69 ГэВ/с), √s=1.526 (p=0.748 ГэВ/с), √s=1.55 (p=0.8 ГэВ/с). Эти измерения необходимы для дальнейшего парциально волнового анализа (PWA) для получения ограничений на возбуждение ρ резонансов в этой области энергии и их распадов ρ→2π.

Группа ИЯИ РАН принимала участие в этих двух сеансах и обеспечивала работу 300-канального переднего годоскопа, его калибровку на космическом излучении и на пучке, а также дежурила в сменах во время сеансов. При подготовке к экспериментам на пионном пучке группой ИЯИ были проведены работы по вводу в рабочий режим переднего годоскопа Forward Wall. Были заменены пришедшие в негодность ФЭУ. Ячейки годоскопа были тщательно откалиброваны как по временному отклику, так и по амплитудному спектру. Калибровочные константы были занесены в общую базу данных эксперимента ХАДЕС для дальнейшего использования в режиме offline обработки экспериментальных данных, набранных на пучках пи-мезонов в 2014г.

Детальное описание годоскопа и системы сбора данных приведены в опубликованной нами статье (О. В. Андреева, М. Б. Голубева, Ф. Ф. Губер и др., ПТЭ, 2014, № 2, с. 1–18).

4.2 Список публикаций коллаборации ХАДЕС с участием соавторов группы ИЯИ РАН и группы ИТЭФ за 2014 г.

1. Передний сцинтилляционный годоскоп для регистрации ядерных фрагментов на установке ХАДЕС, О. В. Андреева, М. Б. Голубева, Ф. Ф. Губер, А. П. Ивашкин, A. Krasa*, A. Kugler*, А. Б. Курепин, О. А. Петухов, А. И. Решетин, А. С. Садовский, O. Svoboda*, Ю. Г. Соболев*, P. Tlusty*, Е. А. Усенко. ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2014, № 2, с. 1–18, Instrum.Exp.Tech.57**(2014)**103-119. DOI: 10.1134/S0020441214020146

2. Baryon resonance production and dielectron decays in proton-proton collisions at 3.5 GeV, HADES collaboration, (G. Agakishiev, …ИЯИ - M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky,…, et al.) e-Print: arXiv:1403.3054 [nucl-ex] Eur.Phys.J.A50(2014)82. DOI: 10.1140/epja/i2014-14082-1

3. Electromagnetic calorimeter for the HADES@FAIR experiment HADES Collaboration (O. Svoboda, ….. ИЯИ - M.Goubeva, F.Guber, A.Ivashkin, A.Reshetin.et al.) JINST 9 (2014) Я05002. DOI: 10.1088/1748-0221/9/05/C05002

4. Associate K^0 production in p+p collisions at 3.5 GeV: The role of Delta(1232)++ HADES Collaboration (G. Agakishiev,… ИЯИ - M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky,…, et al.) e-Print: arXiv:1403.6662 [nucl-ex] Принята в печать в Phys.Rev.C

5. Searching a Dark Photon with HADES HADES Collaboration (G. Agakishiev, … ИЯИ - M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky,… , et al.) Phys.Lett. B731 (2014) 265-271. DOI: 10.1016/j.physletb.2014.02.035 e-Print: arXiv:1311.0216 [hep-ex]

6. Lambda hyperon production and polarization in collisions of p(3.5 GeV)+Nb, HADES Collaboration (G. Agakishiev, … ИЯИ - M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky…, et al.) Eur.Phys.J. A50 (2014) 81. DOI: 10.1140/epja/i2014-14081-2 e-Print: arXiv:1404.3014 [nucl-ex]

7. In-medium hadron properties measured with HADESБ HADES Collaboration (J. Pietraszko, … ИЯИ - M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky,…,et al.). EPJ Web Conf. 66 (2014) 04023 DOI: 10.1051/epjconf/20146604023

8. Low mass dielectrons radiated off cold nuclear matter measured with HADES
M. Lorenz, … ИЯИ - M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky…,et al. EPJ Web Conf. 66 (2014) 09011.
DOI: 10.1051/epjconf/20146609011

9. Medium effects in proton-induced *K*0 production at 3.5 GeV

HADES Collaboration (G. Agakishiev, … ИЯИ - M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky…, et al.) Phys. Rev. C 90 (2014), 054906.

DOI: http://dx.doi.org/10.1103/

10. Time of flight measurement in heavy-ion collisions with the HADES RPC TOF wall HADES Collaboration (G. Agakishiev, … ИЯИ - M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky…,et al.) JINST 9 (2014) 11, C11015.

DOI: 10.1088/1748-0221/9/11/C11015

11. Electromagnetic Calorimeter for HADES Experiment

P. Rodríguez-Ramos,…(ИЯИ) M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, O. Pethukov, et al.,

for the HADES Collaboration, Eur. Phys. J. Web Conf. 81 (2014) 06009.

DOI: 10.1051/epjconf/20148106009

12. Measurement of the quasi free np → npπ+π− and np → ppπ−π0 reactions at 1.25 GeV With HADES. HADES Collaboration (G. Agakishiev, … ИЯИ - M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky…, et al.) EPJ Web of Conferences 81, 02009 (2014). http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20148102009

4.2 Доклады на конференциях и школах

1. A.Sadovsky, First indication of the triangular (v3) and quadrangular (v4) flow of light hydrogen isotopes in Au+Au collisions at $\sqrt{sNN}$ =2.4 GeV.

The XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics", September 15 – 20 September, 2014, Dubna, Russia.

4.2 Информация по специалистам ИЯИ РАН, участвующим в эксперименте в 2014 г.

Число специалистов, участвующих в ХАДЕС 11 (4 только в ИЯИ)

Число молодых специалистов, привлеченных в эти работы 2 (1 только в ИЯИ)

Число студентов - участников экспериментов 1

Число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных в рамках участия в работах центра -

Число докладов от имени коллабораций, сделанных российскими учеными 1

Число публикаций в ведущих научных журналах 12:

Phys/Lett - 1 публ.

JINST – 2 публ.

Phys.Rev. C – 2 публ. (одна из них принята в печать).

Eur.Phys.J. - 2 публ.

EPJ Web of Conf-4 публ.

ПТЭ – 1 публикация.

4.2 План участия группы ИЯИ РАН в эксперименте HADES на 2015

В 2015 г. группой ИЯИ будет проводиться дальнейший анализ полученных на установке HADES экспериментальных данных по потокам каонов v_1 и v_2 в реакции столкновений ядер золота при энергии налетающих ядер золота 1.23 ГэВ на нуклон.

Планируется детальное исследование систематических ошибок при определении полученных параметров азимутального потока протонов вплоть до v_4, а также проведение анализа распределений по поперечному импульсу. Будет продолжено изучение систематических ошибок в определении коллективных потоков дейтрона и трития и исследование возможности извлечения компоненты потока следующего порядка v_4.

Будут продолжены работы по реконструкции, сборке и тестированию модулей электромагнитного калориметра, в соответствие с общим планом работ на ХАДЕС по сборке калориметра и его запуску в 2017 г.

Планируется участие и доклады группы ИЯИ на совещаниях коллаборации ХАДЕС и в международных совещаниях.

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

Руководитель работ з.д.н. А.Б.Курепин.

Ответственный исполнитель от ИЯИ РАН:

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. Ф.Ф. Губер

Список исполнителей:

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н.	А.П. Ивашкин
Старший научный сотрудник к.ф.-м.н.	А.С. Садовский
Научный сотрудник	М.Б. Голубева
Научный сотрудник	С.В. Морозов
Младший научный сотрудник	О.А. Петухов
Младший научный сотрудник	О.В. Андреева
Техник	С.К. Попов

4.3 РЕФЕРАТ

КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА СИЛЬНОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ, ДЕКОНФАЙМЕНТ, ПРОТОН-ПРОТОННЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, ЯДРО-ЯДЕРНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭНЕРГИИ, МНОЖЕСТВЕННОСТЬ, ПОПЕРЕЧНЫЙ ИМПУЛЬС, АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР, ФЛУКТУАЦИИ, ДАЛЬНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ.

В эксперименте от ИЯИ участвуют 8 человек – из них 7 научных сотрудников, (включая 2 сотрудников моложе 36 лет), 1 техник.

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}Be + ^{9}Be, Ar +Sc и Xe + La при энергиях 13, 20, 30, 40, 80, 158 ГэВ на нуклон и рассчитана до 2017 г.

В 2014 г. проведен предварительный анализ по выходом отрицательных пионов в реакции ^{7}Be + ^{9}Be на фрагментированном пучке ядер ^{7}Be при энергиях налетающих ядер бериллия 40 - 158 АГэВ и по выходам положительно заряженнных пионов в реации p+p при тех же энергиях 40 - 158 АГэВ. Завершен анализ и опубоикованы результаты по выходам отрицательно заряженных пионов в реации p+p при энергиях 20 - 158 АГэВ. Для измерения центральности в реакции^{7}Be + ^{9}Be в использовался передний адронный калориметр, разработанный и изготовленный в ИЯИ РАН.

Основные направления работы Института ядерных исследований РАН в 2014 г. в ЦЕРНе.

1. Завершение модернизации электроники контроля параметров модулей адронного калориметра. Эта электроника включала в себя систему мониторинга коэффициентов усиления лавинных фотодиодов, систему контроля питания фотодиодов и систему стабилизации и контроля температуры фотодиодов.

2. Калибровка переднего адронного калориметра на пучках мюонов и адронов.
3. Участие в подготовке переднего адронного калориметра к сеансу по измерению выходв частиц в реакции p + Pb при энергии налетающего пучка протонов 158 ГэВ, обеспечение работоспособности калориметра и контроля качества данных во время сеанса, участие в рабочих сменах NA61.
4. Разработка предложения и предварительная оценка возможности измерения плосости реакции для измерения потоков частиц в ядро - ядерных взаимодействиях с помощью переднего адронного калориметра в эксперимента на установке NA61.
5. Разработка модуля програмеого обеспечения для моделирования отклика калориметра PSD эксперимента NA61 и модуля для визуализации в реальном времени сигнала со всех модулей калориметра в общей пакете SHINE.
6. Участие в рабочих совещаниях NA61(SHINE) - доклады и обсуждение полученных результатов, координация работ.

Основные результаты, полученные в 2014 г.

1. Успешно завершена модернизация электроники контроля параметров модулей адронного калориметра. Эта электроника включает в себя систему мониторинга коэффициентов усиления лавинных фотодиодов, систему контроля питания фотодиодов и систему стабилизации и контроля температуры фотодиодов.

2. Проведена калибровка переднего адронного калориметра на пучках мюонов и адронов. Проведен предварительный анализ полученных данных.

3. Передний адронный калориметр был полностью подготовлен к сеансу по измерению выхода частиц в реакции p + Pb при энергии налетающего пучка протонов 158 ГэВ, который состоялся в октябре-декабре 2014г. Группа ИЯИ РАН обеспечивала работоспособность калориметра и контроль качества данных во время сеанса, участвовала в рабочих сменах NA61.

4. Разработано предложение (было доложено на совещаниях коллаборации NA61) и сделана предварительная оценка возможности измерения плоскости реакции для измерения потоков частиц в ядро - ядерных взаимодействиях с помощью переднего адронного калориметра в эксперименте на установке NA61.

5. Разработаны модули програмеого обеспечения для моделирования отклика калориметра PSD эксперимента NA61 и визуализации в реальном времени сигнала со всех модулей калориметра в общей пакете SHINE эксперимента NA61.

6. Члены группы ИЯИ участвовали в рабочих совещаниях NA61 с докладами по полученным результатам.

4.3 Введение

Актуальность, цели и программа исследований рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте NA61(SHINE) на ускорителе SPS в ЦЕРН.

Одной из основных задач эксперимента NA61(SHINE) в ЦЕРНе является поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи и детальное исследование начала деконфаймента, т.е. поиск и исследование перехода между двумя фазами сильно взаимодействующей материи [1]. Ряд моделей сильных взаимодействий предсказывают резкую фазовую границу (фазовый переход 1-го порядка) между адронным газом и кварк-глюонной плазмой, заканчивающуюся в критической точке (рисунок 1). Поиск и исследование перехода между двумя фазами сильно взаимодействующей материи ведется также в настоящее время на ускорителе RHIC (США) и планируется на вновь создаваемых ускорительных комплексах NICA в Дубне и FAIR в Дармштадте, Германия. Области фазовой диаграммы, которые исследуются (или будут исследоваться) в этих экспериментах, также показаны на рисунке 1.

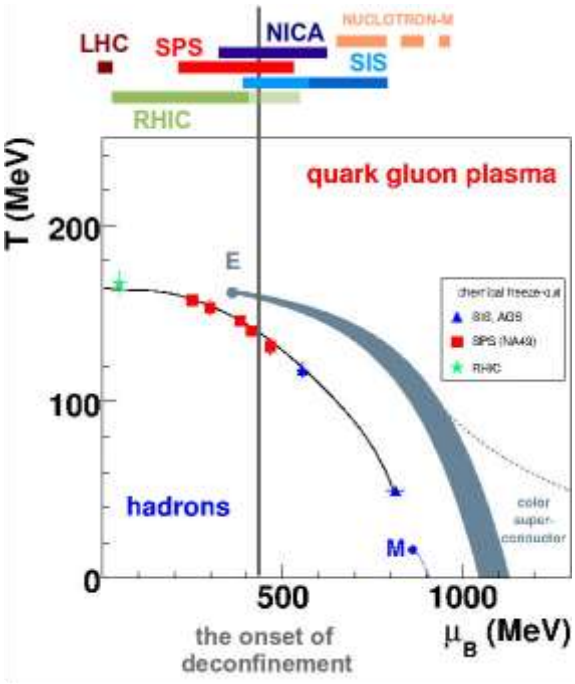


Рисунок 1 – Переход между двумя фазами сильно взаимодействующей материи: адронный газ и кварк-глюонная плазма

Точное положение критической точки на фазовой плоскости неизвестно. Поэтому в эксперименте NA61(SHINE) ее положение на фазовой плоскости предлагается искать,

сканируя эту плоскость посредством реакций с различными ядрами при энергиях налетающих ядер в диапазоне от 13 до 158 ГэВ на нуклон (рисунок 2, слева).

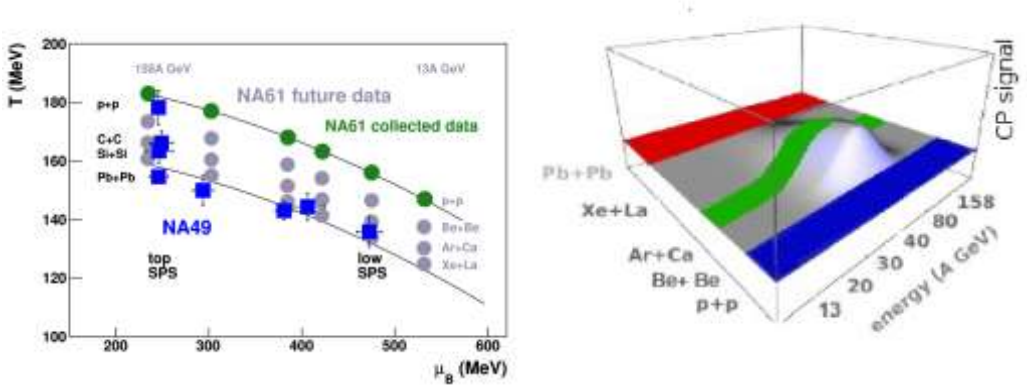


Рисунок 2 – Слева - область сканирования на фазовой плоскости в программе исследований эксперимента NA61(SHINE). Справа - ожидаемое увеличение флуктуаций множественности, среднего поперечного импульса и т.д. для системы с вымораживанием вблизи критической точки

Первые экспериментальные свидетельства наступления начала деконфайнмента были получены в эксперименте NA49 на ускорителе SPS в ЦЕРНе [2, 3]. Они основаны на наблюдаемых свойствах адронов, измеренных в центральных Pb + Pb столкновениях. Было показано, что наблюдается сильная энергетическая зависимость для измеренных выходов и отношений выходов заряженных частиц при импульсе налетающего пучка 30А ГэВ / с (или области энергии $\sqrt{E_{NN}} \approx 7{,}6$ ГэВ), которые авторы называют как рог, излом и Дэйл [3], и что эти зависимости согласуются с предсказаниями для начала деконфайнмента.

Новые результаты, полученные на RHIC для центральных Au + Au столкновений в эксперименте при сканировании энергии пучка [4] показывают хорошее согласие с NA49 измерениями при энергиях начала деконфаймента. Однако, получить экспериментальные данные с хорошей статистикой на RHIC BES ниже 30 ГэВ/с на нуклон достаточно трудно из-за низкой светимости встречных пучков ядер золота, также в этом эксперименте невозможно объективно выделить центральные столкновения. Поэтому сейчас стало очевидно, что программу NA61/SHINE необходимо расширить с включением исследования столкновения ядер свинца Pb + Pb.

Результаты, полученные на LHC при энергии 2,76 ТэВ для центральных Pb + Pb столкновений [5] показывают, что быстрое изменение энергетической зависимости свойств адронов наблюдается только при низких энергиях SPS. Это согласуется с интерпретацией наблюдаемых в NA49 структур как наступление начала деконфайнмента. Выше этой

энергии начала деконфаймента наблюдается только плавное изменение свойств кварк-глюонной плазмы.

Эксперимент NA61(SHINE) является преемником NA49 и дальнейшим его развитием. Как уже отмечалось, главной экспериментальной задачей этого эксперимента является изучение фазовых переходов и поиск критической точки посредством измерения наблюдаемых, чувствительных к исследуемым эффектам. Такими наблюдаемыми являются множественность рождения и спектральные характеристики вторичных адронов, включая странные барионы/антибарионы, и, в особенности, пособытийные флуктуации некоторых физических величин, таких как множественность, заряды, поперечные импульсы, отношения выходов странных и нестранных мезонов.

Полученные ранее данные при максимальных энергиях AGS и SPS показывают, что отношение выходов пионов и странных адронов практически не зависит от размера сталкивающихся ядер для центральных столкновений ядер с $A \geq 30$ - 40. Это означает, что для средних величин простые термодинамические модели могут быть использованы уже для центральных Ar + Ca столкновений в области энергией SPS. С другой стороны, длительность стадии расширения с чисто адронными степенями свободы возрастает с увеличением массы сталкивающихся ядер. Следовательно, температуры теплового и химического вымораживания уменьшаются с увеличением размера сталкивающихся ядер (рисунок 18 в [1]). Материя вымерзает достаточно далеко от границы фазового перехода. Чтобы свести к минимуму роль адронного перерассеяния столкновения малых ядер с размером порядка ядра аргона кажутся оптимальными для исследования свойств перехода между кварк-глюонной плазмой и адронным газом. Поэтому особое значение в этой программе имеют измерения для центральных Ar + Ca столкновений при значениях импульса пучка 13, 20, 30, 40, 80 и 158 ГэВ/с на нуклон, которые должны быть реализованы уже в 2015 г.

Исследования реакций Xe + La и Pb + Pb запланированы на 2015 - 2016 г.г. и 2017 – 2018 г.г. соответственно, как показано на диаграмме (рисунок 3.)

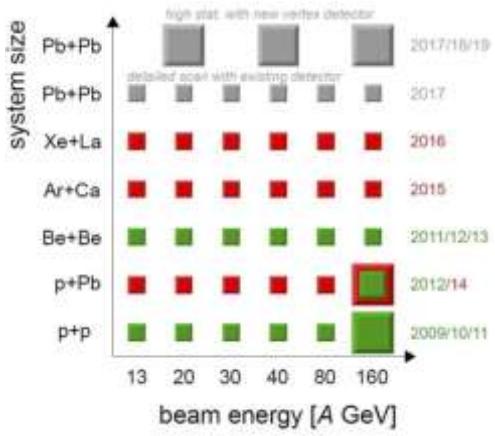


Рисунок 3 – Диаграмма сбора данных для ионной программы эксперимента NA61/SHINE. Зелеными квадратами показаны уже законченные измерения, красными - программа измерений на период 2015-2016 г.г. Серыми квадратами показаны планируемые измерения Pb + Pb, но которые еще не утверждены программным комитетом ЦЕРНа. [6]

Как уже отмечалось, резкое увеличение величины флуктуаций является отличительной чертой физических явлений вблизи критических областей (рисунок 2, справа). Поэтому основное внимание к физической программе исследований эксперимента NA61 уделяется именно измерению величины флуктуаций данной наблюдаемой от события к событию.

В связи с этим, необходимо более детально остановиться на источниках экспериментально наблюдаемых флуктуаций в столкновениях тяжелых ионов. В самом общем описании существуют два источника флуктуаций. Первый – это интересующее нас физическое явление, а именно, критическая область фазовой диаграммы, вызывающая усиление флуктуаций. Второй источник – это варьируемая геометрия столкновения тяжелых ионов, иначе говоря, переменное количество взаимодействующих нуклонов. Понятно, что второй источник флуктуаций, определяющий геометрию столкновений, никак не связан с существованием критических флуктуаций. Поэтому эти два источника флуктуаций должны быть учтены надлежащим образом. Как правило, в экспериментах с фиксированной мишенью геометрия столкновения тяжелых ионов измеряется передним адронным калориметром, детектирующим энергию непровзаимодействовавших нуклонов налетающего ядра, из которой определяется число непровзаимодействовавших нуклонов налетающего ядра. Разница между атомным числом налетающего ядра и измеренным количеством непровзаимодействовавших нуклонов и дает искомое число взаимодействующих нуклонов. Таким образом, использование переднего адронного калориметра с энергетическим разрешением, необходимым для определения числа нуклонов с точностью до одного нуклона, является необходимым условием изучения

критических флуктуаций. Для эксперимента NA61 такой калориметр разработан и изготовлен в Институте ядерных исследований РАН. Основная активность группы ИЯИ РАН в данном проекте связана с созданием адронного калориметра высокого разрешения, его использованием в физических экспериментах NA61 и участием в анализе экспериментальных данных с получением конечных физических результатов.

Другие важные направления экспериментальных работ, которые коллаборации NA61 ведет на пучках SPS, перечислены ниже:

Исследование распределений заряженных частиц с большим поперечным импульсом в протон-протонных и протон-ядерных взаимодействиях

Наблюдение подавления выхода адронов с большим поперечным импульсом в Au+Au столкновениях (гашение струй в ядерной материи с высокой плотностью) - одно из самых важных открытий на RHIC. Исследования энергетической зависимости этого эффекта при энергиях SPS необходимы для его окончательного толкования. ЦЕРН имеет уникальные возможности для внесения ключевого вклада с помощью измерений на SPS и LHC.

Измерения сечений выхода заряженных адронов для нейтринной физики

Для определения потоков нейтрино в эксперименте T2K и минимизации систематических ошибок в определение параметров смешивания, в эксперименте NA61 измерены с высокой точностью выходы заряженных пионов и каонов в реакции p + C при энергии налетающих протонов 31 ГэВ. Результаты, полученные для выходов пионов в пилотном эксперименте 2007 года, опубликованы в 2011 г. В настоящее время подготовлена статья с результатами анализа по выходам заряженных каонов.

Измерения сечений в адрон-ядерных реакциях для физики космических лучей

Обсерватория Пьера Оже и эксперимент KASKADE анализируют широкие атмосферные ливни с целью получения информации об источниках происхождения космического излучения. В эксперименте NA61 выполнены измерения сечений образования заряженных частиц при взаимодействии пионов с ядрами углерода при

энергии пионов 158 и 350 ГэВ. Эти сечения необходимы для реконструкции событий космического излучения. Результаты NA61 помогут улучшить разрешение экспериментов на космических лучах, необходимые для определения элементного состава космического излучения при высоких энергиях.

В заключение отметим, что NA61/SHINE начал детальное сканирование в двумерном пространстве параметров: размер сталкивающихся ядер (p + p, p + Pb, Be + Be, Ar + Ca, Xe + La) и энергия столкновений (13A, 20A, 30A, 40A, 80A, 158A ГэВ/c) в 2009 г. До настоящего времени использовались вторичные пучки протонов и ядер Be, полученные фрагментацией ядер свинца на бериллиевой мишени и сформированные каналом транспортировки установки NA61. Полностью выполнено сканирование для реакции Be + Be. В дальнейшем планируется использовать первичные пучки ядер Ar, Xe и свинца, что обеспечивает совместимость с программой LHC.

4.3 Участие ИЯИ РАН в 2014 г. в работах по анализу данных, полученных в эксперименте NA61(SHINE) на SPS, в модернизации экспериментальной установки и ее подготовке к предстоящим физическим сеансам

Первые измерения ядро-ядерных взаимодействий проведены в 2011 г. для реакции ^{7}Be + ^{9}Be при энергиях 40, 80, 158 ГэВ на нуклон с использованием фрагментированного пучка ядер ^{7}Be. В конце 2012 г. – начале 2013 г. проведен сеанс измерений выходов заряженных частиц в реакции ^{7}Be + ^{9}Be на фрагментированном пучке ядер ^{7}Be при энергиях налетающих ядер бериллия 13, 20 и 30 АГэВ. Таким образом, в течение 2011-2013 г.г. была полностью завершена программа измерений на ядрах бериллия при энергиях 13, 20, 30, 40, 75 и 150 АГэВ. Для измерения центральности взаимодействий в этих экспериментах впервые использовался передний адронный калориметр, разработанный и изготовленный в ИЯИ РАН. В 2014 г. проведен предварительный анализ по выходом отрицательных пионов в реакции ^{7}Be + ^{9}Be на фрагментированном пучке ядер ^{7}Be при энергиях налетающих ядер бериллия 40 - 158 АГэВ и по выходам положительно заряженнных пионов в реации p+p при тех же энергиях 40 - 158 АГэВ. Завершен анализ и опубоикованы результаты по выходам отрицательно заряженных пионов в реации p+p при энергиях 20 - 158 АГэВ. Для измерения центральности в реакции^{7}Be + ^{9}Be в использовался передний адронный калориметр, разработанный и изготовленный в ИЯИ РАН.

4.3 Краткое описание экспериментальной установки NA61/SHINE

Эксперимент NA61(SHINE) является единственным оставшимся экспериментом на SPS в ЦЕРНе, который имеет утвержденную в ЦЕРНе программу по исследованиям ядро-ядерных взаимодействий при энергиях 10-158 ГэВ на нуклон. Экспериментальная установка NA61 - это существенно модернизированная установка предыдущего эксперимента NA49 [3]. Схема установки показана на рисунке 4. На вставке показано расположение пучковых счетчиков.

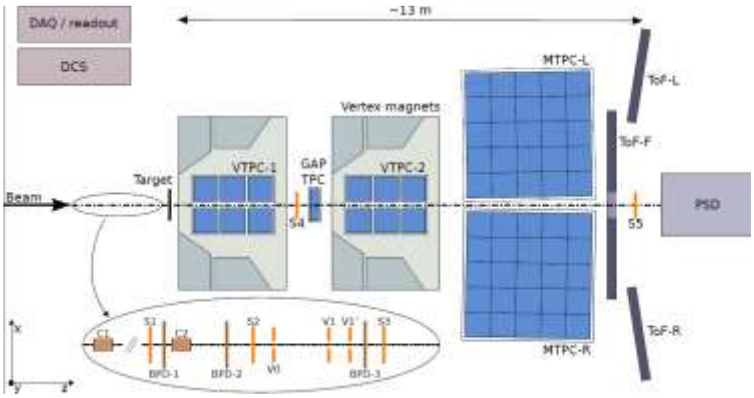


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки NA61 (вид сверху)

Установка состоит из ряда пучковых сцинтилляционных детекторов (S1 – S5, V0, V1, V1'), черенковских (C1, C2) детекторов и пропорциональных камер (BPD -1, 2 и 3), расположенных в области мишени. Эти детекторы используются для формирования триггера, стартового сигнала для время-пролетной системы и контроля положения пучка на мишени.

Для идентификации и измерения импульсов вторичных заряженных частиц, образовавшихся в ядро-ядерных взаимодействиях, используется магнитный спектрометр, основными компонентами которого являются:

- два сверхпроводящих дипольных магнита с вертикальным зазором 1 метр, обеспечивающие максимальную жесткость пучка 9 Тм;

- две время-проекционные камеры (VTPC-1 и VTPC-2), размещенные в зазорах дипольных магнитов. Каждая из этих камер имеет длину 250 см, ширину 280 см и высоту 98 см. Эти камеры используются для реконструкции вершины взаимодействия, определения импульса частиц и идентификации типа частиц путем измерения ионизационных потерь в газе детекторов;

- две большие время-проекционные камеры (MTPC) с размерами 390 см x 390 см x 110 см, которые располагаются за дипольными магнитами вне области магнитного поля

симметрично относительно оси пучка. Они используются дополнительно для измерения импульсов частиц высоких энергий и идентификации типа частиц по их ионизационным потерям;

- еще одна небольшая время-проекционная камера (GAP TPC) с размерами 30 см x 81.5 см x 70 см располагается в области оси пучка, перекрывая область, в которой время-проекционные камеры VTPC-1 и VTPC-2 нечувствительны к заряженным частицам из-за высокой плотности траекторий частиц. Эта камера обеспечивает дополнительные координаты для высокоэнергетичных треков заряженных частиц при экстраполяции их на вершину взаимодействия;

- два время-пролётных сцинтилляционных годоскопа (TOF-L и TOF-R), по 891 сцинтилляционному детектору в каждом годоскопе. Они располагаются сразу за MTPC, симметрично по обе стороны от оси пучка. Эти годоскопы используются для идентификации заряженных частиц по времени пролета и обеспечивают временное разрешение порядка 60 пикосекунд при исследованиях ядро-ядерных взаимодействий и порядка 120 пикосекунд – в протон - протонных взаимодействиях;

Перечисленные выше элементы установки NA61 – время-проекционные камеры, магниты и времяпролетные годоскопы TOF-L и TOF-R ранее использовались в NA49 и подробно описаны в работе [3].

В процессе модернизации экспериментальной установки были добавлены несколько детекторных систем, в частности:

- создан новый передний сцинтилляционный времяпролетный годоскоп –TOF-F. Этот годоскоп состоит из 80 вертикальных сцинтилляционных пластин, свет с которых считывается с торцов двумя фотоумножителями. Он перекрывает область между годоскопами TOF-L и TOF-R для увеличения аксептанса установки NA61. Этот годоскоп использовался в экспериментах по исследованию выходов пионов и каонов в реакции p+C при энергии налетающих протонов 30 ГэВ для эксперимента T2K [7,8]. TOF-F обеспечивал временное разрешение порядка 110 пикосекунд в этом эксперименте;

- группой ИЯИ РАН ИЯИ РАН разработан и изготовлен новый передний адронный калориметр фрагментов (PSD – Projectile Spectator Detector), который используется для измерения энергии спектаторов, имеет высокое энергитеческое разрешение и способен пособытийно определять с точностью до одного нуклона число непровзаимодействовавших нуклонов в центральном ядро-ядерном взаимодействии. Это является очень важным фактором в исследовании флуктуаций различных наблюдаемых. Концепция калориметра, электроники и система анализа данных полностью является разработкой ИЯИ РАН [9, 10].

Калориметр состоит из 44 модулей (рис 5, слева), которые перекрывают поперечную область 120 x 120 см^2, необходимую при регистрации спектаторов налетающих ядер в эксперименте NA61. Центральная часть калориметра состоит из 16 маленьких модулей с поперечным размером 10 x 10 см^2. Внешняя часть калориметра состоит из 28 больших модулей с поперечными размерами 20 x 20 см^2. Такая поперечная сегментация калориметра уменьшает также загрузку отдельных центральных модулей (так как в данном калориметре отсутствует отверстие для пропускания налетающего пучка). Каждый модуль собран из 60 слоев свинца с расположенными между ними сцинтилляционными пластинами.. Толщина каждой свинцовой пластины составляет 16 мм, а толщина сцинтиллятора 4 мм. При таком соотношении толщин свинца и сцинтиллятора (4:1) выполняется условие так называемой компенсации. При этом, как известно [6,7], константный член (b) в выражении для энергетического разрешения $a/\sqrt{E}$(ГэВ) + b должен быть равен нулю, а величина стохастического члена (a) должна составлять порядка 55%.

В качестве фотодетекторов в этом калориметре впервые были использованы кремниевые полупроводниковые микропиксельные лавинные фотодиоды, MAPD-3N. Выбор этих фотодиодов для данного калориметра обусловлен, в первую очередь, большим динамическим диапазоном, необходимым для калориметрии, а также такими их свойствами, как высокое внутреннее усиление, высокая квантовая эффективность

детектирования фотонов, компактность и нечувствительность к прохождению через них заряженных частиц.

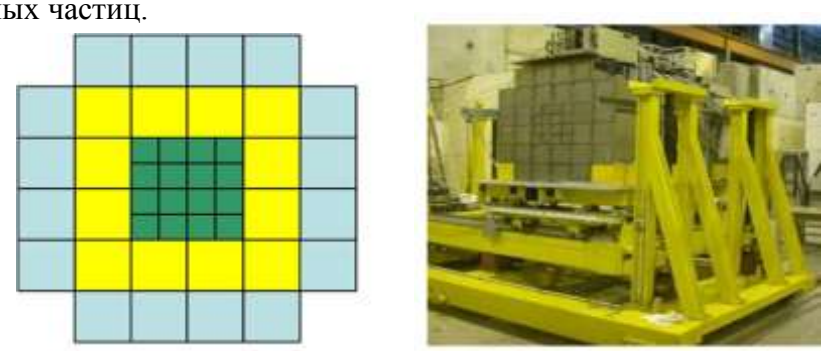


Рисунок 5 – Схема переднего вида (слева) и фотография полностью собранного и установленного на пучке переднего адронного калориметра эксперимента NA61 (справа)

Передний адронный калориметр (PSD) (рис 5, справа) располагается на расстоянии от 17 до 23 метров от мишени, в зависимости от энергии налетающих ядер. Калориметр и электроника полностью изготовлены в ИЯИ РАН. Эта работа велась в течение последних 6 лет и в уже в конце 2011 г. впервые часть калориметра использовалась в физическом сеансе на фрагментированном пучке легких ядер в эксперименте NA61. В 2012 г. калориметр был

полностью собран и использован в декабрьском (2012 г.) и январьском (2013 г.) сеансах измерений.

- были разработаны и изготовлены два специальных радиационно-прозрачных двухконтурных гелиевых ионопровода, которые были установлены по оси пучка внутри VTPC-1 и VTPC-2 установки NA61 в 2011 г. (рисунок 6).

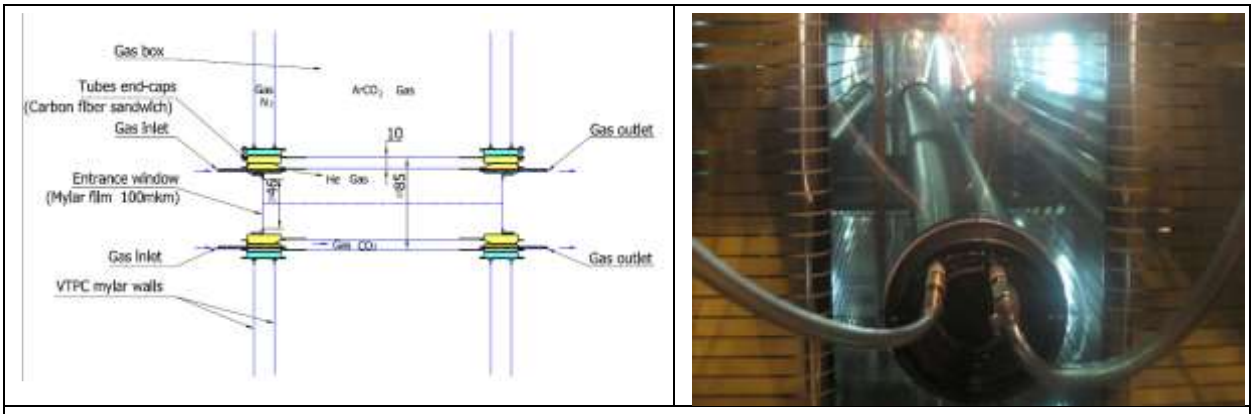


Рисунок 6 – Слева - схема двухконтурного гелиевого ионопровода (He - beam pipe). Справа – радиационно прозрачный сверхлегкий двухконтурный гелиевый ионопровод, установленный в первой вершинной время-проекционной камере (VTPC)

Это позволяет существенно (примерно в 10 раз) уменьшить загрузку трековых детекторов экспериментальной установки от дельта электронов, воникающих при взаимодействии ядер с газом в ионопроводе. В установке NA49 такого ионопровода не было и дельта-электроны от взаимодействия ядер пучка с воздухом попадали в чувствительный объем камер, увеличивая тем самым их фоновую загрузку.

Кроме того, в NA61 была модернизирована электроника считывания с время-проекционных камер, что позволило увеличить скорость считывания до 70 - 80 событий в секунду, что почти на порядок превышает скорость считывания в эксперименте NA49.

Модернизированная экспериментальная установка NA61 имеет следующие основные характеристики:

- достаточно большой аксептанс ~50%;
- высокое разрешение по импульсу $\sigma(p)/p^2 \approx 10^{-4} (GeV/c)^{-1}$ (при B=9 T·m);
- разрешение по времени пролета для ToF-L/R: $\sigma(t) \approx 60$ ps; для ToF-F: $\sigma(t) \approx 110$ ps;
- хорошую идентификацию по ионизационным потерям:

$\sigma(dE/dx)/\langle dE/dx \rangle \approx 0.04$; $\sigma(m_{inv}) \approx 5$ MeV;

- высокую эффективность детектирования заряженных частиц: > 95%;

- скорость считывания событий ~80 событий/sec.

Проведенная модернизация установки NA61 позволяет всего за один период сбора данных (~40 дней) записать данные при различных значениях энергии со средней статистикой событий, превышающей в десять раз данные, собранные ранее во время эксперимента NA49. Это является важным итогом модернизации установки NA61/SHINE и должно позволить заметно уменьшить статистические и систематические ошибки результатов измерений по сравнению с измерениями на NA49. Изучение флуктуаций частиц, а также дальних корреляций, станет возможным благодаря высокому разрешению в определении центральности (с помощью детектора PSD, созданного в ИЯИ РАН). Более того, в эксперименте NA61/SHINE будут реализованы измерения при энергии пучков 13А ГэВ/с, а также ядро-ядерные столкновения без отбора по центральности (minimum bias) (исключая 40А и 158А ГэВ/с), которые не были проведены ранее в эксперименте NA49. Возможность увеличения интенсивности пучков (и соответсвующего увеличения набора статистики) связана также с 10-кратным сниженим фона в зоне двух первых вершинных время-проекционных камер (VTPC-1 и VTPC-2).

4.3 Результаты предварительного анализа экспериментальных данных полученных в p+p и Be^7+Be^9 столкновениях в эксперименте NA61(SHINE)

Коллаборацией NA61 в 2014г. опубликованы результаты анализа данных по выходам отрицательно заряженных пионов в реакции p+p при энергиях 20 - 158 АГэВ. Получены предварительные результаты по выходам отрицательных пионов в реакции ^{7}Be + ^{9}Be на фрагментированном пучке ядер ^{7}Be при энергиях налетающих ядер бериллия 40, 75 и 150 АГэВ и по выходам положительно заряженных пионов в реакции p+p при тех же энергиях. Для измерения центральности в реакции^{7}Be + ^{9}Be использовался передний адронный калориметр, разработанный и изготовленный в ИЯИ РАН.

На рисунке 7 показаны полученные спектры поперечных масс для реакций p+p и Be+Be (для различных интервалов по центральности), полученных в NA61, а также спектры для реакции Pb+Pb, полученные ранее в эксперименте NA49 (PR**C66**:054902) для центральных взаимодействий при тех же энергиях. Спектры поперечных масс $m_T = \sqrt{p_T^2 + m^2}$ в области быстрот ($0 < y < 0.2$) аппроксимировались экспоненциальной

функцией в диапазоне масс

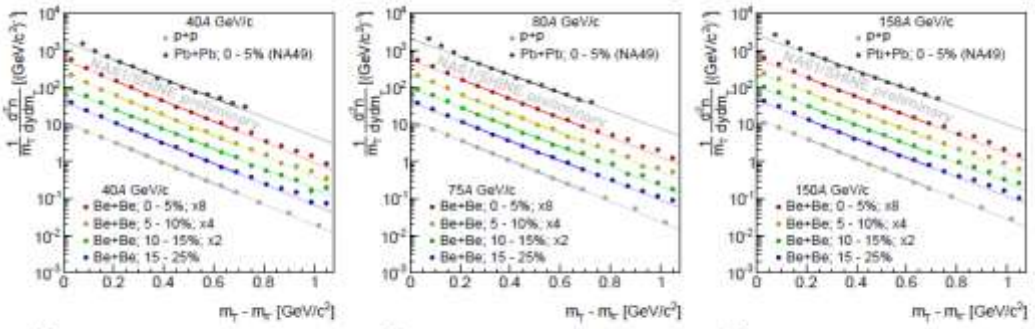


Рисунок 7 – Спектры поперечных масс для реакций p+p и Be+Be (для различных интервалов по центральности), а также спектры для реакции Pb+Pb для центральных взаимодействий при тех же энергиях

Полученные из этих спектров распределения температуры T для этих реакций в зависимости от энергии и типа налетающих частиц показаны на рисунке 8.

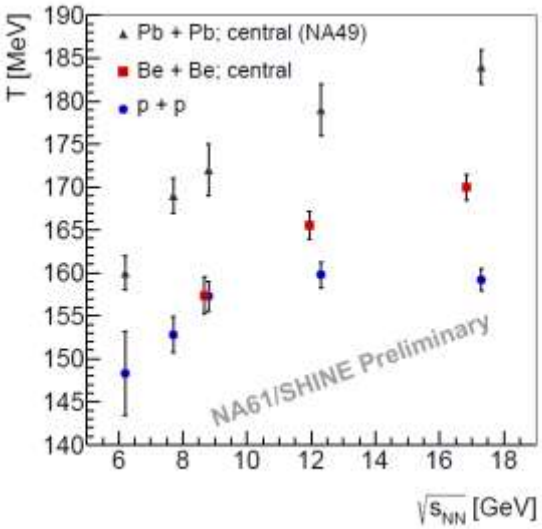


Рисунок 8 – Распределения температуры T для этих реакций p+p и Be+Be и Pb+Pb в зависимости от энергии и типа налетающих частиц

Видно, что температура растет как с энергией налетающих частиц, так и с увеличением размера сталкивающихся ядер. На рисунке 9 слева показаны распределения по быстроте отрицательных пионов, образовавшихся в реакции p+p при разных импульсах налетающих протонов. На рисунке 9, справа, показана зависимость ширины распределения пионов по быстроте для этой реакции в зависимости от импульса налетающих протонов. На этом же рисунке показаны аналогичные данные для реакции Pb+Pb, полученные ранее в эксперименте NA49.

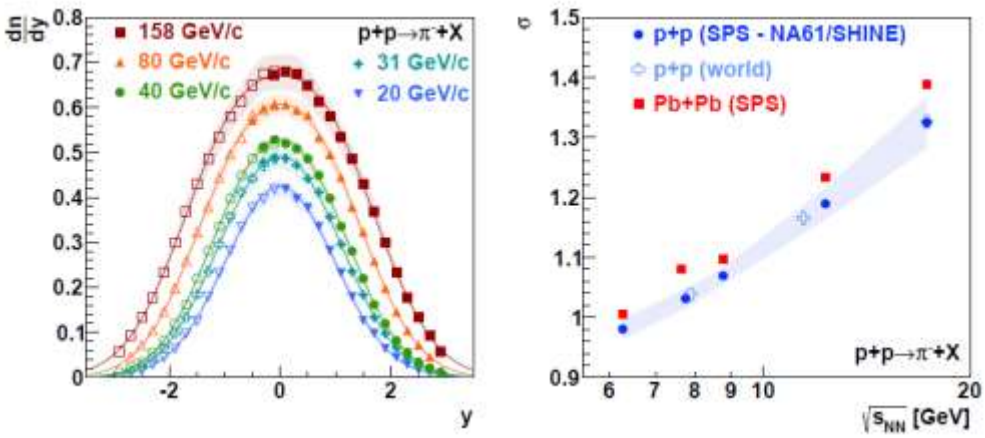


Рисунок 9 – Слева - распределения по быстроте отрицатедьных пионов, образовавшихся в реакции p+p при импульсах налетающих протонов 40, 80 и 158 ГэВ/с. Справа - зависимость ширины распределения пионов по быстроте для этой реакции в зависимости от импульса налетающих протонов. На этом же рисунке показаны аналогичные данные для реакции Pb+Pb, полученные ранее в эксперименте NA49 для этих же энергий

Полученные ширины распределений по быстроте для отрицательных пионов в p+p реакции на 2.5–4.5% меньше чем в Pb+Pb столкновениях (PR**C77**:024903, PR**C66**:054902).

Наблюдаемые отличия могут быть обусловлены поперечными и продольными потоками пионов в реакции Pb+Pb. Для уточнения наблюдаемых отличий и роли изоспиновых эффектов, необходимы данные по выходам π^+ мезонов.

Очень интересный эффект обнаружен коллаборацией NA61 при анализе множественности образования частиц в реакции p+p. Как известно, в эксперименте NA49 обнаружено резкое увеличение в отношении множественности выходов положительно заряженных каонов к положительно заряженным пионам в реакции Pb+Pb в зависимости от энергии налетающих ядер свинца с максимумом этого отношения при энергии ядер свинца около 40 АГэВ (которое получило название «horn»). В соответствующих имеющихся мировых данных по реакции p+p наблюдается плавный рост этого отношения в зависимости от энергии налетающих протонов (Рисунок 10, слева). Результаты анализа новых данных по p+p реакции, с высокой статистической точностью полученные в 2014г. в эксперименте NA61 показали, что и для p+p реакции наблюдается насыщение отношения множественности каонов и пионов (Рисунок 10, справа) с ростом энергии налетающих протонов.

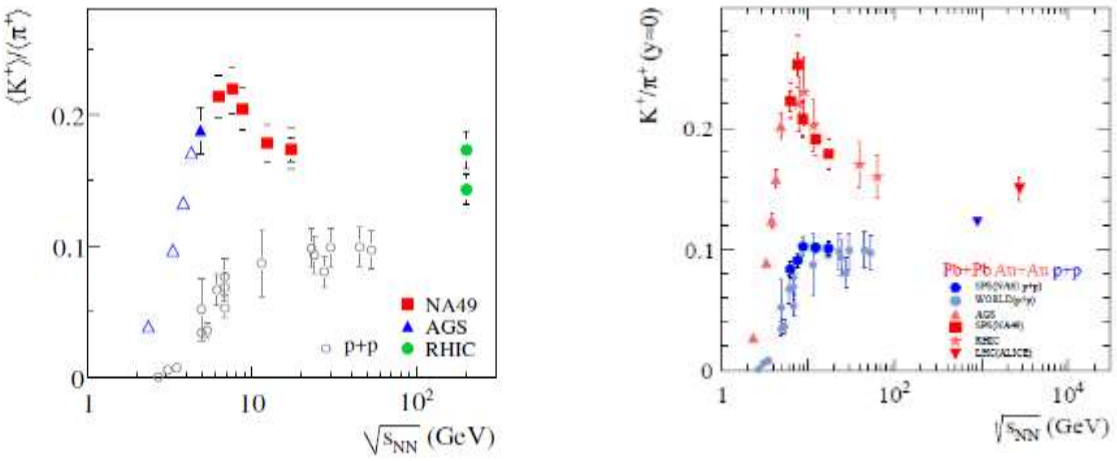


Рисунок 10 – Слева - отношение множественности выходов положительно заряженных каонов к положительно заряженным пионам в реакциях p+p и Pb+Pb в зависимости от энергии налетающих ядер свинца. Справа – дополнительно показаны новые данные по p+p реакции, полученные в эксперименте NA61 в 2014 г.

Зависимость параметра T, полученного из анализа распределений каонов в реакции p+p по поперечному импульсу, также указывает на эффект насыщения в области 40 ГэВ/с (рис 11).

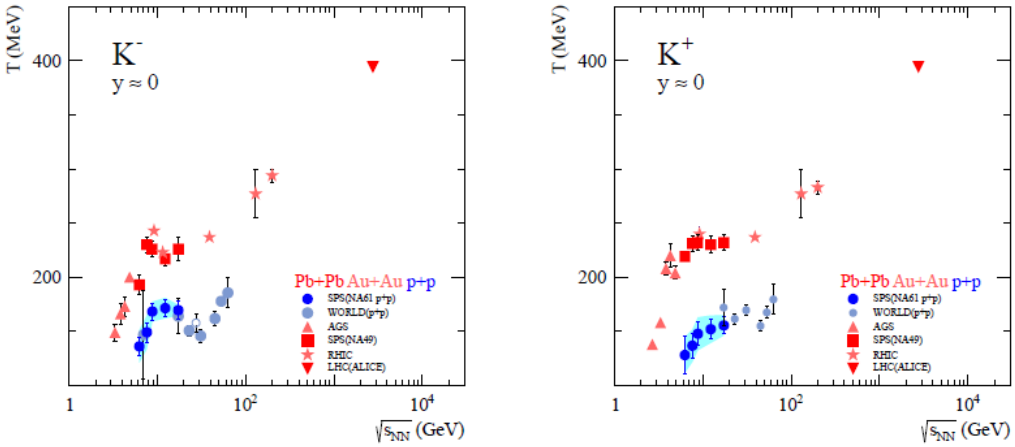


Рисунок 11 – Зависимость параметра T для K+ (слева) и K- (справа) мезонов от энергии налетающих частиц в системе центра масс

Таким, образом, предварительный анализ по выходам пионов и каонов в реакции p+p в зависимости от энергии налетающих протонов указывает на наличие структуры в области 40 ГэВ/с. Такая же структура наблюдается при этой же энергии и в реакции Pb+Pb. Возможно, что появившиеся новые данные потребуют пересмотра интерпретации аналогичного эффекта, наблюдаемого в в реакции Pb+Pb, как начала деконфаймента.

4.3 Исследование группой ИЯИ РАН возможности измерения азимутальных распределений потоков частиц в NA61

Группа ИЯИ РАН начала в 2014г. работу по исследованию возможности изучения потоков частиц в ядро-ядерных столкновениях на установке NA61. Исследование коллективных потоков частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ионов, остается одним из современных направлений современной релятивистской ядерной физики, изучающей свойства сильно взаимодействующей материи, в частности, уравнение состояния ядерной (адронной) материи. Исследование коллективных потоков в реакциях столкновений тяжелых ионов начато в 1980-х на BEVALAC и в 1990-х продолжено такими экспериментами как KaoS, FOPI в GSI в области кинетических энергий налетающего пучка порядка 1 ГэВ на нуклон, а также в эксперименте E877, BNL в области энергий около 10 ГэВ на нуклон. Исследования были продолжены в ЦЕРНе на SPS (эксперимент NA49 и др.) в области энергий пучка 20 – 180 ГэВ на нуклон, а в последние годы на коллайдерах RHIC и LHC. Первые эксперименты по изучению коллективных потоков фокусировались в основном на изучении первых двух гармоник – т.н. направленного и эллиптического потоков, характеризующих процессы на начальном этапе столкновений. В то же время, эксперименты на RHIC и LHC, благодаря многократно возросшим статистическим данным, провели измерения вплоть до 3-ей и 4-й гармоник, характеризующих, вязкость адронной материи. Таким образом, акцент в изучении уравнения состояния адронной материи постепенно сдвигается в сторону исследований динамики столкновения и уточнений её гидродинамических параметров на разных этапах.

Для изучения потоков заряженных частиц требуется определение в каждом событии некоторого выделенного направления – плоскости реакции, по отношению к которому исследуется предпочтительное движение некоторой выборки испущенных частиц (поток). В данном проекте предполагается разработать методику определения плоскости реакции посредством измерения как координат, так и энергии спектаторов с помощью переднего сегментированного адронного калориметра эксперимента NA61. Однако, наличие магнитного поля перед адронным калориметром в установках NA61 требует разработки методики компенсации влияния магнитного поля на точность определения плоскости реакции.

В 2014 г. группой ИЯИ РАН было проведено моделирование точности определения угла плоскости реакции с помощью переднего адронного калориметра установки NA61. Исследования были выполнены для реакций, которые предстоит в ближайшее время

исследовать на установке NA61 - Ar+Sc при энергиях 12, 18, 29, 39, 75 и 149 АГэВ и Xe+La при энергии 39AGeV. Для сравнения были выполнены расчеты и для реакции Au+Au, при энергии 35АГэВ. События для этой реакции были сгенерированы ранее для эксперимента CBM, и были использованы нами для расчета точности определения угла плоскости реакции в установке NA61c помощью переднего адронного калориметра.

На рисунке 12 показаны результаты моделирования для реакции Au+Au, при энергии 35АГэВ,выполненные для NA61,и для сравнения, показаны результаты моделирования для установки CBM, ФАИР, Дармштадт, Германия, в которой планируется использовать аналогичный передний адронный калориметр, только с отверстием диаметром 60мм в центре калориметра для прохождения интенсивного налетающего пучка ядер. Видно, что разрешение по углу плоскости реакции достаточно хорошее ~ 30-40 градусов для полуцентральных взаимодействий. Для более легкой системы - Ar+Sc, разрешение хотя и несколько хуже, однако остается на приемлемом уровне ~40 градусов.

В 2015 г. планируется продолжение моделирования определения точности определения угла плоскости реакции для столкновений Pb +Pb при энергиях 20 -150 АГэВ. Первые экспериментальные результаты по этой реакции планируется получить уже в конце следующего года.

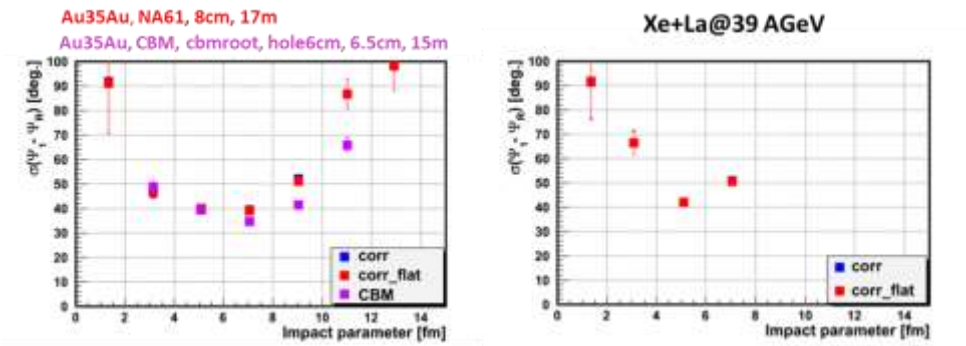


Рисунок 12 – Слева показаны результаты моделирования разрешения угла плоскости реакции для Au+Au, при энергии 35АГэВ, выполненные для NA61, а также результаты моделирования для установки CBM. Справа показаны результаты для более легкой системы - Ar+Sc

4.3 Модернизация электроники контроля параметров модулей адронного калориметра и системы термостабилизации и контроля температуры лавинных фотодиодов группой ИЯИ РАН

В 2014г. группа ИЯИ завершила модернизацию электроники контроля параметров модулей адронного калориметра. Эта электроника включает в себя систему мониторинга коэффициентов усиления лавинных фотодиодов, систему контроля питания фотодиодов и систему термостабилизации и контроля температуры фотодиодов.

Эксклюзивной задачей группы ИЯИ РАН в эксперименте NA61 является обеспечение надежной работы и получение экспериментальных данных с переднего адронного калориметра, предназначенного для контроля и отбора событий с требуемым прицельным параметром. Отметим, что сам калориметр, его электронная часть и система передачи данных были разработаны и изготовлены в ИЯИ РАН в предыдущие 2006-2012 годы. Проверка детектора на протонных пучках и первые физические сеансы на ионном пучке ^{7}Be подтвердили требуемые параметры калориметра и качество экспериментальных данных. Тем не менее, в процессе длительной работы детектора были выявлены некоторые недостатки в схеме съема сигнала с калориметра, требующие ее определенной модернизации. Поскольку калориметр включен в общий триггер эксперимента, одним из главных требований является обеспечение быстрого сигнала с калориметра для триггерной системы. Данное требование было вызвано необходимостью временного согласования триггерного сигнала калориметра с сигналами от быстрых пучковых детекторов. Кроме того, планируемое изменение общей схемы передачи данных в эксперименте NA61 от всех элементов установки налагает обязательства адаптировать электронную часть переднего калориметра, а именно, обеспечить быстрый усиленный сигнал со всех секций модулей калориметра.

Проведение сеансов по набору экспериментальных данных на пучках ионов выявило температурный дрейф коэффициентов усиления фотодетекторов, т.к. используемые микропиксельные фотодиоды имеют сильную температурную зависимость коэффициента усиления от температуры, порядка 4%/^{0}C. Данный эффект налагает особые требования на контроль температуры вблизи фотодетекторов, контроль напряжения питания фотодетекторов и постоянный мониторинг коэффициентов усиления фотодиодов. Таким образом, задачи модернизации электронной части адронного калориметра заключались в следующем:

1. Обеспечение быстрых усиленных сигналов с каждой секции детектора для согласования с новой системой сбора данных эксперимента NA61;

2. Обеспечение быстрого триггерного сигнала с калориметра для временного согласования с быстрыми пучковыми детекторами;

3. Контроль температуры фотодетекторов;

4. Контроль напряжений питания фотодиодов;

5. Постоянный мониторинг коэффициентов усиления фотодиодов.

Такая комплексная задача потребовала разработки дополнительных электронных схем и двух печатных плат с необходимой функциональностью. Новые электронные платы (рисунок 13) включают в себя стабилизированный источник световых импульсов на основе светодиода, быстрые усилители аналоговых сигналов, индивидуальные стабилизированные источники питания фотодиодов, температурные датчики, установленные на общей алюминиевой плате, обеспечивающей температурный контакт со всеми фотодиодами в модуле. Остановимся на кратком описании работы электронной схемы. Одним из основных элементов схемы является генератор стабилизированных световых импульсов, предназначенных для постоянного мониторинга коэффициентов усиления фотодиодов.

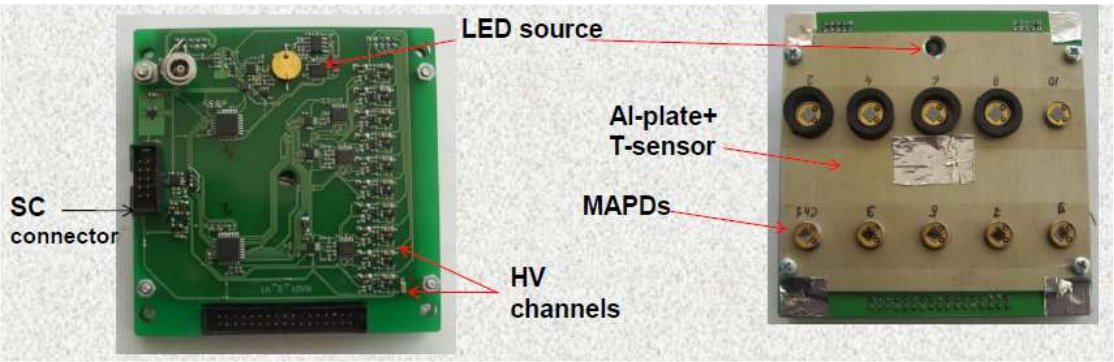


Рисунок 13 – Фото новых печатных плат с модернизированной электронной частью съема сигнала. Слева – фото задней части платы с разъемами для выходных аналоговых сигналов и системы управления. Справа – фото передней части платы с установленными на общей алюминиевой подложке фотодиодами

Блок схема устройства представлена на рисунке 14. Небольшая часть энергии световой вспышки, излучаемой светодиодом, контролируется встроенным фотодиодом. Энергия импульса выходного тока фотодиода преобразуется в цифровой код зарядо-чувствительным преобразователем QDC. Основная часть энергии световой вспышки через

оптический разъем и оптическое волокно выводится на контролируемый фотодетектор. Работой светодиода управляют генератор коротких импульсов (Pulse generator) и драйвер светодиода (LED driver). Устройство работает с фиксированной длительностью световой вспышки.

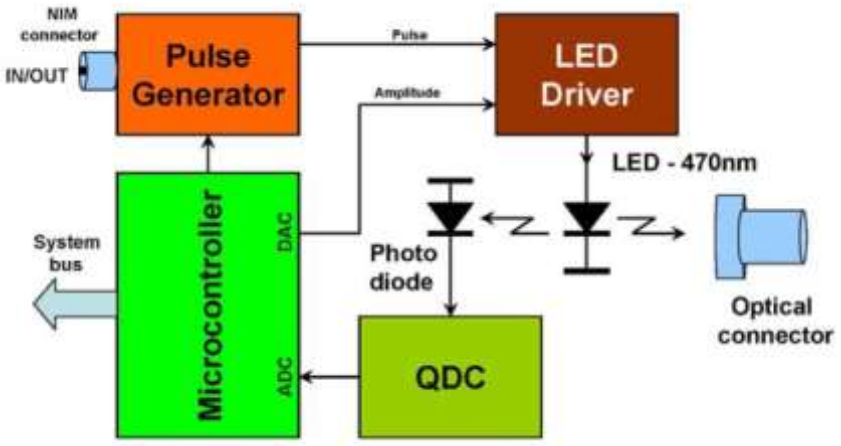


Рисунок 14 – Блок схема генератор стабилизированных световых импульсов

Генератор световых импульсов обеспечивает стабильность амплитуды световой вспышки на уровне 1%, как это видно из рисунок 15 при его долговременной работе и не зависит от температуры окружающей среды.

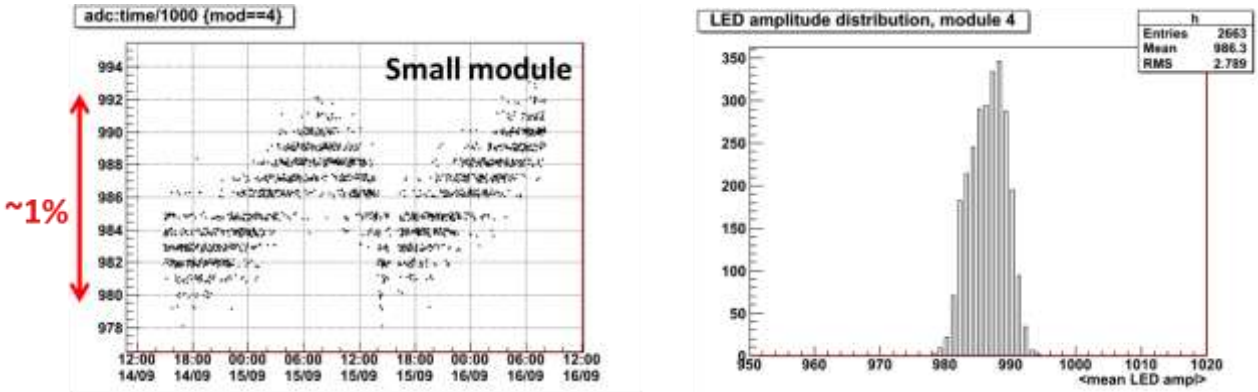


Рисунок 15 – Слева – зависимость амплитуды светодиода от времени (в течение примерно 30 часов). Справа – распределение по амплитуде световой вспышки в течение 30часов измерений

Напряжение питания фотодиодов обеспечивается индивидуальными блоками питания, установленными на печатной плате вблизи фотодетекторов и управляемыми отдельно стоящим контроллером. Напряжение питания находится в диапазоне 63-68 В.

Обеспечивается точность установки напряжения 10 мВ. Ток через диод составляет порядка 30 мкА.

Сигналы с фотодиодов усиливаются двумя быстрыми усилителями с коэффициентами усиления 20 и 120. Такая двухэтапная схема усиления обеспечивает необходимый динамический диапазон, требуемый для регистрации энергий как одиночных нуклонов, так и энергий ядер пучка в целом. Полоса пропускания усилителей равна 20 МГц. Сигнал после усилителей разветвляется на две части: 90% сигнала поступает в амплитудно-цифровой преобразователь, а 10% - в аналоговый сумматор, формирующий быстрый сигнал для триггера. На рисунке 16 показана форма импульса после сумматора. Время нарастания составляет теперь порядка 10 нсек. (Ранее для тринггре использовался сигнал с временем нарастания порядка 60 нсек).

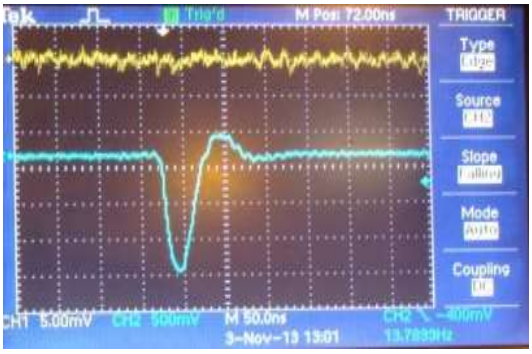


Рисунок 16 – Форма импульса после сумматора для формирования триггера калориметра

Управление элементами электронной схемы (напряжение питания фотодиодов, амплитуда световой вспышки, показания термодатчика) осуществляется общим системным модулем (контроллером) (рисунок 17). Системный модуль имеет максимальное количество обслуживаемых элементов, равное 127, встроенный источник питания ~220V(+15%/-20%), W 70, линии связи с компьютером USB-2.0; RS-232, Ethernet. Внутренняя последовательная линия связи осуществляется по протоколу RS485 (100 кбит/с).

Рисунок 17 – Фото системного модуля, управляющего элементами электронной схемы калориметра

В качестве фотодетекторов в модулях калориметра используются микропиксельные фотодиоды, которые имеют сильную температурную зависимость коэффициента усиления от температуры, который составляет порядка 4 %/^{0}C. Как уже отмечалось выше, для компенсации этого эффекта в калориметре использовалась система температурной стабилизации, разработанная совместно с инженерной службой ЦЕРН и использующая сжатый воздух. Обычно, калибровка калориметра проводилась в летний период во время тестов и подготовки к физическим сеансам. Физические же сеансы на фрагментированном пучке ядер бериллия проводились осенью, а последний сеанс в 2013 г. проходил в январе – феврале. К сожалению, сильные перепады температуры окружающей среды во время калибровки модулей калориметра и проведения экспериментальных сеансов не были полностью компенсированы данной системой температурной стабилизации. В результате, был обнаружен температурный дрейф величины энерговыделения в калориметре от энергии первичных частиц ионного пучка (рисунок 7), который привел к некорректному восстановлению энергий спектаторов и к ухудшению энергетического разрешения калориметра. Как уже отмечалось, для коррекции температурного дрейфа используемых микропиксельных фотодиодов в 2013 г. группой ИЯИ РАН был разработан алгоритм калибровки модулей калориметра с использованием экспериментальных данных по взаимодействию ядер ^{7}Be с ядрами ^{9}Be и он был использован для проведения калибровки экспериментальных данных калориметра, полученных в сеансах 2011 – 2013 г.г.

Однако этот метод нельзя использовать в дальнейших сеансах со средними и тяжелыми ядрами, т. к. практически невозможно бутет выделять одночастичные кластеры в этих реакциях. Поэтому коллаборацией в 2013 г. было принято решение провести модернизацию системы охлаждения фотодиодов калориметра. Ответственной за эту модернизацию является группа ИЯИ РАН.

Группой ИЯИ РАН было предложено использовать для охлаждения и стабилизации температуры 10 фотодиодов в каждом модуле один Пельтье элемент, установленный в этом модуле и управляемый специальным контроллером, который регулирует величину тока в Пельтье элементе, измеряет температуру в области установки фотодиодов и стабилизирует ее на уровне лучше 0.1 градуса Цельсия.

Схема такой системы охлаждения показана на рисунке 18.

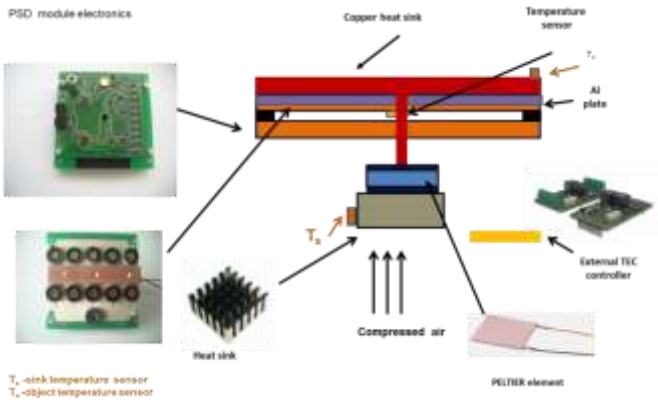


Рисунок 18 – Схема охлаждения фотодиодов Пельтье элементом в модуле калориметра. Пояснения к рисунку даны в тексте

Как уже отмечалось выше, в 2013 г. в ИЯИ РАН была начата разработка новой электроники модуля калориметра, которая была успешно завершена в 2014г. Эта электроника включает быстрые усилители для 10 фотодетекторов в модуле, источники напряжений для этих фотодиодов и систему контроля этих напряжений. Была также разработана и изготовлена система мониторирования усиления фотодиодов. Фотодиоды устанавливаются на алюминиевой пластине, и для ее охлаждения используется Пелтье элемент. Холодная сторона элемента приклеена теплопроводящим клеем к медной пластине. Эта пластина через круглый (диаметром 6 мм) медный теплоотвод, проходяший через отверстия в центрах 2х электронных плат, соединяется с другой медной пластиной, приклеенной к алюминивой пластине в промежутке между двумя рядами установленных на ней фотодиодов. Температура алюминиевой пластины с установленными на ней фотодиодами измеряется температурным датчиком, размещенным на этой же пластине. Другой температурный датчик установлен на горячей стороне элемента Пельтье, которая приклеена к радиатору. Для более эффективного охлаждения радиатора он обдувается холодным сжатым воздухом. Величина тока, скорость его изменения, а также значение температуры с термодатчиков считываются специальным контроллером TEC.

На рисунке 19 показаны фотография собранной для одного модуля электроники с системой охлаждения и стабилизации температуры фотодиодов в модуле. На левой фотографии на переднем плане показан контроллер TEC системы охлаждения фотодиодов.

Всего в 2014 г. было изготовлено и собрано 47 комплектов такой электроники.

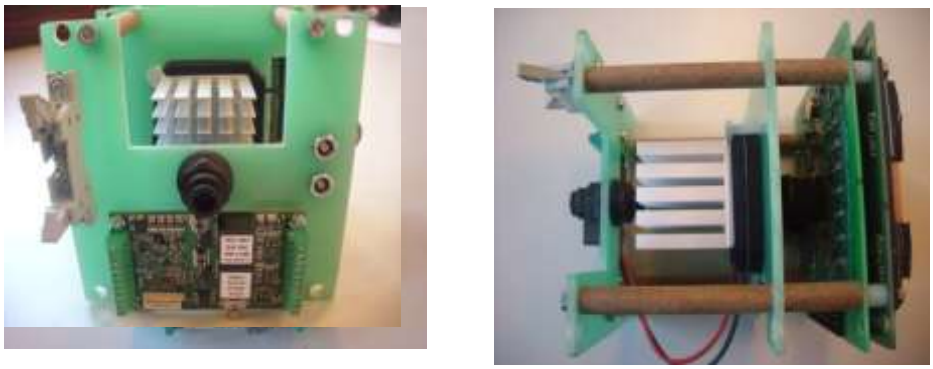


Рисунок 19 – Фотография полностью собранной электроники с системой охлаждения и стабилизации температуры фотодиодов дл одного модуля

На рисунке 20 показаны результаты измерений долговременной стабильности системы, проведенной во время сеанса p+Pb в ноябре 2014г. На верхнем рисунке показано вариация температуры в зале, где установлен калориметр в течение нескольких суток измерений. Температура менялась в диапазоне 18 - 20.5 градусов Цельсия. Через контроллер была задана установка температуры алюминиевой пластины с фотодиодами и ее стабилизация на уровне 20 градусов Цельсия. На нижнем рисунке показана вариация температуры, измеренная датчиком, установленным на алюминиевой пластине с фотодиодами. Видно, что среднее значение температуры составляет 20 градусов, и ее изменение меньше 0.01 градусов в течение всего времени измерений.

Таким образом, данная система обеспечивает долговременную температурую стабильность фотодиодов, необходимую для измерения энергии спектаторов с хорошей точностью.

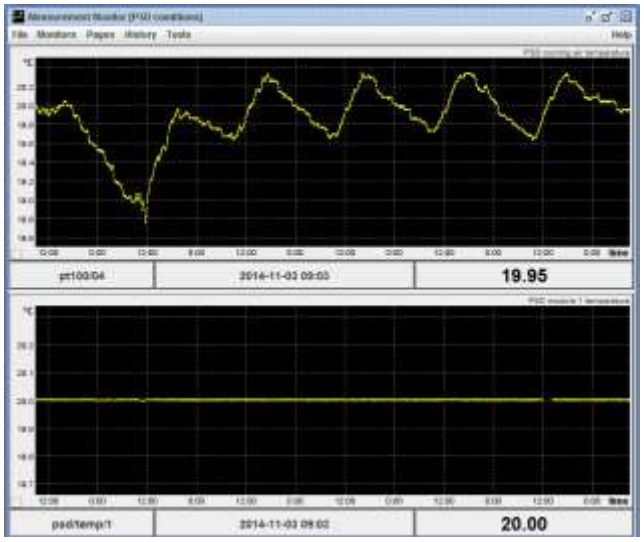


Рисунок 20 – Изменение температуры в помещение, где установлен калориметр (верхний рисунок) и температура лавинных фотодиодов в одном из модулей калориметра (нижний рисунок)

4.3 Калибровка и исследование отклика калориметра на пучках пионов и адронов в 2014 г.

Как уже отмечалось выше, в 2014 г. полностью завершено изготовления, установка в модулях калориметра и тестирование новой электроники для получения быстрых сигналов для триггера, мониторинга коэффициентов усиления лавинных фотодиодов, контроля питания фотодиодов, стабилизации и контроля температуры фотодиодов. Новая система электроники успешно работала в течение октября – декабря 2014г. на протонном сеансе эксперимента NA61 и полностью подготовлена к сеансу 2015 г. на пучке ядер аргона.

После завершения в середине 2014г. модернизации электроники калориметра, вся новая электроника и уже существовавшая электроника считывания были вновь собраны в модулях калориметра и интегрированы в общую систему сбора данных эксперимента NA61. Калориметр установлен на специальной платформе, которая может перемещаться по рельсам вдоль оси пучка, что позволяет устанавливать его во время физических сеансов на разных расстояниях от мишени в зависимости от энергии налетающего пучка ядер. Кроме того, платформа может перемещать калориметр в поперечных X-Y направлениях в диапазоне ±60см с точностью ±1мм, что необходимо для сканирования модулей калориметра при их калибровке на пучке мюонов и протонов. На рисунке 21 показаны фотографии полностью собранного и установленного на платформе калориметра.

Рисунок 21 – Слева - фотография полностью собранного и установленного на платформе калориметра. Справа - фотография задней части калориметра, где видна электроника, установленная в модулях калориметра

Энергетическая калибровка всех модулей калориметра была выполнена группой ИЯИ на пучке мюонов с импульсом 158 ГэВ/с в октябре 2014г. Настройка канала

транспортировки вторичного пучка на адронный калориметр установки NA61 была выполнена таким образом (при частично открытых коллиматорах канала транспортировки), что в месте расположения калориметра пучок адронов (пионов и протонов) имел существенную примесь и мюонов от распада пионов. Полная интенсивность пучка составляла порядка нескольких тысяч частиц в секунду.

На рисунке 22, слева показаны амплитудные спек Левый пик на этом рисунке соответствует суммарному энерговыделению мюонов во всех 10 секциях калориметра, а правый пик соответствует энерговыделению адронов (пионов и протонов). Все налетающие частицы имеют импульс 158 ГэВ/с.

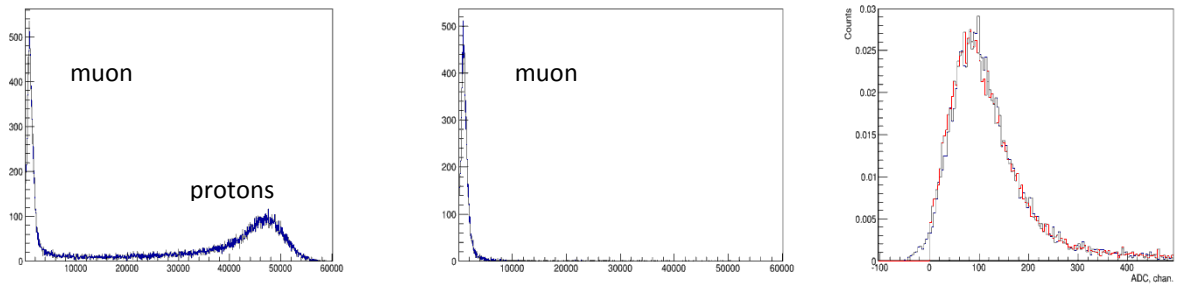


Рисунок 22

Слева показаны амплитудные спектры частиц (в каналах ADC), которые одновременно измерялись калориметром. Левый пик на этом рисунке соответствует суммарному энерговыделению мюонов во всех 10 секциях калориметра, а правый пик соответствует энерговыделению адронов (пионов и протонов). На рисунке в центре показано суммарное энерговыделение частиц во всех 10 секциях калориметра при полностью закрытых коллиматорах. На правом рисунке показаны наложенные друг на друга распределения, измеренные как с открытым коллиматором (красный цвет), так и с закрытым коллиматором (синий цвет), которые соответствуют энерговыделению мюонов

Для того чтобы убедиться, что левый пик действительно соответствует мюонам, коллиматоры в канале транспортировки были полностью закрыты. При этом калориметр действительно измерял энергию только мюонов (рисунок 22 в центре). На правом рисунок 22 показаны наложенные друг на друга распределения, измеренные как с открытым коллиматором (красный цвет), так и с закрытым коллиматором (синий цвет).

После первого этапа калибровки всех 44 модулей калориметра на пучке мюонов, напряжения на лавинных фотодиодах были изменены таким образом, чтобы положение пиков от энерговыделения мюонов в каждой секции калориметра было примерно одинаковыми. После этого была проведена окончательная калибровка мюонами всех модулей калориметра.

На рисунке 23 синим цветом показаны амплитудные спектры мюонов для 10 секций одного из маленьких центральных модулей (слева) и амплитудные спектры для 10 секций одного из больших модулей внешней части калориметра (справа). Красным цветом показаны шумовые амплитудные спектры, которые наблюдаются в секциях данных модулей при прохождении мюонами одного из соседних модулей. Видно, что средняя амплитуда от мюонов во всех секциях хорошо отделяется от средних значений шумовых амплитуд.

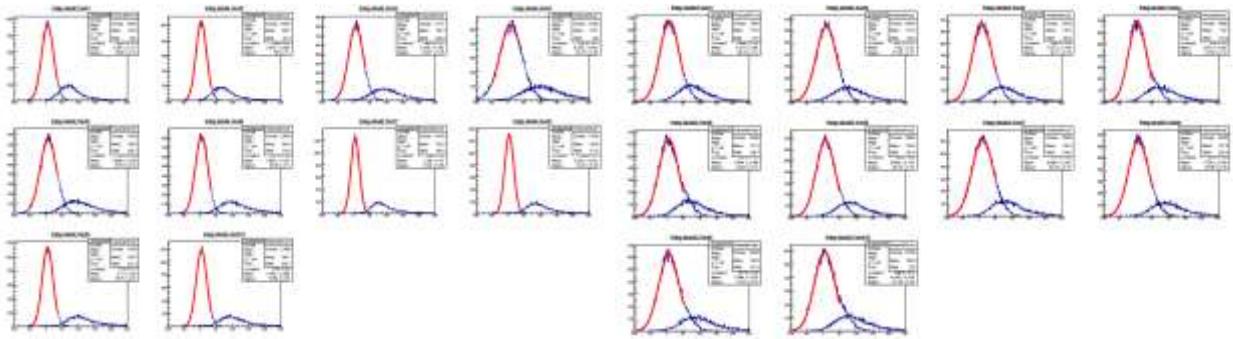


Рисунок 23 – Амплитудные спектры мюонов (синий цвет) для 10 секций одного из маленьких центральных модулей (слева) и амплитудные спектры мюонов для 10 секций одного из больших модулей внешней части калориметра (справа). Красным цветом показаны шумовые амплитудные спектры

Средние энергетические потери мюонов в каждой секции модуля калориметра определяются суммарной толщиной 6 сцинтилляторов и составляют порядка 5 МэВ. Поэтому для энергетической калибровки каналов амплитудных преобразователей, распределения амплитуд от мюонов (в единицах каналов) для каждой секции калориметра аппроксимировались суммой распределений Гаусса и Ландау (рисунок 24). После этого, амплитуде сигнала, соответствующей максимуму в этом распределении присваивается значение энергии 5 МэВ. Цена канала амплитудного преобразователя преобразуется в энергетическую шкалу простым делением этой энергии на соответствующий номер канала.

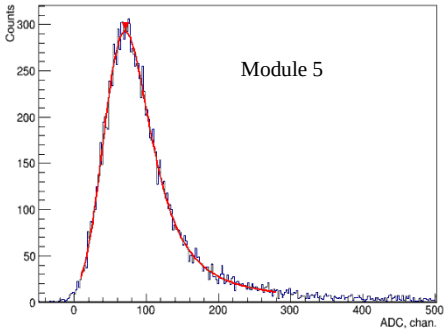


Рисунок 24 – Аппроксимация энерговыделения мюонов в одной из секций модуля 5 суммой распределений Гаусса и Ландау

На рисунке 25 показаны продольные профили адронного ливня - распределения энерговыделения адронов по номерам секций (1-10) для одного из маленьких модулей (слева) и большого модуля (в центре). На правом рисунке, показано распределение по числу сработавших секций в одном из модулей при регистрации мюонов. Видно, что в этом случае мюон проходит через все 10 секций модуля калориметра, теряя в каждой из секций энергию 5 МэВ.

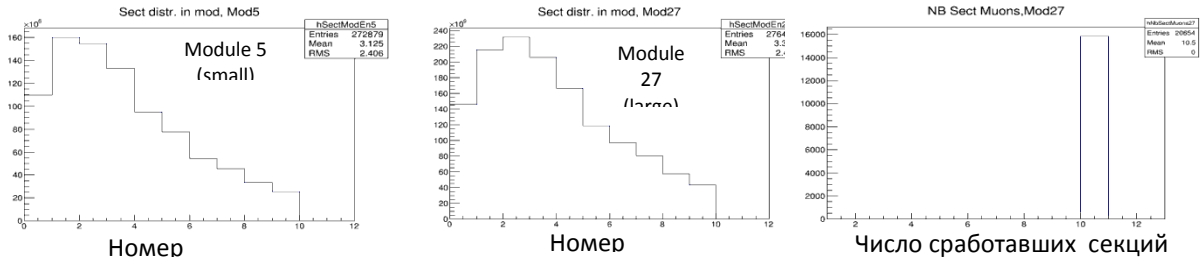


Рисунок 25 – Продольные профили адронного ливня для одного из маленьких модулей (слева) и большого модуля (в центре). На правом рисунке, показано распределение по числу сработавших секций в одном из модулей при регистрации мюонов

После проведенной калибровки энергетической шкалы амплитудных преобразователей всех 440 секций модулей калориметра на мюонном пучке, был исследован отклик калориметра при его поперечном сканировании пучком адронов с энергией 158 ГэВ. При этом, использовались данные по энерговыделению адронов в модулях калориметра, которые были получены одновременно во время мюонной калибровки. Результаты измерений среднего значения реконструированной потерянной энергии адронов в зависимости от координаты (номер модуля) в поперечной плоскости калориметра с использованием калибровочных коэффициентов, полученных для всех модулей калориметра на мюонном пучке, показаны на рисунке 26 (слева). Видно, что реконструированное среднее значение потерянной энергии адронов практически не зависит от положения пучка на калориметре. Восстановленная энергия адронов в модулях показана на этом же рисунке справа. Синяя кривая соответствует учету выделенной энергии во всех 440 секциях калориметра, а красная кривая соответствует учету выделенной энергии только в модулях окружающих рассматриваемый модуль (кластер). Видно, что энергия адронов с хорошей точностью восстанавливается в поперечной плоскости калориметра и н не зависит от точки попадания адрона в калориметр. Шумы электроники практически не влияют на

точность реконструкции восстановленной энергии в модулях при выбранном пороге регистрации (красные и синие линии практически совпадают).

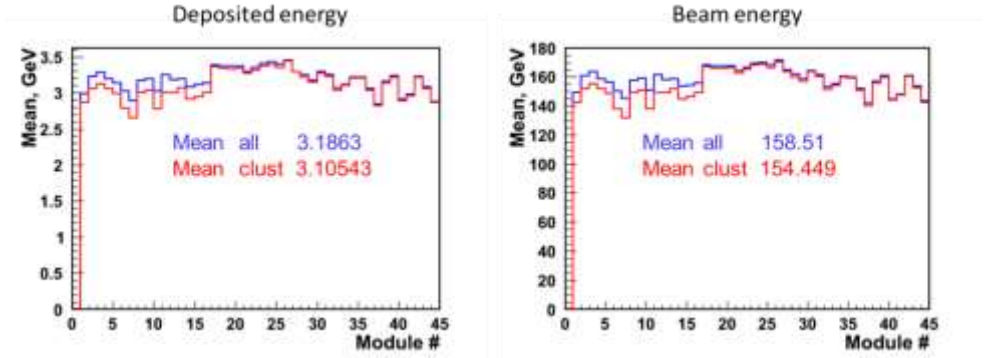


Рисунок 26 – Среднее значение реконструированной энергии адронов (слева) и восстановленная энергия адронов (справа) с использованием калибровочных коэффициентов, полученных на мюонном пучке. Красные и синие кривые соответствуют разным способам реконструкции энергии и разрешения, описанным в тексте

Для исследования линейности отклика и энергетического разрешения калориметра были проведено сканирование по энергии адронов одного из центральных маленьких модулей калориметра и одного из больших периферийных модулей в диапазоне от 13 до 158 ГэВ. Используя полученные на мюонном пучке коэффициенты калибровки, реконструировались энергии адронов, измеренные калориметром. На рисунке 27 показаны полученные результаты.

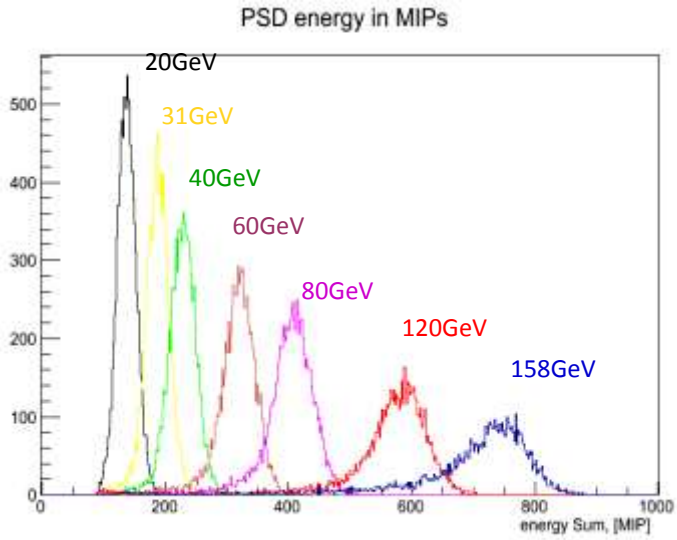


Рисунок 27 – Реконструкция энергий адронов передним адронным калориметром после проведенной калибровки модулей калориметра на пучке мюонов

Видно, что с повышением энергии адронов, наблюдается отклонение формы распределений от гауссовской, что является свидетельством утечек части адронного ливня

через заднюю стенку калориметра, т.к. полная длина калориметра составляет только 5.6 ядерных длин.

На рисунке 28, слева показано энергетическое разрешение калориметра, когда пучок адронов, попадает в один из центральных модулей, а справа показана полученная при этом линейность отклика калориметра. На правом рисунке видно, что имеется небольшое отклонение от линейности при энергии 158 ГэВ, что связано, как уже упоминалось, с частичной утечкой адронного ливня через заднюю стенку калориметра. Энергетическое разрешение калориметра аппроксимировалось функцией с тремя параметрами $y = \sqrt{((a/\sqrt{E})^2 + b^2 + (c/E)^2)}$, где a – константа стохастического члена, в – константный член, c – параметр члена, который описывает вклад шумов электроники.

В результате аппроксимации получены следующие значения параметров : a = 75.5%, b = 3.3%, c = 0.7 ГэВ. Полученное значение константы стохастического члена совпадает с соответствующей константой, полученной ранее при калибровке данных сеанса Be+ Be.

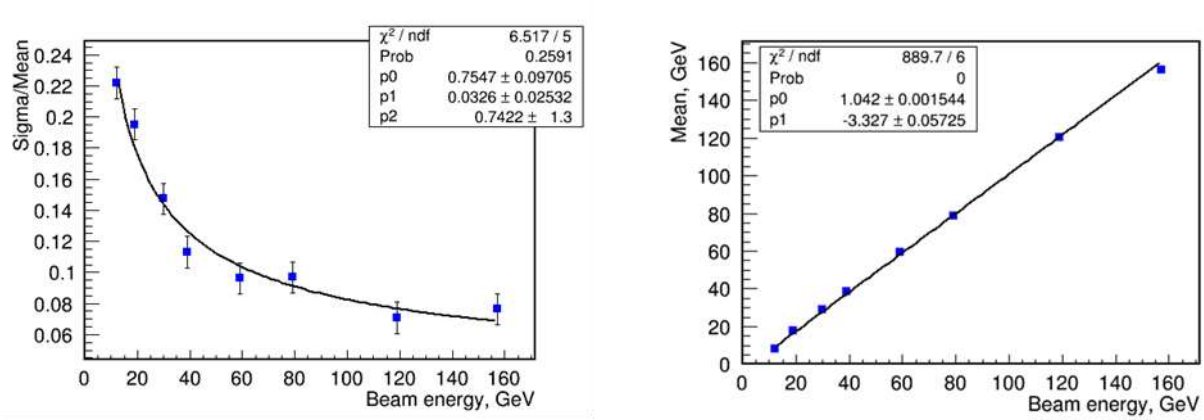


Рисунок 28 – Слева показано энергетическое разрешение калориметра, когда пучок адронов, попадает в один из центральных модулей, а справа показана полученная при этом линейность отклика калориметра

Таким образом, проведенная калибровка и первые предварительные оценки отклика калориметр показали, что калориметр после модернизации электроники и проведенной калибровки готов к набору физическому сеансу Ar +Sc, который начнется в феврале 2015г. В настоящий момент предварительно обработана лишь часть полученных во время калибровочного сеанса данных. Требуется дальнейший детальный анализ всех полученных данных по калибровке калориметра с более точной минимизацией вклада шумов электроники, сравнение полученных данных с результатами моделирования.

4.3 Разработка и поддержка группой ИЯИ РАН программного обеспечения для моделирования адронного калориметра и для визуализации работы калориметра во время сеансов

Для моделирования отклика калориметра PSD группой ИЯИ РАН в 2014г. был написан специальный модуль для пакета обработки и моделирования Shine эксперимента **NA61**. Этот модуль позволяет описать всю геометрию калориметра, а также материалы и чувствительные объемы, необходимые для работы пакета GEANT4. Для того, чтобы сигнал с "идеального" калориметра преобразовать в сигнал, максимально близкий к реальному отклику, был создан модуль оцифровки - PSD Digitizer. .

В качестве считывающей электроники используется специализированная микросхема FPGA, которая осуществляет непрерывное сканирование сигнала каждого лавинного фотодиода с его оцифровкой, и по приходу триггерного сигнала буфер из 256 последних отсчетов считывается и передается в систему сбора данных (DAQ). На рисунке 29. показаны примеры сигналов с детектора PSD, получаемые на пучке мюонов и протонов.

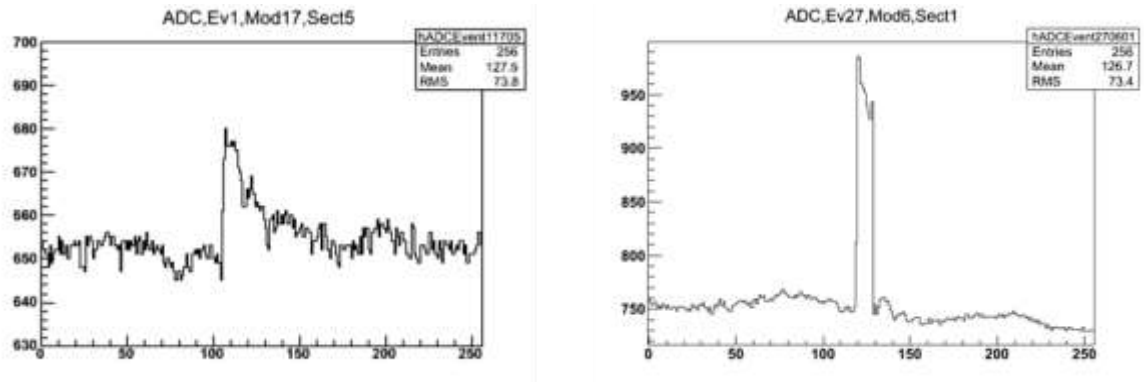


Рисунок 29 – Форма сигнала, получаемого с FPGA калориметра PSD. Слева - сигнал от минимально ионизирующей частицы (моюн), справа – сигнал в секции от адронного ливня, вызванного протоном с импульсом 15 8ГэВ/с. Горизонтальная ось - отсчеты FPGA (256 каналов); вертикальная ось - амплитуда сигнала (каналы ADC)

На рисунке 30. представлены результаты работы модуля оцифровки также для мюонов и протонов.

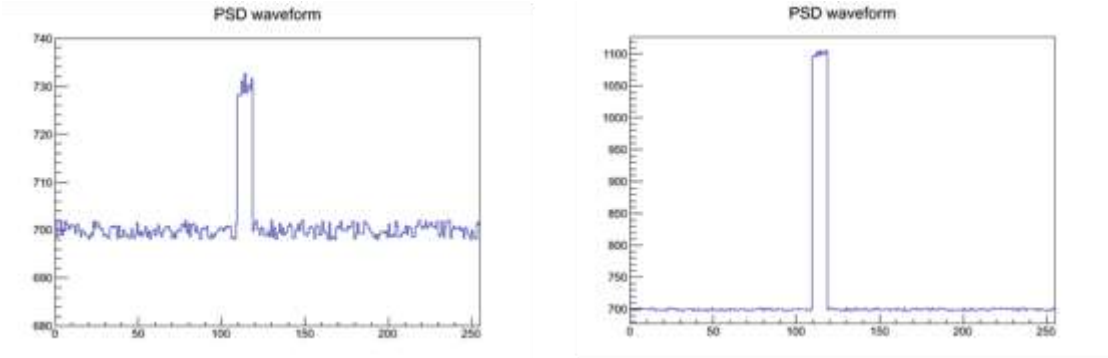


Рисунок 30 – Результат работы модуля оцифровки для мюона (слева) и для протонного ливня водной из секций модуля калориметра (справа)

В 2014г. группой ИЯИ РАН был также разработан модуль для визуализации событий калориметра PSD во время сеанса. На рисунке 31 показан вид события от прохождения частиц через калориметр. Данный модуль позволяет в режиме реального времени следить за работоспособностью всех модулей калориметра одновременно.

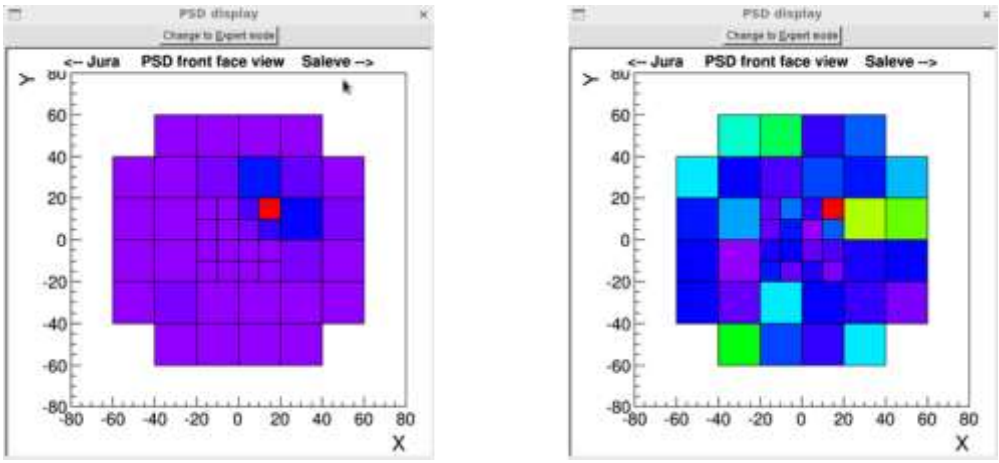


Рисунок 31 – Визуализация работы модулей калориметра PSD для мюонов (слева) и протонов (справа).

4.3 Список докладов, сделанных российскими участниками на международных совещаниях и конференциях в 2014 г. по тематике NA61.

В 2014 г. сотрудники ИЯИ РАН выступили с 14 докладами на международных совещаниях коллаборации NA61:

Hardware Upgrade Meeting at CERN, 3 - 5 March 2014, PSD upgrade, Fedor Guber, Alexander Ivashkin, Oleg Petukhov

NA61/NA49 Collaboration meeting in Dubna, 7 -11 April 2014.

- PSD simulation: the digitizer, O.Petukhov

- Book-keeping, A.Sadovsky

- Status of the PSD upgrade, O.Petukhov

- The PSD slow control, Sergey Morozov

- Towards reaction plane reconstruction and azimuthal flow analysis in NA61, Alexander Sadovskiy

NA61/NA49 Collaboration meeting, CERN, 22 -26 September 2014.

- PSD simulation, O.Petukhov

- Book-keeping, A.Sadovsky

- PSD upgrade performance, A.Ivashkin

Сотрудники групп ИЯИ РАН регулярно выступали на еженедельных видео совещаниях коллаборации NA61/SHINE (калибровка, анализ данных, программное обеспечение, модернизация установки).

4.3 Наиболее важные научные достижения в 2014г.

- Успешно завершена модернизация электроники контроля параметров модулей адронного калориметра. Эта электроника включает в себя систему мониторинга коэффициентов усиления лавинных фотодиодов, систему контроля питания фотодиодов и систему стабилизации и контроля температуры фотодиодов.

- Проведена калибровка переднего адронного калориметра на пучках мюонов и адронов. Проведен предварительный анализ полученных данных.

- Передний адронный калориметр был полностью подготовлен к сеансу по измерению выхода частиц в реакции p + Pb при энергии налетающего пучка протонов 158 ГэВ, который состоялся в октябре-декабре 2014г. Группа ИЯИ РАН обеспечивала работоспособность калориметра и контроля качества данных во время сеанса, участвовала в рабочих сменах NA61.

- Разработано предложение (было доложено на совещаниях коллаборации NA61) и и сделана предварительная оценка возможности измерения плоскости реакции для измерения потоков частиц в ядро-ядерных взаимодействиях с помощью переднего адронного калориметра в эксперимента на установке NA61.

- Разработаны модули программного обеспечения для моделирования отклика калориметра PSD эксперимента NA61 и визуализации в реальном времени сигнала со всех модулей калориметра в общей пакете SHINE эксперимента NA61.

- Члены группы ИЯИ участвовали в рабочих совещаниях NA61 с докладами по полученным результатам.

4.3 Список статей в научных журналах, опубликованных в 2014г., в подготовке которых российские участники играли лидирующую роль

1. Measurements of Production Properties of K_0S mesons and Lambda hyperons in Proton-Carbon Interactions at 31 GeV/c. NA61 Collaboration, N. Abgrall, ,…O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky, T.Drozhzhova,G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al. Phys.Rev. C89 (2014) 025205 DOI: 10.1103/PhysRevC.89.025205.

2. Measurement of negatively charged pion spectra in inelastic p+p interactions at 20, 31, 40, 80 and 158 GeV/c. NA61/SHINE Collaboration (N. Abgrall (Geneva U.) O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky, T.Drozhzhova,G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al. Eur. Phys. J. C (2014) 74:2794. DOI 10.1140/epjc/s10052-014-2794-6

3. NA61/SHINE facility at the CERN SPS: beams and detector system NA61/SHINE Collaboration (N. Abgrall (Geneva U.) …O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky, T.Drozhzhova,G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al. e-Print: arXiv:1401.4699 [physics.ins-det] JINST **9** P06005, 2014 doi:10.1088/1748-0221/9/06/P06005

4. Экспериментальное исследование отклика модуля адронного калориметра при энергиях протонов и пионов 1-5 ГэВ. О. Андреева, М.Голубева, Ф.Губер, А.Ивашкин, А.Курепин, В.Марин, О.Петухов, А.Садовский, An Experimental Study of the Hadron Calorimeter Module Response to Protons and Pions with Energies of 1–5 GeV, Instruments and Experimental Techniques, 2014, Vol. 57, No. 6, pp. 651–657 M.B. Golubeva, F.F. Guber, A.P. Ivashkin, A.B. Kurepin, V.N. Marin, O.A. Petukhov, A.S. Sadovsky, 2014, Pribory i Tekhnika Eksperimenta, 2014, No. 6, pp. 5–12.

5. Report from the NA61/SHINE experiment at the CERN SPS. N. Abgrall , …O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov,

A.Sadovsky, T.Drozhzhova,G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al. CERN-SPSC-2014-031; SPSC-SR-145 http://cds.cern.ch/record/1955138/files/SPSC-SR-145.pdf

4.3 Прогнозные планы эксперимента NA61 на 2015 - 2019 гг. и ожидаемые результаты

В 2015 и 2016 годах, в соответствии с планами коллаборации и ускорителя SPS, предполагается набор данных с первичными пучками ядер Ar и Xe, соответственно. В качестве мишени будут использоваться Sc и La. Также планируется в 2015 году продолжение сканирования по энергии p + Pb (13, 20, 30, 40, 75, 150 AGeV/c). В конце 2015г запланирован двухнедельный сеанс Pb + Pb при энергии налетающего пучка протонов 40 АГэВ. Планируется (пока не принято окончательное решение) совместно с американскими участниками NA61 измерении выходов пионов и каонов в реакции p +A при энергии налетающих протонов 120 и 60 ГэВ, которые необходимы для нейтринных экспериментов.

В 2017-2019 годах запланированы измерения Pb + Pb (при энергиях 13, 20, 30, 40, 75, 150 AGeV/c) со статистикой, в 10 раз превышающей данные NA49 и с применением нового вершинного детектора.

Во всех этих планируемых экспериментах планируется использовать передний адронный калориметр, который разработан и изготовлен в ИЯИ РАН. ИЯИ РАН отвечает за калибровку, обслуживание калориметра во время сеансов и анализ данных с этого калориметра. СПбГУ будет участвовать в разработке и создании нового вершинного детектора эксперимента и его интеграции в NA61(SHINE), а также в анализе данных.

Успешное выполнение данной физической программы позволит ответить на вопрос о существование критической точки фазового перехода между двумя фазами сильно взаимодействующей материи и детально исследовать начало деконфаймента. Полученные результаты будут иметь фундаментальное значение для понимания свойств ядерной материи в экстремальном состоянии.

4.3 Заключение

Группа ИЯИ РАН полностью выполнила программу работ за 2014 г.

- Успешно завершена модернизация электроники контроля параметров модулей адронного калориметра. Эта электроника включает в себя систему мониторинга коэффициентов усиления лавинных фотодиодов, систему контроля питания фотодиодов и систему стабилизации и контроля температуры фотодиодов.

- Проведена калибровка переднего адронного калориметра на пучках мюонов и адронов. Проведен предварительный анализ полученных данных.

- Передний адронный калориметр был полностью подготовлен к сеансу по измерению выходв частиц в реакции p + Pb при энергии налетающего пучка протонов 158 ГэВ, который состояля в октябре-декабре 2014г. Группв ИЯИ РАН обеспечивала работоспособность калориметра и контроль качества набора данных во время сеанса, участвовала в рабочих сменах NA61.

- Разработано предложение (было доложено на совещаниях коллаборации NA61) и сделана предварительная оценка возможности измерения плоскости реакции для определения потоков частиц в ядро-ядерных взаимодействиях с помощью переднего адронного калориметра эксперимента на установке NA61.

- Разработаны модули программного обеспечения для моделирования отклика калориметра PSD эксперимента NA61 и визуализации в реальном времени сигнала со всех модулей калориметра в общем пакете SHINE эксперимента NA61.

- Члены группы ИЯИ участвовали в рабочих совещаниях NA61 с докладами по полученным результатам.

4.4 Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Дармшадт, Германия)

Руководитель работ з.д.н. А.Б.Курепин.

Ответственный исполнитель от ИЯИ РАН:

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. Ф.Ф. Губер

Список исполнителей:

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н.	А.П. Ивашкин
Научный сотрудник	М.Б. Голубева
Научный сотрудник	С.В. Морозов
Младший научный сотрудник	О.А. Петухов
Младший научный сотрудник	О.В. Андреева
Техник	С.К. Попов

4.4 Введение

Актуальность проблемы. Основные цели эксперимента CBM.

Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке CBM (Compressed Barionic Matter) направлена на исследования фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи [1]. На коллайдерах RHIC и LHC фазовая диаграмма КХД изучается при очень высоких температурах и очень низкой барионной плотности. Для больших значений барионной плотности и меньших температур ожидается фазовый переход первого рода между адронной и партонной или кварковой материей заканчивающийся критической точкой, а также киральный фазовый переход. Экспериментальное открытие этих процессов было бы важным прорывом в нашем понимании свойств ядерной материи. Область высокой плотности на фазовой диаграмме будет экспериментально исследована в ядро-ядерных столкновениях с энергиями пучка 2-45 ГэВ/нуклон на создаваемой установке CBM сильноточного ускорительного комплекса ФАИР. На первом этапе комплекса ФАИР ядро-ядерные столкновения будут изучаться с использованием пучков ускорителя SIS100 с энергиями до 11 ГэВ/нуклон для столкновений AuAu. На втором этапе создания комплекса ФАИР (ускоритель SIS300) энергия пучка будет увеличена до 35 ГэВ/нуклон для ядер золота.

Как показывают расчеты, основанные на транспортных моделях, уже при энергиях SIS100 в центральных столкновениях тяжелых ионов будут достигаться плотность ядерной материи вплоть до 7 ρ_0 и исследование уравнения состояния ядерной материи (EoS) при таких больших плотностях, близких к плотности нейтронных звезд, имеет приложения к вопросам астрофизики.

Для определения таких глобальных характеристик событий как центральность и угол плоскости реакции, получаемых в ядро-ядерных столкновениях на установке CBM, ИЯИ РАН является ответственным за разработку переднего адронного калориметра фрагментов, PSD – Projectle Spectator Detector. Этот калориметр необходим для изучения большого набора наблюдаемых в зависимости от центральности столкновения, которая используется для определения плотности энергии, достигаемой в этих реакциях, а также для исследования пособытийных флуктуаций и коллективных потоков идентифицированных адронов и редких пробников, включая J/Ψ.

4.4 Участие группы ИЯИ РАН в эксперименте CBM в 2014г.

В 2013 году группой ИЯИ РАН был подготовлен Технический проект переднего адронного калориметра установки CBM и отправлен в ФАИР для прохождения внешней экспертизы. В течение 2014г. проводилась работа по доработке технического проекта с учетом вопросов и замечаний, поступивших от экспертов. В сентябре 2014г поправленный технический проект был отправлен в ФАИР для его утверждения. Технический проект переднего адронного калориметра утвержден на заседании комитета ФАИР 25 ноября 2014г.

Проведенное в 2014г. моделирование переднего адронного калориметра показало, что он обеспечивает наилучшую точность восстановления угла плоскости реакции по сравнению с другими детекторными системами CBM и обеспечивает необходимое энергетическое разрешение и линейность отклика калориметра при измерении энергии спектаторов.

В 2014г. опубликована статья в журнал «Приборы и техника эксперимента» по исследованию отклика модуля адронного калориметра PSD на пучке канала T10 в ЦЕРНе при импульсах налетающих протонов 2 – 6 ГэВ/с.

4.4 Основные направления участия группы ИЯИ РАН в эксперименте CBM в 2014г.

В 2014 году работа в эксперименте CBM группой ИЯИ РАН проводилась по нескольким основным направлениям:

- доработка Технического проекта переднего адронного калориметра установки CBM в соответствие с вопросами и замечаниями экспертной комиссии ФАИР. Сдача Технического проекта переднего адронного для утверждения в ФАИР;

- разработка методики определения потоков частиц в CBM, продолжение моделирования точности определения угла плоскости реакции передним адронным калориметром, а также другими детекторными системами CBM;

- исследование свойств генераторов событий ядро-ядерных взаимодействий SHIELD и LAQGSM, учитывающие тяжелые фрагменты при моделировании центральности и плоскости реакции и их интеграция в программу моделирования CBMRoot эксперимента CBM для моделирования отклика переднего адронного калориметра и исследований корреляций отклика калориметра с другими детекторными системами CBM;

– продолжение работы по моделированию образования и детектирования J/psi с помощью электромагнитного калориметра CBM через их распад на электрон-позитронную пару;

- подготовка статьи в журнал «Приборы и техника эксперимента с результатами анализа данных по тестированию модуля адронного калориметра на пучке канала T10 в ЦЕРНе при импульсах налетающих протонов 2 – 6 ГэВ/с;

- выступления на совещаниях коллаборации CBM с докладами.

4.4 Краткое описание установки CBM

Установка CBM [2] представляет собой магнитный спектрометр со сверхпроводящим магнитом и ряд детекторных систем для идентификации типа частиц, определения их импульсов, электромагнитного калориметра, а также переднего адронного калориметра – PSD для измерения энергии частиц-спектаторов не участвовавших в процессе взаимодействия налетающего ядра с ядром мишени. Существует две версии установки CBM – одна для детектирования распадов векторных мезонов по их распадам на электрон-позитронные пары, другая, для детектирования распадов на мюонные пары. Адронный калориметр, используется в обоих версиях и служит для определения таких глобальных

характеристик взаимодействия как центральность взаимодействия и определение угла плоскости реакции, необходимого для определения потоков частиц.

Рисунок 1 – Установка CBM. Слева - версия для детектирования электрон-позитронных пар, справа – версия установки для детектирования мюонных пар

4.4 Участие ИЯИ РАН в разработке Технического проекта переднего адронного калориметра.

За разработку и создание переднего адронного калориметра отвечает группа ИЯИ РАН. Работы по разработке этого калориметра ведутся в ИЯИ РАН с 2006г. В 2014 году был доработан Технический проект переднего адронного калориметра установки CBM [3], в соответствие с вопросами и замечаниями экспертной комиссии ФАИР. В этом техническом проекте обобщены результаты моделирования определения плоскости реакции передним калориметром, точности определения центральности и оценки радиационной стойкости калориметра. Детальное техническое описание модулей калориметра, результаты тестов изготовленных прототипов и т.д. также обобщены и представлены в Техническом проекте этого калориметра. Ранее, в апреле 2013г, Технический проект был одобрен коллаборацией CBM (рисунок 2, слева) и представлен в комитет ФАИР для проведения внешней экспертизы. В сентябре 2014г поправленный технический проект (с учетом замечаний и вопросов экспертной комиссии) был отправлен в ФАИР для его утверждения. Технический проект переднего адронного калориметра утвержден на заседании комитета ФАИР 25 ноября 2014г.

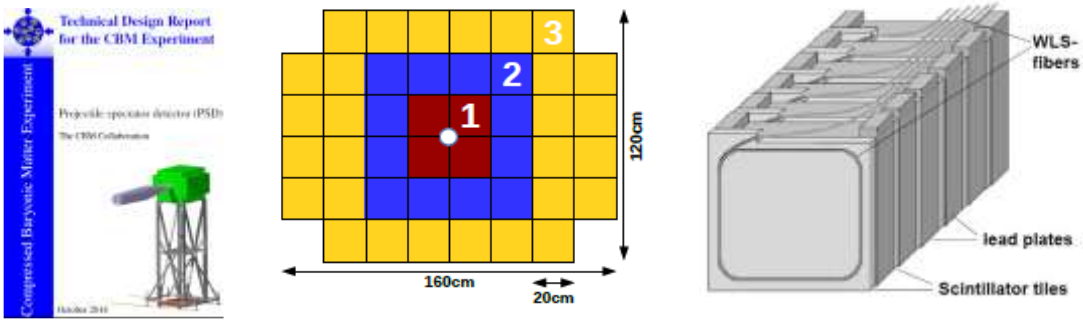


Рисунок 2 – Копия титульной страницы Технического проекта переднего адронного калориметра установки CBM (слева). Схема переднего вида детектора PSD (в центре) и схема вида отдельного модуля PSD (справа)

PSD – это модульный калориметр, состоящий из 44 отдельных модулей (рисунок 2, в центре) с отверстием диаметром 60 мм в центральной части калориметра для прохождения налетающего пучка ядер. Каждый модуль адронного калориметра имеет поперечный размер 20 x 20 см^2 и состоит из 60 слоев пластин свинца с толщиной каждой пластины 16 мм с расположенными между ними пластинами из пластикового сцинтиллятора толщиной 4 мм. Сбор света со сцинтилляционных пластин осуществляется посредством спектросмещающего оптоволокна вклеенного во фрезерованную канавку на плоской стороне сцинтилляционной пластины. Такая конструкция обеспечивает высокую эффективность и равномерность светосбора, в пределах нескольких процентов, светосбора с пластины сцинтиллятора. Свет из каждых 6 последовательно расположенных пластин сцинтиллятора собирается спектросмещающими оптоволокнами на один микропиксельный лавинный фотодетектор с чувствительной областью 3x3 мм^2, расположенном в конце модуля (рисунок 2, справа). Продольная сегментация модуля на 10 секций обеспечивает равномерность сбора света вдоль всего модуля и предоставляет, также, уникальную возможность для улучшения энергетического разрешения, основанного на измерении продольного профиля ливня.

Полная длина модуля калориметра соответствует 6 длинам ядерного взаимодействия. Вес одного модуля порядка 500 кг.

4.4 Подготовка публикации по результатам исследования отклика калориметра на пучках пионов и протонов

В 2014г. был завершен анализ экспериментальных данных по исследованию отклика модуль адронного калориметра на пучке канала T10 в ЦЕРНе при импульсах налетающих протонов 2 – 6 ГэВ/с. Результаты опубликованы в виде статьи (журнал «Приборы и техника эксперимента»).

На рисунке 3 представлены результаты измерения энергетического разрешения и линейности отклика модуля калориметра при этих энергиях, а также при более высоких энергия, измеренных ранее. Полученная константа стохастического члена в разрешении – порядка 56%, удовлетворяет требованию эксперимента к точности измерения энергии спектаторов.

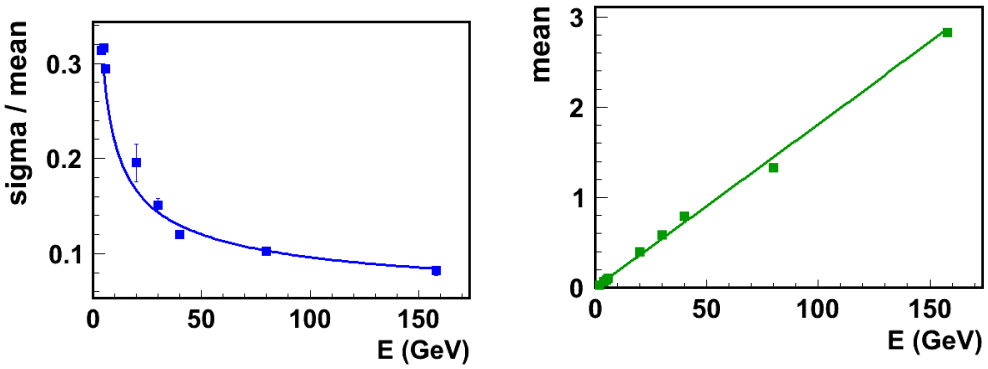


Рисунок 3 – Энергетическое разрешение (слева) и линейности отклика (справа) модуля калориметра

4.4 Разработка системы охлаждения и стабилизации температуры лавинных фотодиодов в модуле адронного калориметра

В настоящее время во всех изготовленных нами прототипах использовались лавинные фотодиоды MAPD3-A (производства Zecotek), которые имеют сильную температурную зависимость коэффициента усиления от температуры, который составляет порядка 4 %/^{0}C. Этот эффект приводит к температурному дрейфу величины энерговыделения в калориметре при данной энергии спектаторов, к некорректному восстановлению энергий спектаторов и к ухудшению энергетического разрешения калориметра.

В 2014г. группой ИЯИ РАН была разработана система охлаждения и стабилизации температуры 10 фотодиодов в каждом модуле калориметра на основе Пельтье элемента, установленного в этом модуле и управляемого специальным контроллером. Этот контроллер регулирует величину тока в Пельтье элементе, измеряет температуру в области установки фотодиодов и стабилизирует ее на уровне лучше 0.1 градуса Цельсия.

Схема такой системы охлаждения показана на рисунке 4.

Эта система включает в себя также и электронику модуля калориметра - быстрые усилители для 10 фотодетекторов в модуле, источники напряжений для этих фотодиодов и система контроля этих напряжений, систему мониторирования усиления фотодиодов. Фотодиоды устанавливаются на алюминиевой пластине, и для ее охлаждения используется Пелтье элемент. Холодная сторона элемента приклеена теплопроводящим клеем к медной пластине. Эта пластина через круглый (диаметром 6 мм) медный теплоотвод, проходящий через отверстия в центрах 2х электронных плат, соединяется с другой медной пластиной, приклеенной к алюминиевой пластине в промежутке между двумя рядами установленных на ней фотодиодов. Температура алюминиевой пластины с установленными на ней фотодиодами измеряется температурным датчиком, размещенным на этой же пластине. Другой температурный датчик установлен на горячей стороне элемента Пельтье, которая приклеена к радиатору. Для более эффективного охлаждения радиатора он обдувается холодным сжатым воздухом. Величина тока, скорость его изменения, а также значение температуры с термодатчиков считываются специальным контроллером TEC.

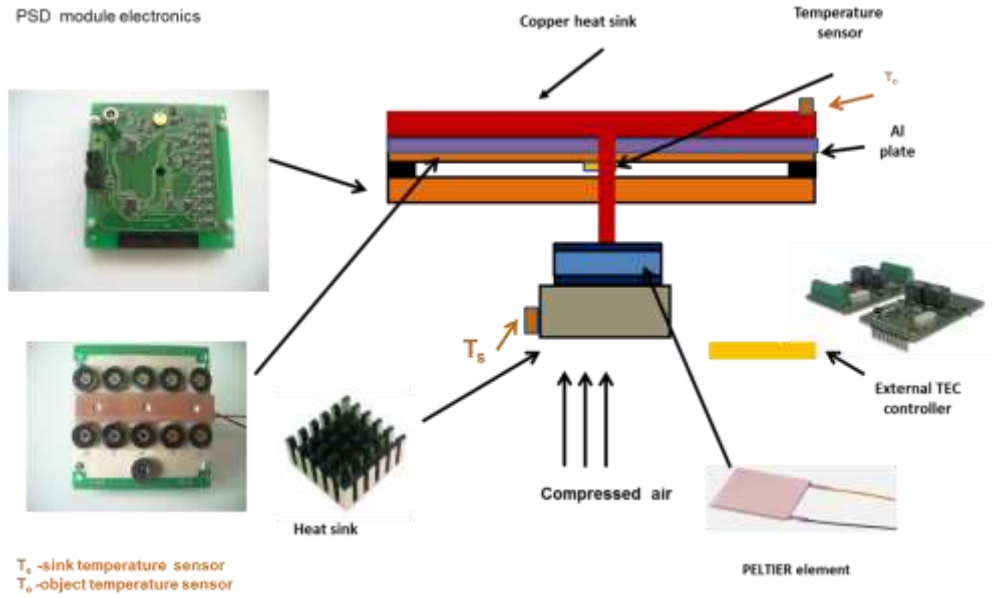


Рисунок 4 – Схема охлаждения фотодиодов Пельтье элементом в модуле калориметра. Пояснения к рисунку даны в тексте

На рисунке 5 (слева) показана фотография прототипа электроники с системой охлаждения и стабилизации температуры фотодиодов в модуле. На этом же рисунке, справа, показано расположение 10 фотодиодов на алюминиевой пластине. Между двумя рядами фотодиодов видна медная пластина, приклеенная к алюминиевой пластине, которая является теплопроводом от Пельтье элемента.

На рисунке 6 (вверху, слева) показана фотография модуля с установленной электроникой и системой охлаждения и термостабилизации. Объем модуля с установленной электроникой отделяется термоизолирующей пластиной от внешнего объема. Поэтому на этой фотографии виден только радиатор охлаждения, который принудительно обдувается сжатым воздухом.

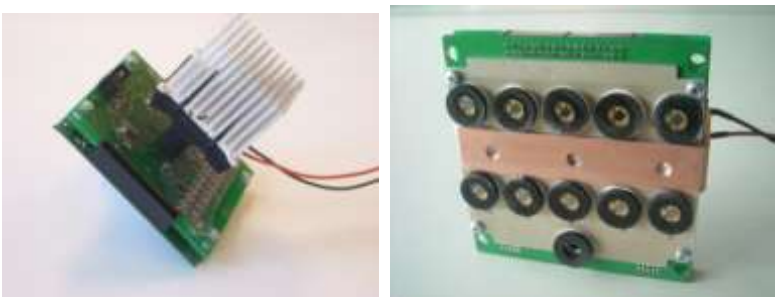


Рисунок 5 – Фотография прототипа электроники с системой охлаждения и стабилизации температуры фотодиодов в модуле.

На этом же рисунке приведены результаты тестовых измерений долговременной стабильности системы. На правом верхнем рисунке показано изменение температуры в помещении, где установлен калориметр в течение суток. Температура была в диапазоне 19.5 - 20.5 градусов Цельсия. Через контроллер была задана установка температуры алюминиевой пластины с фотодиодами и ее стабилизация на уровне 17 градусов Цельсия. На нижнем левом рисунке верхняя кривая показывает температуру радиатора в течение суток, а нижняя красная линия показывает температуру, измеряемую датчиком, установленным на алюминиевой пластине с фотодиодами. На правом нижнем рисунке показано распределение этой температуры в течение суток. Видно, что среднее значение температуры составляет 17 градусов, а ширина распределения меньше 0.1 градусов.

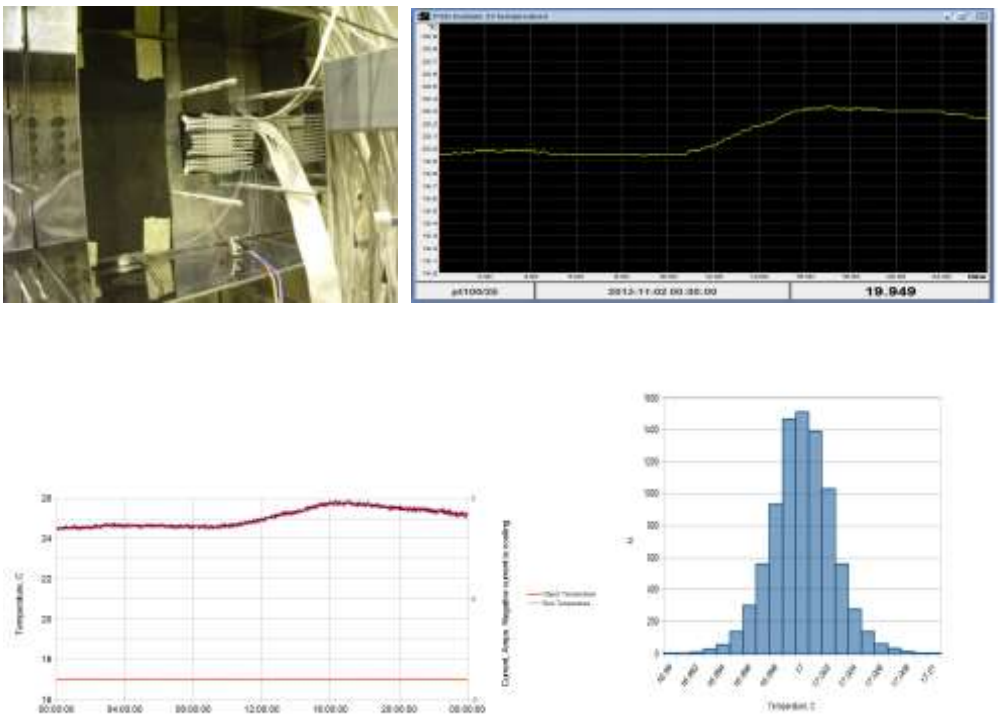


Рисунок 6 – Расположение электроники с системой термостабилизации в модуле (справа вверху) и результаты тестовых измерений. Пояснения к этому рисунку приведены в тексте

Таким образом, данная система обеспечивает долговременную температурную стабильность фотодиодов, необходимую для измерения энергии спектаторов с хорошей точностью.

4.4 Участие ИЯИ РАН в моделировании адронного калориметра CBM – определение центральности и угла плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях

Для исследования основных характеристик адронного калориметра было проведено детальное моделирование столкновений тяжелых ионов с реалистичными генераторами образования ядер-осколков, направленного и эллиптического потоков рожденных частиц и их транспортировкой с использованием GEANT4 через полную геометрию CBM детектора (Рисунок 7). Было показано, что разбиение события на 3 составных подсобытия, в соответствии с их радиальным положением в поперечной плоскости калориметра (помечены разными цветами и цифрами 1, 2, 3 на центральном рисунок 2), может использоваться для независимого определения центральности PSD калориметром. В зависимости от энергии столкновения, PSD имеет сравнимое разрешение по прицельному параметру, что и система трековых детекторов (STS) установки CBM. Таким образом, PSD обеспечивает независимый метод в определении центральности в CBM эксперименте. Было

показано, что при использовании калориметра совместно с STS, PSD помогает улучшить точность определения центральности в диапазоне 0-40% и позволяет определение центральности с разбивкой этого диапазона на более узкие классы шириной 5%.

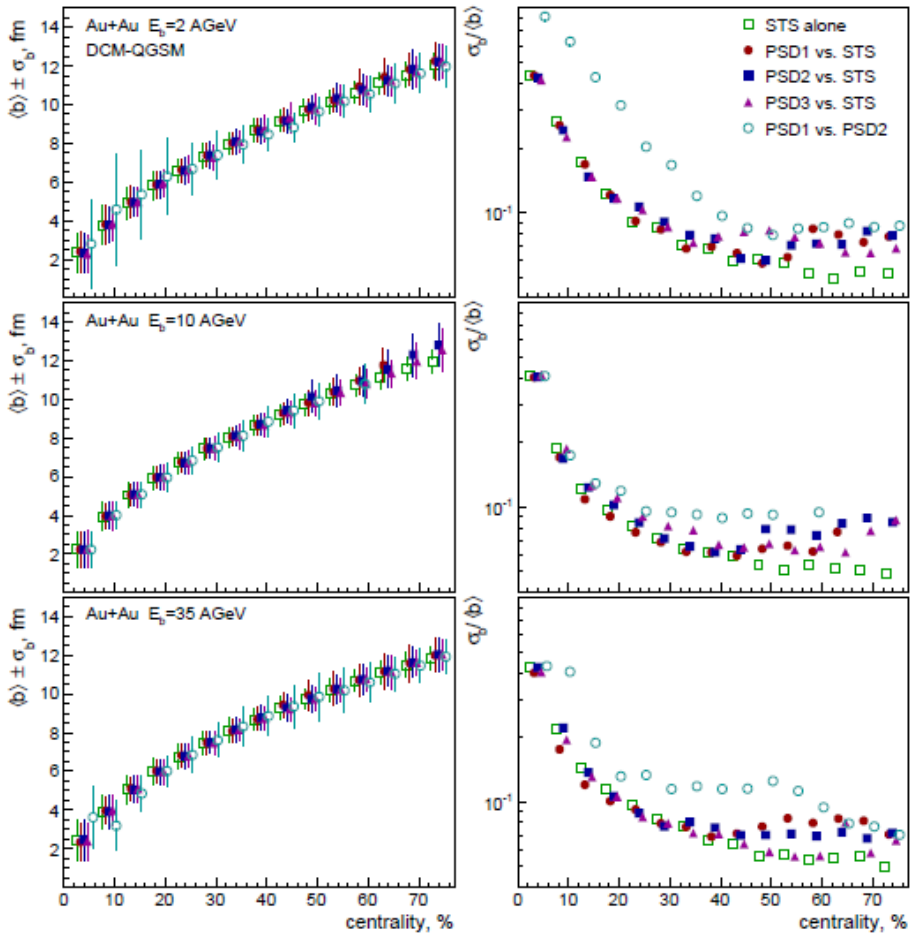


Рисунок 7 – Результаты моделирования определения центральности в CBM эксперименте с помощью измерения корреляций множественности заряженных частиц в STS и измеренной энергией в подсобытиях спектаторов (1, 2, 3 – показаны на центральном Рисунок 2) в PSD, а также с помощью комбинаций подсобытий только в адронном калориметре PSD. На левой панели показана полученная зависимость среднего значения прицельного параметра <b> и его ошибки σ_b, определенной из распределений по прицельному параметру в зависимости от классов по центральности взаимодействия, определенных различными комбинациями детекторов. На правой панели показана зависимость разрешения по прицельному параметру в зависимости от центральности взаимодействия. Результаты представлены для энергий E_b = 2 АГэВ (верхние панели), 10 АГэВ (средние панели), и 35 АГэВ (нижние панели).для расстояний PSD от мишени 8 (15) м при E_b = 2 и 10 (35) АГэВ, соответственно.

Проведенное моделирование показало, что разрешение калориметра по углу плоскости реакции варьируется в диапазоне 30 - 40 градусов в зависимости от расстояния

калориметра от мишени и энергии столкновения. С вновь предложенной, вытянутой вдоль оси X геометрией расположения модулей калориметра, и с учетом коррекции азимутальной неравномерности, разрешение PSD по углу плоскости реакции практически не зависит от напряженности магнитного поля магнита CBM (Рисунок 8).

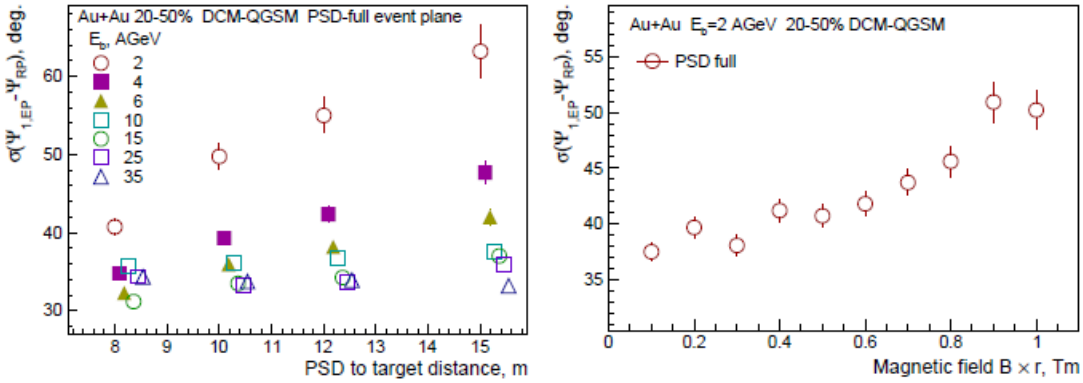


Рисунок 8 – Разрешение по углу плоскости реакции для полуцентральных (20-50%) столкновений ядер Au + Au. Слева показаны результаты для энергий налетающих ядер E_b = 2, 4, 6, 10, 15, 25, 35 и АГэВ в зависимости от расстояния калориметра от мишени в диапазоне 8 и 15 м. Для лучшей видимости, точки слегка сдвинуты по горизонтали. На правом рисунке показан эффект магнитного поля на разрешение по углу плоскости реакции при энергии пучка E_b = 2 АГэВ. При этой энергии PSD расположен в 8 м от мишени.

Полученные результаты показали также, что разрешение по углу плоскости реакции, определенного с помощью PSD существенно лучше, чем разрешение по углу плоскости реакции, определенное с помощью STS, либо TOF - альтернативной установкой для идентификации заряженных частиц по времени пролета в той же передней области, что и PSD (Рисунок 9).

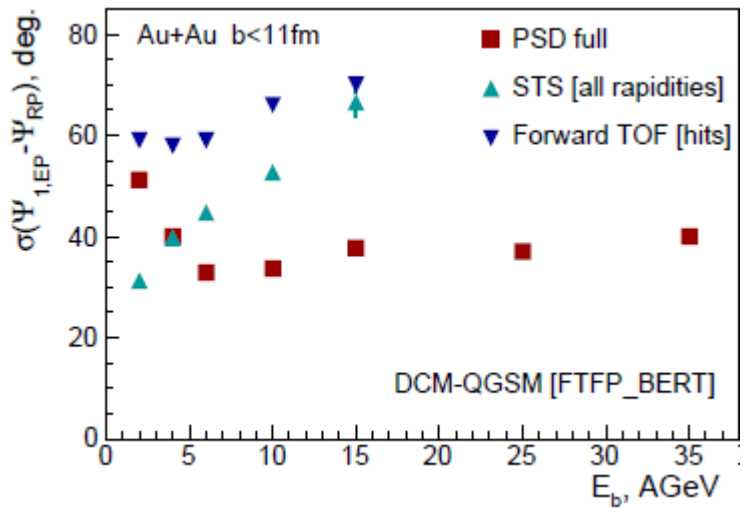


Рисунок 9 - Разрешение по углу плоскости реакции в зависимости от энергии налетающего ядра в реакции Au+Au для прицельного параметра b < 11 fm, полученное для PSD, STS, переднего TOF. Результаты моделирования получены с генератором событий DCM-QGSM и физическим листом FTFP_BERT в GEANT4

Были получены коэффициенты для эллиптического потока v_2, используя UrQMD как генератор событий для протонов в Au + Au столкновениях при E_b =10 АГэВ и используя только информацию по реконструкции событий с других детекторных систем CBM установки. Основываясь на этих результатах, была сделана оценка возможности измерения с помощью PSD потоков других частиц, таких как странные и мультистранные гипероны Λ и

Ω^-, что является частью физической программы измерений на установке CBM. Согласно этим оценкам, при использовании калориметра для измерения угла плоскости реакции, эллиптический поток v_2, для Λ и протонов может быть измерен с точностью лучше 1% в области поперечных масс p_T = 0.5 – 2 ГэВ/с в течение нескольких месяцев набора статистики при скорости реакции 100 kHz (Рисунок 10).

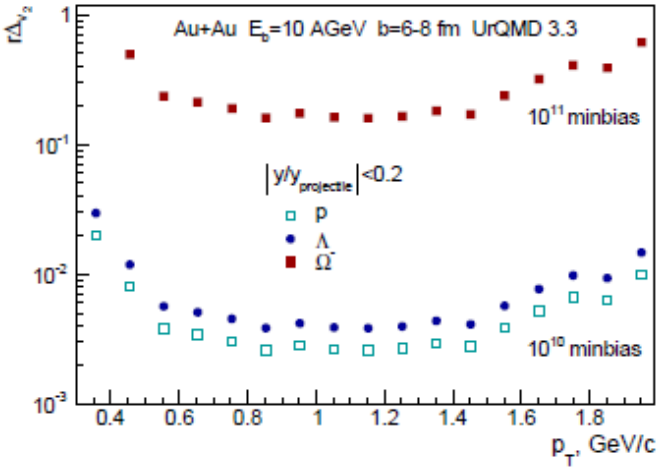


Рисунок 10 – Относительная статистическая ошибка для эллиптических v_2 потоков протонов, Λ и Ω^- для полуцентральных (b = 6 - 8 fm) столкновений Au+Au (для 10^{10} (протоны, Λ) и 10^{11} (Ω^-) minimum bias столкновений Au+Au).

4.4 Список цитируемой литературы

[1] B. Friman et al., The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments, Lect.Notes Phys. 814, 1 (2011), doi:10.1007/978-3-642-13293-3.

[2] CBM Collaboration, P. Senger and V. F. (Eds.), CBM Report 2013, http://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2014-Mar-16-1.pdf (2012).

[3] PSD TDR, https://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2014-Nov-59.html

4.4 Наиболее важные научные достижения группы ИЯИ РАН в эксперименте CBM в 2014 г.

В течение 2014г. проводилась работа по доработке технического проекта с учетом вопросов и замечаний, поступивших от экспертов. В сентябре 2014г поправленный технический проект был отправлен в ФАИР для его утверждения. Технический проект переднего адронного калориметра утвержден на заседании комитета ФАИР 25 ноября 2014г. Проведенное в 2014г. моделирование переднего адронного калориметра показало, что он обеспечивает наилучшую точность восстановления угла плоскости реакции по сравнению с другими детекторными системами CBM и обеспечивает необходимое энергетическое разрешение и линейность отклика калориметра при измерении энергии спектаторов.

В 2014 году опубликована статья в журнал «Приборы и техника эксперимента» по исследованию отклика модуля адронного калориметра PSD на пучке канала T10 в ЦЕРНе при импульсах налетающих протонов 2 – 6 ГэВ/с.

4.4 Список публикаций по тематике CBM с участием соавторов группы ИЯИ РАН за 2014г.

1. Экспериментальное исследование отклика модуля адронного калориметра при энергиях протонов и пионов 1-5 ГэВ, О. Андреева, М.Голубева, Ф.Губер, А.Ивашкин, А.Курепин, В.Марин, О.Петухов, А.Садовский, Приборы и техника эксперимента, 6 (2014), 5–12,

An experimental study of the hadron calorimeter module response to protons and pions with energies of 1-5 GeV M.B. Golubeva, F.F. Guber, A.P. Ivashkin, A.B. Kurepin, V.N. Marin, O.A. Petukhov, A.S. Sadovsky, Instrum.Exp.Tech. 57 (2014) 6, 651-657.
DOI: 10.1134/S0020441214060050

4.4 Список выступлений группы ИЯИ РАН на международных совещаниях и конференциях по тематике CBM

23rd CBM Collaboration meeting, 7-11 April 2014, GSI, Darmstadt
-Status of the PSD TDR, Fedor Guber
-Prototype of the PSD cooling system, Alexander Ivashkin
-J/psi simulations, Alla Maevskaya
-Status and Outlook PSD, Alexander Ivashkin

4.4 Статистическая информация по специалистам ИЯИ РАН, участвующим в эксперименте в 2014 г.

Число специалистов, участвующих в работах над проектом CBM 7
Число молодых специалистов, привлеченных в эти работы 1

Число студентов - участников экспериментов 1
Число публикаций в ведущих научных журналах: ПТЭ – 1 публ.

4.4 План участия группы ИЯИ РАН в эксперименте CBM на 2015 г.

- В 2015г. будет подготовлен и подписан контракт между ИЯИ РАН и ФАИР и начаты работы по размещению заказов на материалы и компоненты калориметра, по изготовлению и тестированию модулей переднего адронного калориметра в ИЯИ РАН.
- Планируется проведение исследование отклика модуля калориметра на пучках адронов с различными вариантами прототипов считывающей электроники и разработанной системой стабилизации температуры фотодетекторов.
- Будут продолжены работы по моделированию отклика калориметра с использованием транспортного кода GEANT4 в CBMRoot с учетом реальной геометрии ионопровода установки CBM, оптимизация определения центральности и угла плоскости реакции, продолжены работы по моделированию образования и детектирования J/psi в CBM.
- Планируется разработать методы калибровки продольно сегментированного адронного калориметра эксперимента CBM на космических мюонах.

4.5 Исследование коллективных эффектов и не нуклонных степеней свободы в ядрах, переходных процессов в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами.

Руководитель работ з.д.н. А.Б.Курепин.

Для испытаний прототипа калориметра ZDC на выведенном пучке был изготовлен модуль адронного калориметра. Ранее на пучке T10 в ЦЕРН были проведены исследования отклика модуля адронного калориметра с выполненным условием компенсации адронной и электромагнитной компоненты производства ИЯИ РАН при энергиях протонов и пионов 1 – 5 ГэВ. Модуль перевезен в Дубну и будет испытан на пучке Нуклотрона в 2014 г.

Подготовлена зона в корпусе 25 на выведенном пучке Нуклотрона Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ в Дубне для проведения совместных испытаний модулей адронного калориметра ZDC, изготовленного в ИЯИ РАН, предназначенного для сооружаемой установки MPD на коллайдере NICA.

На внутреннем пучке Нуклотрона проведены два сеанса измерений по исследованию аномальной зависимости от энергии выхода пи-мезонов с использованием пробежного телескопа.

Завершена обработка данных, полученных в двух сеансах измерений на внутреннем пучке Нуклотрона по исследованию аномальной зависимости от энергии выхода пи-мезонов с использованием пробежного телескопа. В результате анализа данных по времени пролета и по потерям энергии получена идентификация пионов и протонов. Измерено отношение выходов пионов к протонам (Рисунок 1)

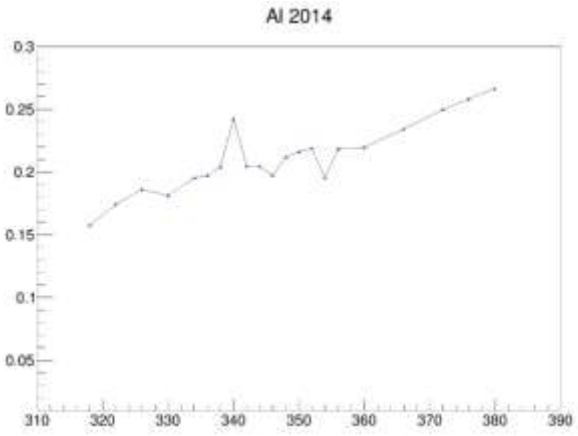


Рисунок 1 – Отношение выходов пионов к протонам в зависимости от энергии дейтронов на один нуклон для мишени Al.

Публикация:

Экспериментальное исследование отклика модуля адронного калориметра при энергиях протонов и пионов 1-5 ГэВ. О. Андреева, М.Голубева, Ф.Губер, А.Ивашкин, А.Курепин, В.Марин, О.Петухов, А.Садовский, Принята в печать в журнале «Приборы и техника эксперимента»

5 Лаборатория радиоизотопного комплекса

Руководитель работ д.х.н. Б.Л.Жуйков.

Физика атомного ядра, динамика ядерных и фотоядерных реакций, физика радионуклидов и тяжёлых ионов.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Развитие ядерных технологий на протонных пучках Московской мезонной фабрики.

Исследование методов и разработка технологии получения медицинских изотопов на сильноточных протонных пучках.

Ответственные исполнители:

Научный сотрудник Коханюк В.М. (раздел 1,2)

Старший научный сотрудник к.т.н. Ермолаев С.В. (раздел 1,3)

Научный сотрудник к.х.н. Чудаков В.М. (раздел 2)

Исполнители:

Главный инженер установки Габриелянц Ю.Г. (раздел 1)

Научный сотрудник Скасырская А.К. (раздел 1)

Научный сотрудник к.х.н. Лапшина Е.В. (раздел 3)

5 РЕФЕРАТ

РАДИОИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получены следующие основные результаты:

1. Исследованы режимы облучения рубидиевых мишеней при высоких токах протонного пучка.
2. Исследованы различные характеристики генератора рубидия-82, изготовляемого на основе стронция-82 в РНЦ РХТ (С-Петербург) и ARRONAX GIP (Франция) с целью ПЭТ-диагностики кардиологических и онкологических заболеваний в России и Европе.
3. Проведены работы ИЯИ РАН совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова по получению актиния-225 и радия-223 из мишени металлического тория, облученной протонами средних энергий.

5 Введение

Получение медицинских изотопов на ускорителях для диагностики и терапии различных заболеваний имеет большое научное, технологическое и социальное значение. Линейный ускоритель ИЯИ РАН является единственной установкой в Европе и Азии такого класса. На нем можно получать в больших количествах ряд важнейших медицинских радионуклидов, в частности, стронций-82 (используемый при изготовлении генераторов рубидия-82 для диагностики с помощью позитронно-эмиссионной томографии) и актиний-225 (используемый при изготовлении генераторов висмута-213 для терапии онкологических заболеваний). Данные исследования направлены на развитие и улучшение существующих технологий получения стронция-82 и разработке новых технологий получения актиния-225, а также важного побочного продукта – радия-223. Также в данных исследованиях разрабатываются, изучаются и совершенствуются генераторы $^{82}Sr/^{82}Rb$, $^{225}Ac/^{213}Bi$ и $^{223}Ra/^{211}Pb$.

5.1 Изучение процесса по прямому извлечению стронция-82 методом сорбции из жидкого рубидия из мишеней, облучённых протонами средних энергий

5.1.1 Изучение процесса наработки стронция-82 на ускорителе ИЯИ РАН

Проведено облучение 8 рубидиевых мишеней током высокой интенсивности. При этом параметры облучения меняли с целью определения зависимости выхода стронция-82 от значения этих параметров. Мишени были направлены на радиохимическую переработку в ЛАНЛ, где определялся выход в каждой мишени, а также потери при химической переработке. Потери зависят от параметров облучения, так как в определенных случаях стронций необратимо сорбируется на внутренней поверхности оболочки и не может быть извлечен.

В результате проведенных исследований установлено, что в определенных пределах смещение пучка по оси Y не оказывает систематического влияния на выход. Смещение же центра пучка по оси X сильно влияет на выход (см. рисунок 1.1.1), что объясняется рассеянием пучка при имеющейся сложной конфигурации мишени. Как видно из рисунка 1.1.1, выход увеличивается вплоть до значения смещения 2,2 мм. При значительно большем смещении – 4 мм (не показано на рисунке), выход снова резко падает. Эффективность зависит также от ширины пучка и условий его сканирования. Показано, что с новой системой быстрого сканирования пучка увеличение его интенсивности по крайней

мере до 120 мкА не приводит к снижению выхода радиоизотопного продукта – стронция-82.

Зависимость химического выхода при выделении стронция от параметров облучения требует дополнительного изучения.

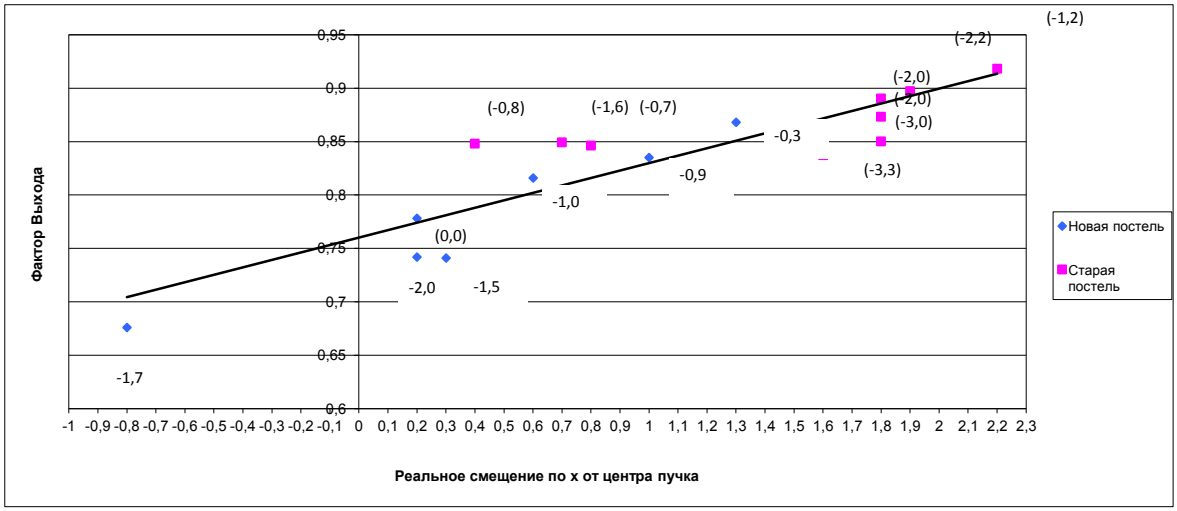


Рисунок 1.1.1 - Зависимость выхода стронция-82 (относительные единицы) от смещения центра пучка от центра по оси X (мм) при облучении косой мишени из металлического рубидия в разных держателях (постелях). В скобках – смещение по оси Y (мм).

5.1.2 Моделирование параметров облучения рубидиевых мишеней

5.1.2.1 Оценка долей протонов, поглощенных в мишени, и протонов, вылетающих из мишени с энергией менее 35 МэВ

Конструкция постели мишенной камеры на установке получения радионуклидов ИЯИ РАН позволяет варьировать расстояние от входного окна ускорителя до мишени. При этом изменяется толщина слоя охлаждающей воды и, как следствие, энергия протонов, приходящих на мишень. В настоящее время средняя входная энергия протонов для Rb мишени составляет 89 МэВ, а выходная – 26 МэВ. Метод, учитывающий пространственное и энергетическое рассеяние протонов (на базе ядерного кода STRAGL) и нагрев мишени (на базе программного комплекса ANSYS) был использован для оценки долей протонов, поглощенных в Rb мишени, и протонов, вылетающих из мишени с энергией менее 35 МэВ (энергия, ниже которой вероятность образования ^{82}Sr равна нулю). Топографические изображения указанных долей представлены на Рисунке 5.2.1.1.

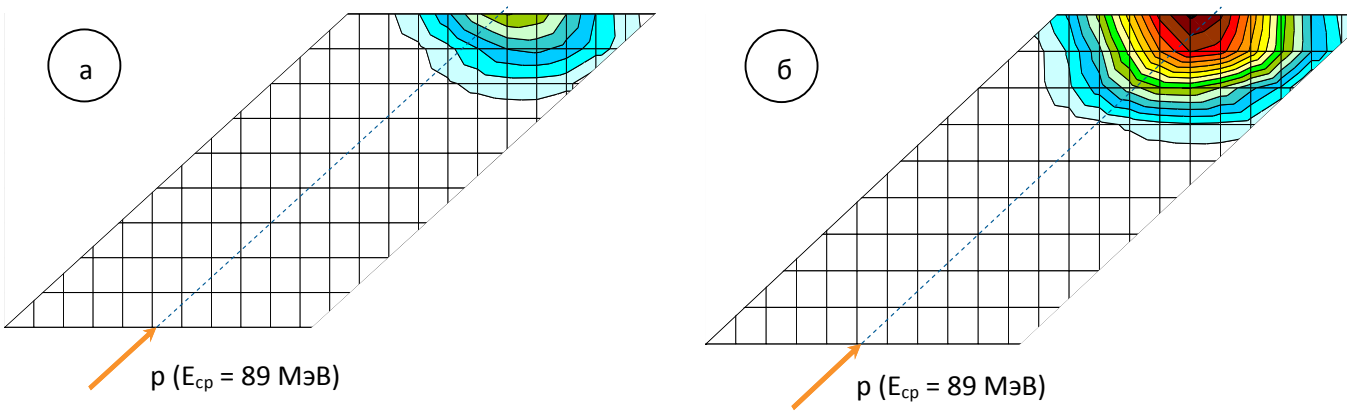


Рисунок 5.2.1.1 - Топографические изображения: а – долей протонов, поглощенных в Rb мишени; б – протонов, вылетающих из мишени с энергией менее 35 МэВ. Показан горизонтальный разрез полости Rb мишени по оси пучка.

Согласно расчетам, общая доля протонов, поглощенных в Rb мишени, доходит до 16%. Среди протонов, вылетающих из Rb мишени, 64% имеют энергию ниже 35 МэВ. Потеря выхода ^{82}Sr, связанная с вылетом из мишени протонов с энергией выше 35 МэВ, не превышает нескольких долей процента.

5.1.2.2 Влияние горизонтального сдвига пучка на потери протонов и на выход стронция-82

Поскольку часть пучка протонов вследствие рассеяния вылетает за боковую поверхность Rb мишени, было проведено компьютерное моделирование таких потерь. Для этого весь рубидий в мишени условно разделили на слои и проследили динамику вылета протонов боковую (торцевую) поверхность каждого слоя. Расчеты показывают (Рисунок 5.2.2.1), что ареал потерь нарастает сначала с правой стороны, а потом с левой (ось пучка и центр входного окна мишени совпадают).

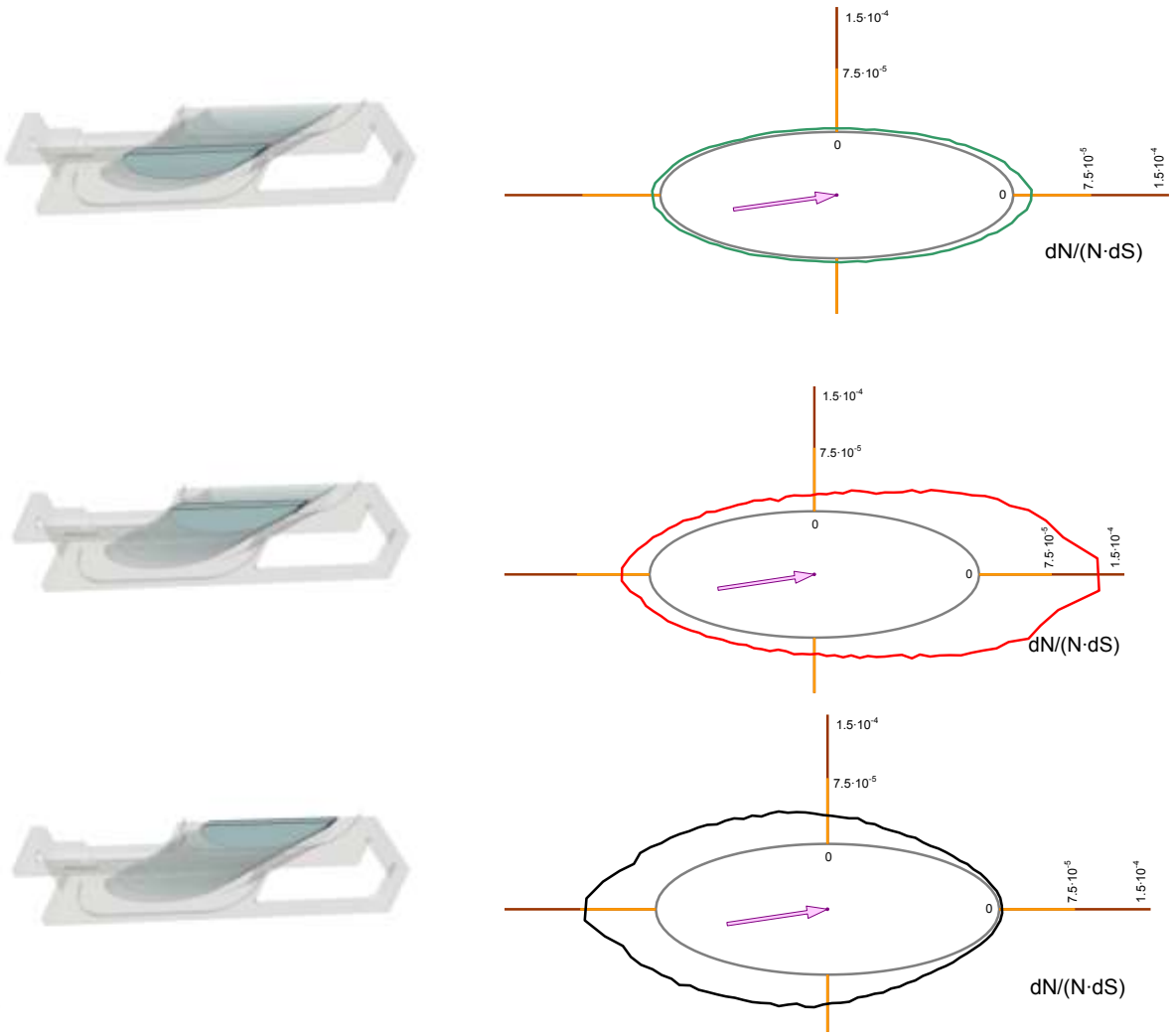


Рисунок 5.2.2.1 - Динамика вылета протонов через боковую поверхность рубидиевой мишени.

Такое несимметричное поведение боковых потерь пучка связано с угловой геометрией облучения мишени.

Проведен анализ зависимости боковых потерь пучка и выхода ^{82}Sr от сдвига пучка по горизонтальной оси (оси X) (Рисунок 5.2.2.2).

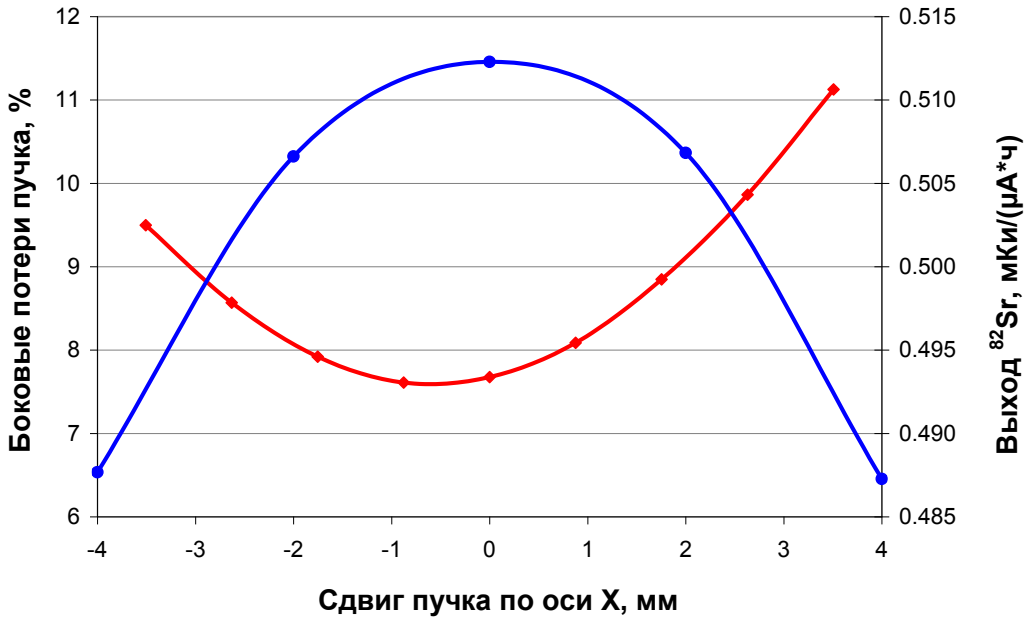


Рисунок 5.2.2.2 - Влияние сдвига пучка по оси X на боковые потери пучка и выход ^{82}Sr.

Согласно расчетам, минимум боковых потерь соответствует сдвигу пучка влево на ~1 мм. В то же время максимум выхода ^{82}Sr соответствует пучку, бьющему в центр окна мишени.

5.1.3 Развитие метода on-line получения стронция-82

5.1.3.1 Расчет влияния скорости потока циркулирующего рубидия на максимальную температуру в облучаемой мишени

Для проектируемой установки с рубидием, циркулирующим во время облучения по замкнутому контуру (Рисунок 1.3.1.1), был проведен анализ влияния скорости потока рубидия на температурные поля, возникающие в облучаемой мишени (Рисунок 1.3.1.2).

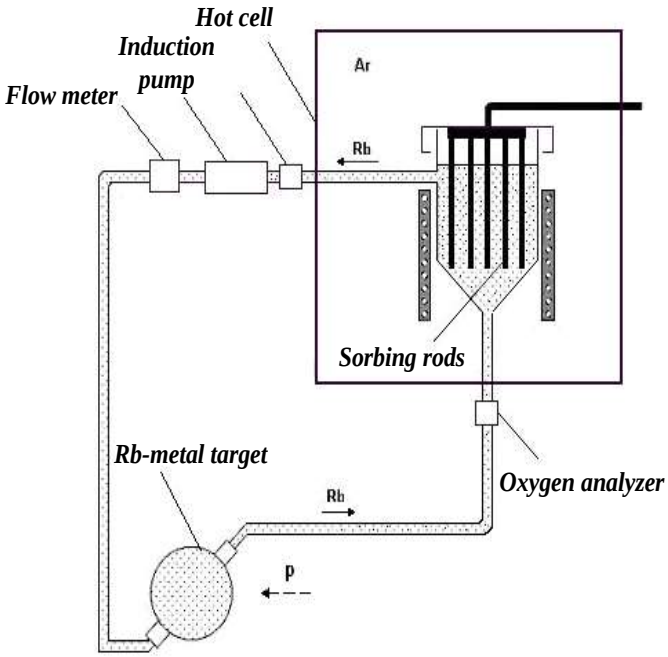
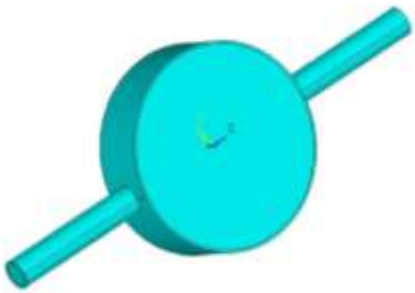


Рисунок 5.3.1.1- Схема циркулирующей Rb мишени.

Рубидиевая мишень



внутренний диаметр мишени 80 мм
толщина мишени (Rb) 25 мм
диаметр подводящей трубки 10 мм

Рисунок 5.3.1.2 - Геометрия Rb мишени.

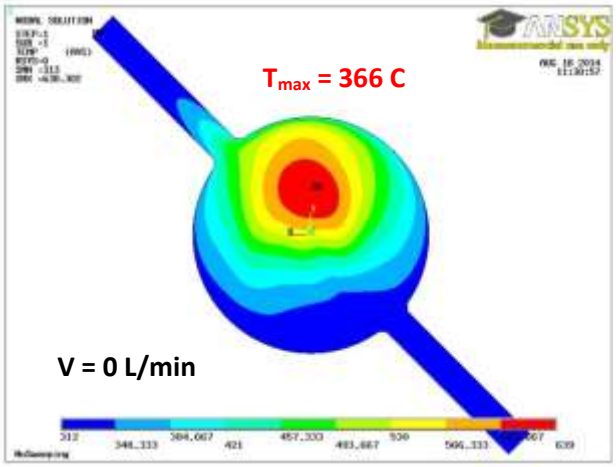
Исходные данные: начальная энергия протонов 70 МэВ, ток 500 μА, форма пучка – Гауссова. Центр пучка совпадает с центром мишени. Для расчетов без вращения пучка: σ = 1.2 см; с вращением пучка: σ 0.4 см, радиус вращения 2.9 см. Расчёт проводили для следующей конфигурации: трубка входит и выходит из мишени под углом 45°, направление потока Rb – сверху вниз.

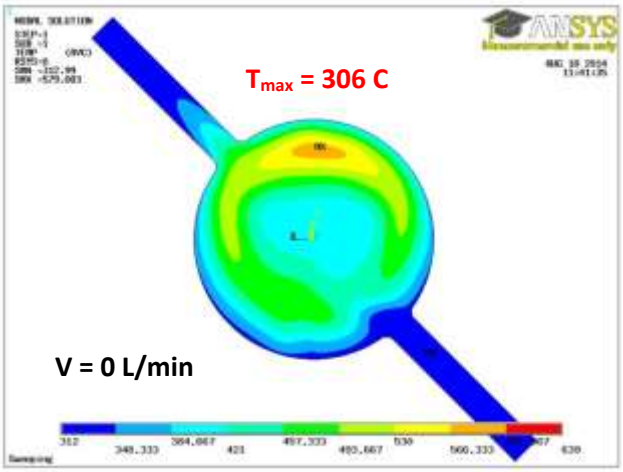
Облучаемая сборка:

N слоя	материал	Толщина, см	Выходная энергия, МэВ
1	Fe	0.01	69.5
2	Li	0.2	68.6
3	Fe	0.01	68.1
4	Water	0.4	64.0
5	Fe	0.015	63.2
6	Liquid Rb	2.5	35.5
7	Fe	0.015	34.2
8	Water	1.4	Beam Stop

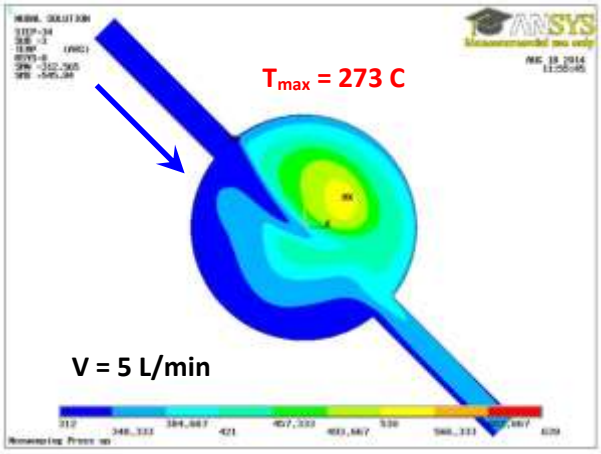
Результаты расчета представлены на Рисунке 1.3.1.3.

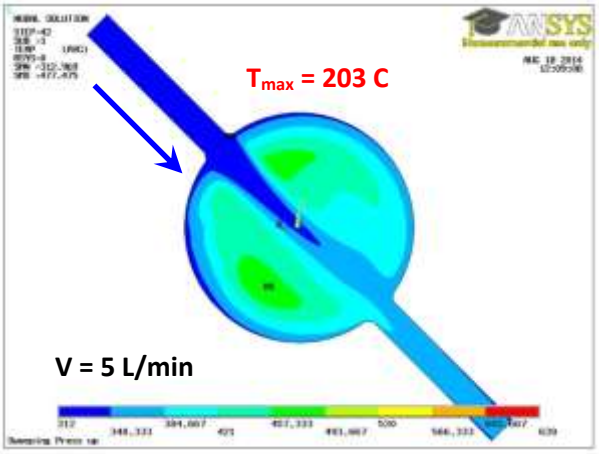
Без вращения пучка С вращением пучка



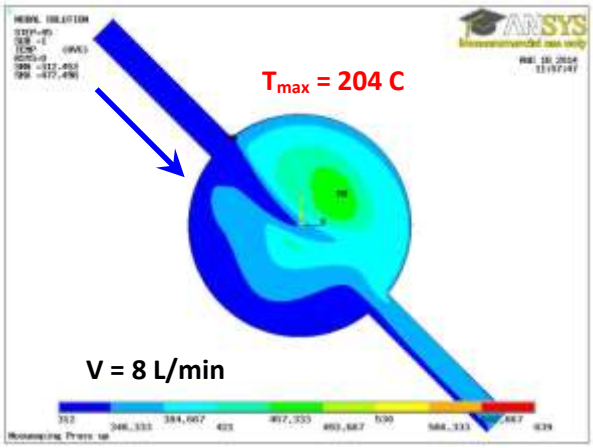


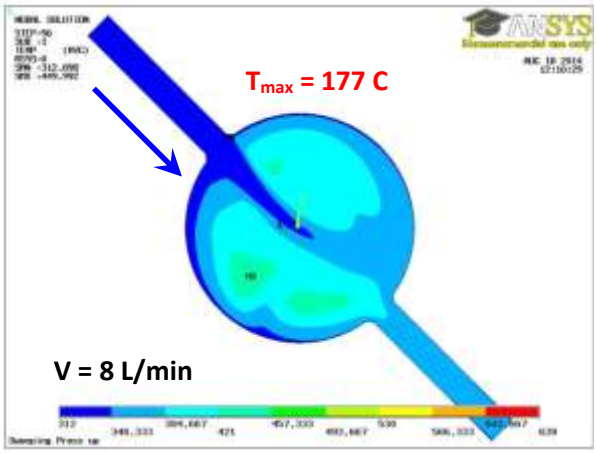
Без потока рубидия в петле





Поток рубидия 5 л/мин





Поток рубидия 8 л/мин

Рисунок 5.3.1.3 - Профили температур, возникающих в облучаемой Rb мишени в зависимости от скорости потока Rb и вращения пучка протонов (Плоскость сечения

мишени перпендикулярна пучку и проходит через точку близкую к максимальной температуре).

С увеличением скорости потока циркулирующего рубидия максимальная температура в мишени существенно снижается: с 366 до 204°С при облучении без вращения пучка, и с 306 до 177°С при облучении с вращением пучка, соответственно.

Рассчитанные максимальные температуры сопоставимы и даже ниже аналогичных температур в Rb мишени, облучаемой в ИЯИ РАН в настоящее время, а также в Rb мишенях других производителей ^{82}Sr (Таблица 1.3.1.1).

Таблица 5.3.1.1 - Сравнение максимальных температур (°С), возникающих при облучении Rb мишеней различных типов.

Новая мишень ИЯИ РАН		Старая мишень ИЯИ РАН	Мишень ARRONAX	Мишень LANL(*)
Без циркуляции, без вращения пучка	С циркуляцией рубидия (8 л/мин, 45°, сверху вниз), с вращением пучка			
(70 МэВ, 500 μА)		(143 МэВ, 100 μА)	(70 МэВ, 150 μА)	(100 МэВ, 250 μА)
370	180	420	470	380

(*) - John S. Carty. Strontium 82 Production at U.S. Department of Energy. U.S. Department of Energy, CARRI Conference, August 23, 2006.

5.1.3.2 Разработка и испытание экспериментальной установки с циркулирующим рубидием

С целью отработки режимов функционирования проектируемой установки с рубидием, циркулирующим во время облучения по замкнутому контуру, была собрана лабораторная установка (Рисунок 5.3.2.1).

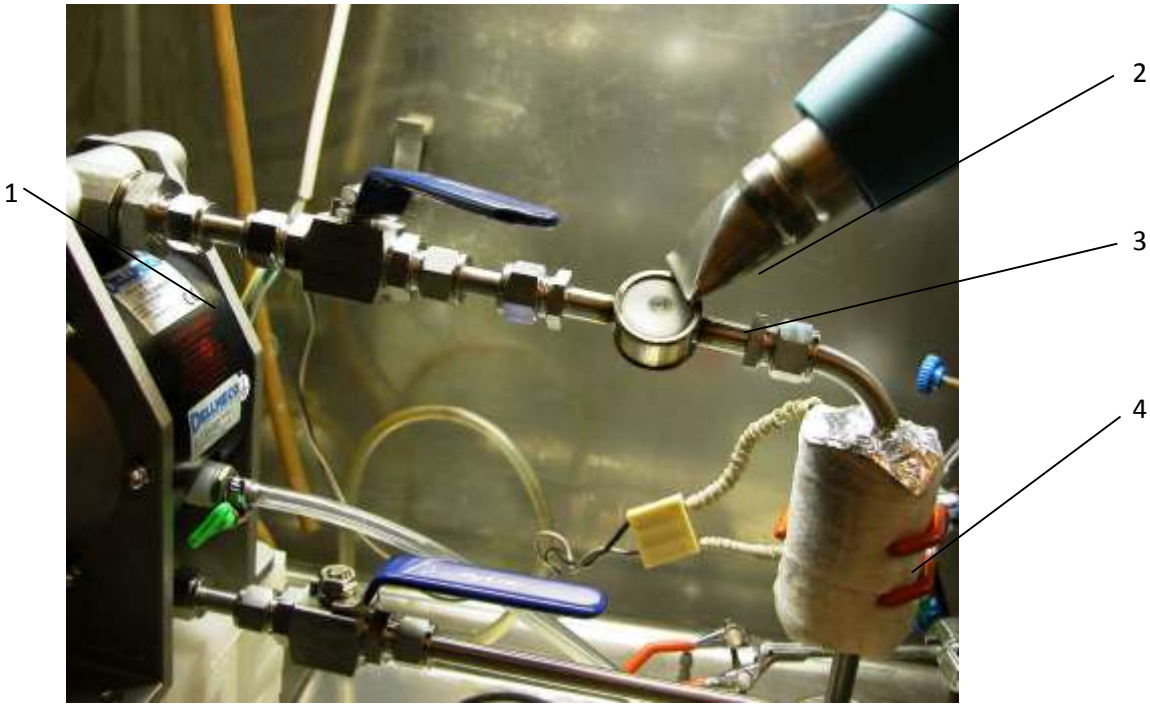


Рисунок 5.3.2.1 - Лабораторная установка с металлическим рубидием, циркулирующим по замкнутому контуру. Обозначения: 1 – мембранный насос; 2 – нагреватель; 3 – мишень; 4 – высокотемпературная ловушка для ^{82}Sr

Были испытаны:

- режимы заполнения установки металлическим рубидием, затем – опорожнения;
- различные скорости прокачивания рубидия;
- стойкость материалов установки к металлическому рубидию;
- процедура нейтрализации рубидия после окончания эксперимента.

5.1.4 Внедрение технологии получения стронция-82 на научно-производственном предприятии ARRONAX (Франция)

В рамках Соглашения о научном сотрудничестве между ИЯИ РАН и ARRONAX GIP были проведены работы по усовершенствованию оборудования для выделения ^{82}Sr в горячих камерах ARRONAX по технологии ИЯИ РАН. Были изготовлены новый бокс с инертной атмосферой (Рисунок 5.4.1а) и новая, более компактная панель управления потоками газов (Рис. 5.4.1б)

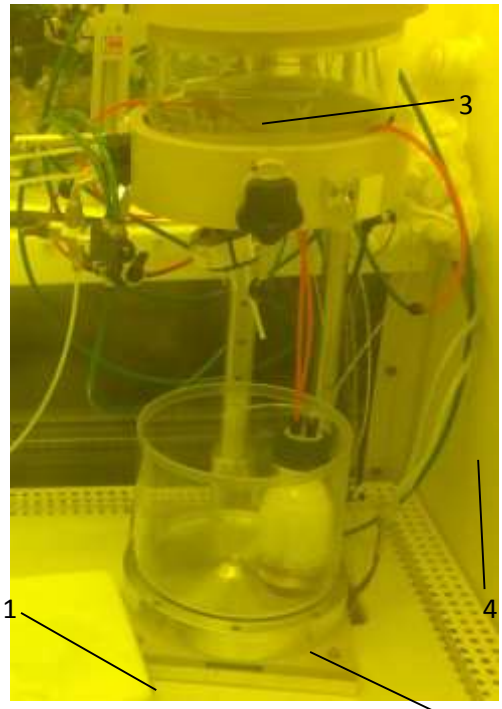


Рисунок 5.4.1а- - Бокс с инертной атмосферой
Обозначения: 1 – электроплитка;
2 – нейтрализатор металлического Rb;
3 – механизм перемещения Rb мишени;
4 – линии подачи и отведения жидкостей и газов.

Рисунок 5.4.1б- - Панель управления потоками газов

Основной особенностью нового бокса с инертной атмосферой является пневматический привод, с помощью которого перемещается крышка и средняя часть бокса. Это позволяет оптимизировать работу в ограниченном пространстве горячей камеры.

Для испытания технологии выделения ^{82}Sr была облучена рубидиевая мишень (ток протонов 150 μA, суммарный заряд протонов 589 μA·ч). При переработке мишени были обнаружены и зафиксированы достоинства и недостатки нового оборудования. Было выделено около 180 мКи ^{82}Sr на EOB, что совпадает с расчетным значением. В настоящее время проводятся работы по очистке ^{82}Sr с целью получения препарата, соответствующего АФИ, для последующей зарядки Sr/Rb-82 генератора.

5.2 Усовершенствование конструкции и методики изготовления медицинского генератора стронций/рубидий-82 для позитронно-эмиссионной томографии

5.2.1 Модернизация установки POSIJET для их совместного применения при позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ)

С целью повышения точности введения в пациента диагностической активности рубидия-82, эффективности и качества результатов диагностики методом позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) с использованием медицинского генератора Sr/Rb-82 изучена возможность применения автономной автоматизированной системы для введения медицинских радиоизотопов POSIJET (LEMER PAX, Франция) в качестве инфузора. Было установлено, что существующая в настоящее время установка может использоваться с разработанным в ИЯИ РАН генератором рубидия-82 ГР-01 только для введения радиодиагностического препарата (РФП) при скоростях элюирования не выше 30 мл/мин (при клинических потребностях до 100 мл/мин). Показано, что конструкция установки обеспечивает радиационную безопасность оператора и пациента только на этапе подготовки к проведению диагностических исследований (мощность экспозиционной дозы на расстоянии 5 см от любого участка поверхности установки не превышает 2.5 мР/ч при максимальной активности стронция-82 в генераторе 5920 МБк (160 мКи)). При проведении диагностического исследования радиационная обстановка ухудшается из-за появления в подводящем к пациенту пластиковом удлинителе рубидия-82. Установлено, что в зависимости от активности в генераторе стронция-82 (и находящегося с ним в равновесии рубидия-82) активность рубидия-82 в пластиковом удлинителе достигает 2 ГБк (54 мКи) на момент окончания элюирования РФП. При этом на расстоянии 50 см от удлинителя (расстояние до пациента) мощность экспозиционной дозы составляет 70-100 мР/ч (в зависимости от расположения удлинителя относительно пациента). В ходе клинических испытаний элюата из генератора рубидия-82 (РНЦ РХТ, г. Санкт-Петербург, РФ, апрель-июнь 2014 г.) показано, что при этом искажается начальный участок получаемых ПЭТ-грамм, в результате чего снижается качество получаемых результатов. Поэтому для решения проблемы создания эффективной инжекционной системы необходимо, в частности, дополнить конструкцию системы дополнительной биологической защитой. Рассчитаны параметры биологической защиты различных участков установки POSIJET (место локализации генератора рубидия-82 и пластиковый удлинитель). Расчет защиты проводился на основании как требований радиационной безопасности медперсонала и пациента, так и условия надежности работы ПЭТ-сканера (суммарная мощность

экспозиционной дозы на датчиках ПЭТ-сканера от всех источников гамма-излучения за исключением пациента с введенным РФП должна быть не более 0.1 мР/ч). Рассчитана толщина вольфрамовой биологической защиты. Толщина слоя дополнительной защиты для генератора ГР-01 (ИЯИ РАН) и для подводящего пластикового удлинителя составляет 2.5 см.

Для увеличения диапазона скорости введения РФП в пациента предложено заменить входящий в состав POSIJET перистальтический насос на более мощный аналогичный насос или на применяющиеся в медицине насосы для внутривенного введения контрастных веществ.

5.2.2 Усовершенствование конструкции защитного контейнера для медицинского генератора стронций/рубидий-82

В рамках заключенного договора с ARRONAX (Нант, Франция) и фирмой Lemer PAX (Франция) продолжаются совместные работы по отработке методики изготовления генератора рубидия-82 и оптимизации конструкции защитного контейнера для генератора. Внесены изменения в конструкцию защитного контейнера (разработчик Lemer PAX, Франция). Устранены выявленные ранее конструктивные недостатки. Конструктивной особенностью оптимизированного защитного контейнера является, во-первых, меньшая толщина слоя биологической защиты, а, во-вторых, различное положение генераторной колонки с активностью в режиме транспортировки или клинического применения. Рассчитана мощность экспозиционной дозы на поверхности защитного контейнера генератора в обоих режимах. Рассчитана толщина слоя дополнительной защиты для генератора (вольфрам и свинец) для режима клинического применения. Установлено, что она составляет 4.0 см и 5.5 см для вольфрама и свинца соответственно.

Запланировано изготовление генератора с активностью стронция-82 925 МБк (25 мКи).

5.2.3 Расчет радиационного воздействия от генератора

Рассчитано радиационное воздействие от генератора, которое может препятствовать нормальной работе ПЭТ-сканера (см. Таблицу 2.3.1). Эти данные должны учитываться при разработке инжекционной системы нового поколения.

Таблица 2.3.1 - Радиационное воздействие (мощность экспозиционной дозы γ-излучения) на датчики ПЭТ-сканера. Материал биологической защиты – сплав на основе вольфрама

Источник	Активность, мКи		R, см	Мощность экспозиционной дозы, мР/ч						
	^{82}Sr (^{82}Rb)	^{85}Sr		Основная защита (d0), см	Дополнительная защита (dA), см					
					0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
Генератор	160	240	50	1.5	44	2.6			0.3	0.08
			100	1.5	11					
Пластиковый удлинитель (параллельно телу пациента)	54	-	50	0	70	0.9	0.3	0.1		
			130	0	10 - 17	0.3				
Пластиковый удлинитель (перпендикулярно телу пациента)	54	-	25	0	100 -					
			90	0	19					
			110	0	14					
Пациент				0						

Примечания. d0 – толщина основной биологической защиты, см; dA – толщина дополнительной биологической защиты, см; R – расстояние от источника γ-излучения до датчика детектора

5.2.3 Изучение проскока стронция в генераторе

Совместно с РНЦ РХТ изучен проскок радиоизотопов стронция. Продукт, полученный при переработке мишени ИЯИ РАН в ЛАНЛ (США) имел высокое качество и, в частности высокую удельную активность. В результате показано, что при таких условиях генератор может эксплуатироваться в течении времени до 78 дн., а объем пропущенного раствора до проскока стронция выше допустимого уровня может достигать 30 л (см. Таблицу 2).

Таблица 2.3.2 - Проскок Sr-82 ($T_{1/2}$ = 25.55 дн.) и Sr-85 ($T_{1/2}$ =64.90 дн.) в генераторе ГР-01 №13, испытанном в июне 2014 г. (активность генератора, заряженного 11.12.2013, составляла: Sr-82 – 5.9 ГБк (160 мКи); Sr-85 – 6.0 ГБк).

Дата	Общий период использо-вания	Активность в генераторе, ГБк		Объем пропущенного элюата, мл	Проскок, кБк/МБк Rb-82	
		Sr-82	Sr-85		Sr-82	Sr-85
В течение клинических испытаний						
12.12.2013	1	5.742	5.946	515	0.00008	0.00008
26.12.2013	15	3.929	5.119	813	0.00077	0.001
26.12.2013	15	3.929	5.119	823.4	0.00033	0.00042
13.01.2014	33	2.412	4.222	868	0.0012	0.0021
14.01.2014	34	2.348	4.177	952	0.00021	0.00038
17.01.2014	37	2.164	4.045	1057	0.00033	0.00062
17.01.2014	37	2.164	4.045	1144	0.00025	0.00046
31.03.2014	73	0.816	2.752	4715	0.00003	0.00018
02.04.2014	75	0.773	2.694	6030	0.00012	0.00074
04.04.2014	77	0.732	2.637	7745	0.00002	0.00012
Лабораторные испытания после завершения клинических испытаний						
09.04.2014	82	0.639	2.499	10360	0.00009	0.00064
16.04.2014	89	0.529	2.319	14475	0.00011	0.00086
18.04.2014	91	0.501	2.270	16091	0.00013	0.0011
23.04.2014	96	0.438	2.152	17721	0.00004	0.00036
28.04.2014	101	0.382	2.040	20036	0.00011	0.0011
08.05.2014	111	0.291	1.833	22051	0.00009	0.0010
19.05.2014	122	0.216	1.629	25081	0.00024	0.0034
27.05.2014	130	0.174	1.495	27406	0.0013	0.021
30.05.2014	133	0.161	1.448	28721	0.0017	0.028
11.06.2014	144	0.119	1.287	30036	0.0017	0.035
18.06.2014	151	0.099	1.194	32051	0.0056	0.126
20.06.2014	153	0.093	1.169	33066	0.0093	0.22
Требования к американ-скому генератору CARDIOGEN	<42	Приемлемо при каждодневной проверке проскока		< 17000	< 0.002	< 0.02
	<42	Приемлемо при проверке проскока 2 раза в день		< 17000	< 0.01	< 0.10

5.3 Разработка технологии получения актиния-225 и радия-223 для терапии онкологических заболеваний

Были облучены две экспериментальные ториевые мишени: 17-18.02.2014 и 08-09.11.2014. В соответствии с договором, заключенным между ИЯИ РАН и кафедрой радиохимии МГУ им. Ломоносова (№ 1-2013 от 01.02.2013), облученные мишени были переданы в МГУ для проведения работ по дальнейшему развитию технологии выделения актиния-225 и радия-223 из облученного тория.

5.3.1 Разработка технологии изготовления ториевой мишени в металлической оболочке

Совместно с НИИ НПО "Луч" проводятся работы по изготовлению мишени из металлического тория в металлической оболочке для наработки производственных количеств актиния-225 и радия-223. В качестве материала оболочки испытываются ниобий и молибден, электролитически покрытый никелем. Согласно теплофизическим расчетам, током протонов 110-120 μA можно безопасно облучать ториевую мишень толщиной не менее 4-5 мм. При этом возможно проводить одновременное облучение ториевой и рубидиевой мишеней (Таблица 3.1.1).

Таблица 3.1.1 - Энергии протонов при одновременном облучении ториевой и рубидиевой мишеней.

Облучаемый объект	Материал	Ториевая мишень + рубидиевая мишень старой конструкции		Ториевая мишень + рубидиевая мишень новой конструкции	
		Толщина слоя, мм	Входная энергия протонов, МэВ	Толщина слоя, мм	Входная энергия протонов, МэВ
Входное окно	Fe	0.1	158.5	0.1	158.5
	Li	2	157.8	2	157.8
	Fe	0.1	156.8	0.1	156.8
Охлаждающая вода		10	156.1	10	156.1
Ториевая мишень	Nb	0.1	143.5	0.1	143.5
	Th	4	142.8	5	142.8
	Nb	0.1	112.9	0.1	104.5
Охлаждающая вода		10	112.1	10	103.7
Рубидиевая мишень	Fe	0.3	95.7	0.3	86.2
	Rb (жидкий)	30.3	92.9	23.4	83.1
	Fe	0.3	22.0	0.3	26.8
Охлаждающая вода		10	11.3	10	18.3

Исследуются различные варианты плотного соединения ториевой пластины с металлическими фольгами входного и выходного окон оболочки, такие как диффузионная сварка и холодный или горячий прокат.

5.3.2 Разработка методик отделения облученного тория от металлической оболочки

Совместно с кафедрой радиохимии МГУ им. Ломоносова были изучены варианты вскрытия ториевой мишени как в случае оболочки, изготовленной из молибдена, электролитически покрытого никелем, так и в случае ниобиевой оболочки.

В первом случае, слой никеля растворяли в 1-2 М HNO_3, затем молибденовую фольгу толщиной 100 μm, имитирующую окно мишени, растворяли в 5-7 М NaOH в течение нескольких часов, добавляя по каплям 30% H_2O_2. Образец металлического тория не взаимодействовал с раствором щелочи, что подтверждено ИСП-АЭС анализом проб. Далее торий растворяли по обычной методике в концентрированной HNO_3 с добавлением каталитических количеств HF.

Во втором случае, не наблюдали растворения ниобиевой фольги толщиной 100 μm в 9-10 М NaOH при кипячении. Ее (фольгу) удалось растворить в расплаве NaOH при температуре около 400°C. Также исследуются возможности электрохимического растворения ниобия в щелочных растворах. Другой подход к вскрытию мишени заключается в одновременном растворении ниобия и тория в концентрированной HNO_3 с добавлением каталитических количеств HF. После окончания растворения тория в растворе обнаружили 5-6% от исходного количества ниобия. Этот подход на данный момент не является приоритетным, так как приводит к наличию двух макрокомпонентов – Th и Nb, и как следствие, к усложнению методики выделения актиния-225 и радия-223.

5.3.3 Изучение характеристик экстракционно-хроматографических сорбентов

В методике выделения актиниевой фракции используются экстракционно-хроматографические сорбенты, изготовленные компанией TrisKem: Ln Resin, DGA Resin, TRU Resin. Совместно с кафедрой радиохимии МГУ им. Ломоносова были исследованы такие важные с точки развития технологии характеристики сорбентов, как сорбционная емкость по торию и коэффициенты распределения актиния.

После отделения тория жидкостной экстракцией в водной фазе, содержащей актиний-225 и радий-223, остаются следовые количества тория. Для дальнейшей работы с водной фазой необходимо выбрать размер хроматографической колонки, зависящий в том числе и от емкости сорбента по торию. Получены экспериментальные данные для Ln Resin в растворах 0.05 и 6 М HNO_3, DGA Resin в 6 М HNO_3 и TRU Resin в 3 М HNO_3.

Концентрацию тория определяли методом ИСП-АЭС. Для всех сорбентов емкость по торию находится в диапазоне 33-37 mg Th/mL sorbent.

Были определены коэффициенты распределения актиния в зависимости от концентрации HNO_3 (Рисунки 3.3.1а-в).

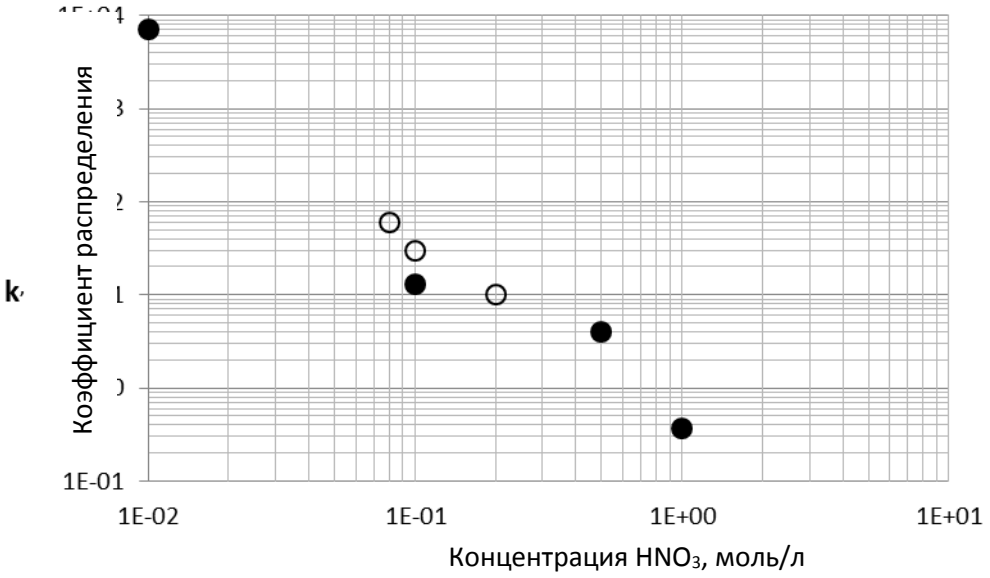


Рисунок 3.3.1а - Зависимость коэффициента распределения Ac (III) на Ln Resin от концентрации HNO_3. ● – полученные данные; ○ – Horwitz P. et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 1975, v.37, p.425.

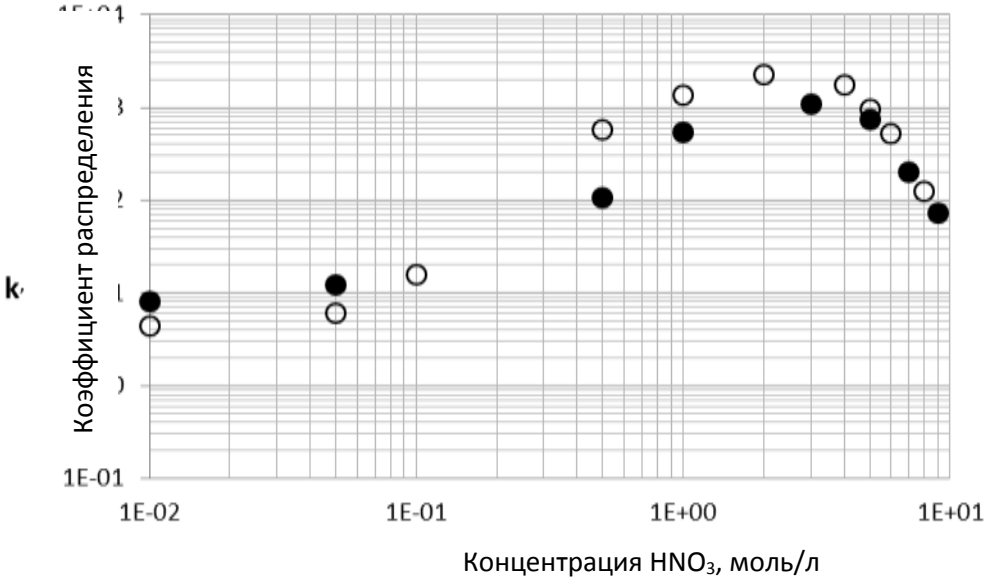


Рисунок 3.3.1б - Зависимость коэффициента распределения Ac (III) на DGA Resin от концентрации HNO_3. ● – полученные данные; ○ – Zielinska B. et al., Solv. Extr. Ion Exch., 2007, v.25, p.339.

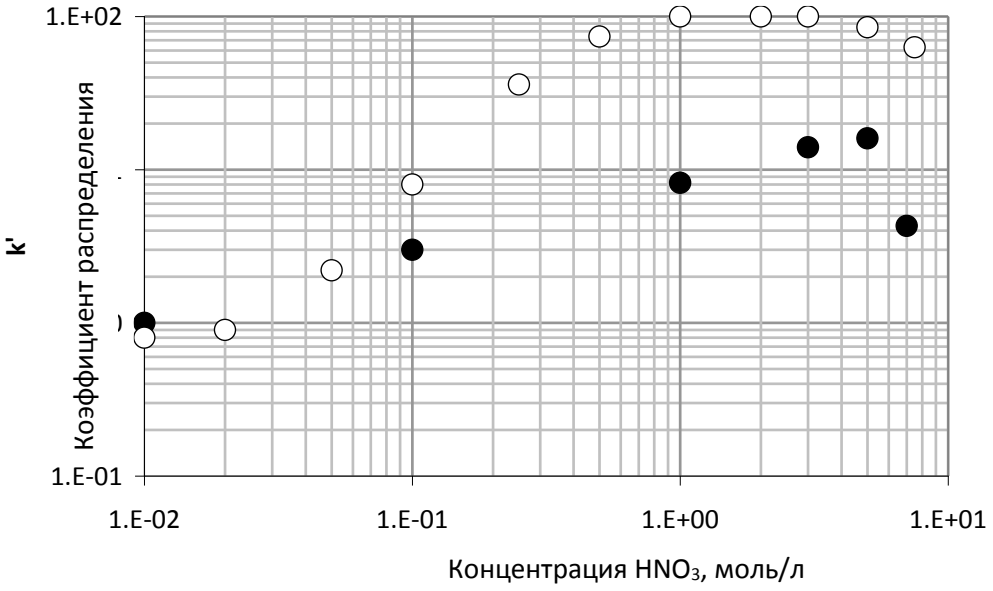


Рисунок 3.3. 1в - Зависимость коэффициента распределения Ac (III) и Am (III) на TRU Resin от концентрации HNO_3. ● – Ac (III) (полученные данные); ○ – Am (III) (Horwitz P. et al., Analyt. Chim. Acta, 1993, v.281, p.361).

Для Ln Resin и DGA Resin полученные результаты удовлетворительно совпадают с данными для аналогичных смол другого производителя – Eichrom. Для TRU Resin результаты получены впервые, их сравнили с данными америция, как аналога актиния. В настоящее время проводится работа по определению коэффициентов распределения лантана и церия, также являющихся аналогами актиния.

5.3.4 Совершенствование методики получения чистой радиевой фракции

Ранее было обнаружено, что радий-223 отделяется от актиния-225 на сорбенте DGA Resin (Отчет за 2013 г, раздел 3.1.2). Дальнейшую очистку радия проводили с помощью катионообменной смолы Dowex 50x8 и экстракционно-хроматографического сорбента Sr Resin (TrisKem).

Элюат после DGA Resin переводили в 0.1 M HCl и пропускали через Dowex 50x8, в результате чего радий сорбировался. Экспериментируя с различными элюентами, удалось выделить радиевую фракцию, содержащую также $^{140}Ba/^{140}La$ и небольшие количества ^{103}Ru (Рисунок 3.4.1).

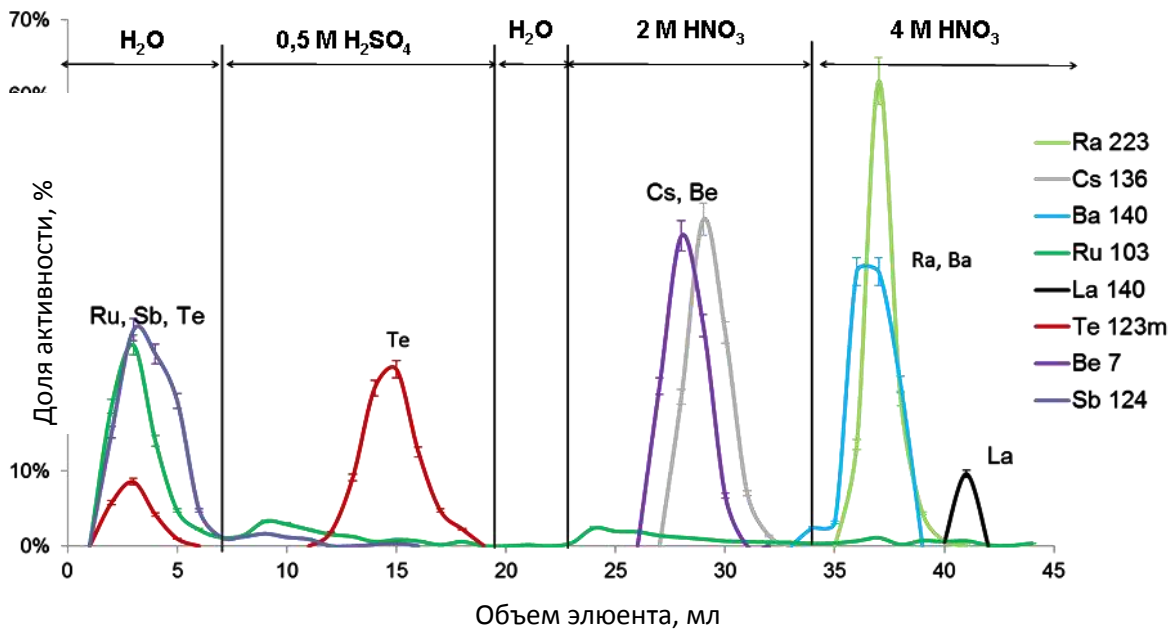


Рисунок 3.4.1 - Кривые элюирования радионуклидов на катионообменной смоле Dowex 50x8.

Для дальнейшей очистки радиевую фракцию переводили в 0.5 М $HClO_4$ и пропускали через Sr Resin (Рисунок 3.4.2). Ra и Ba сорбировались, а La и Ru вымывались из колонки.

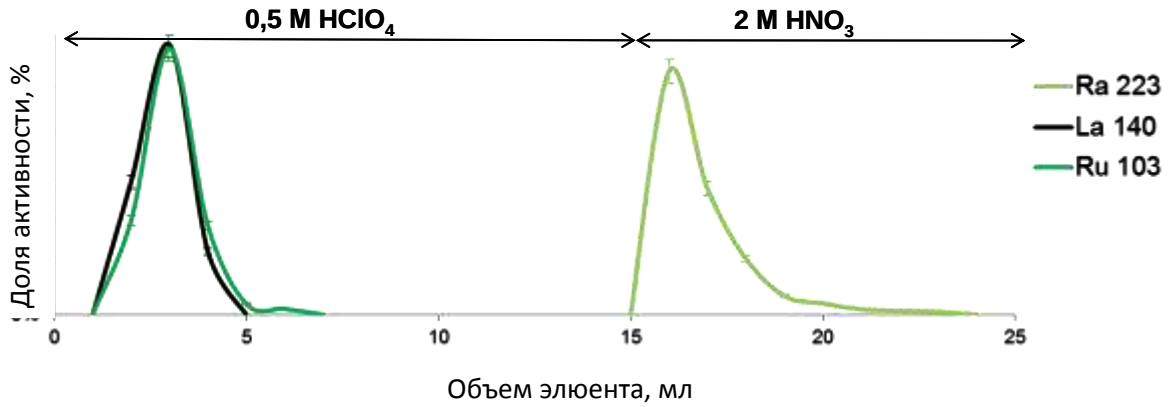


Рисунок 3.4.2 - Кривые элюирования радионуклидов на сорбенте Sr Resin.

Пропуская затем 2 М раствор HNO_3, получали чистую радиевую фракцию, при этом барий оставался на Sr Resin.

5.3.5 Оптимизация способа совместного выделения актиния-225 и радия-223 из облученного тория

По результатам проведенных экспериментов выработан и оптимизирован способ совместного выделения актиния-225 и радия-223 из облученного тория (Рисунок 3.5.1).

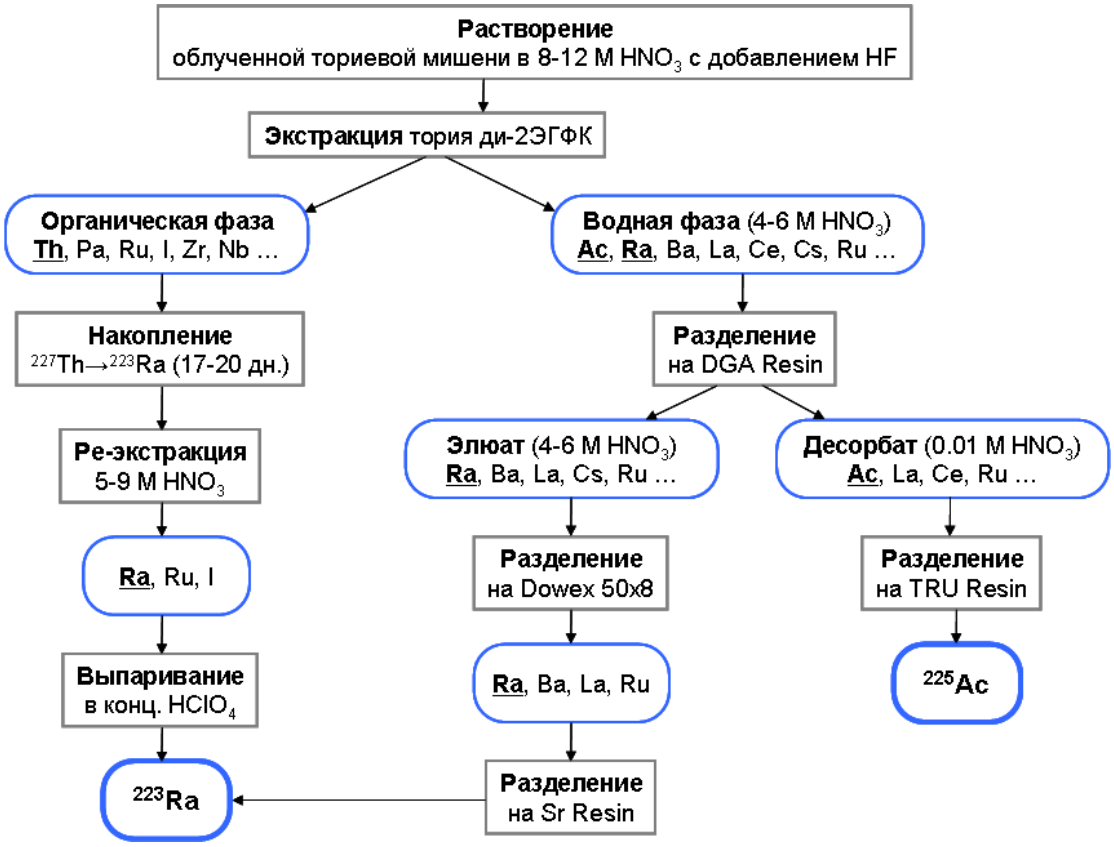


Рисунок 3.5.1 - Схема совместного выделения актиния-225 и радия-223 из облученного тория.

Химический выход актиния-225, выделенного по предложенному способу, достигал 90%, а радия-223 – 80-85%. Радионуклидная чистота препаратов превышала 99% (без учета ^{227}Ac и ^{224}Ra, соответственно). На основе этого способа разрабатывается технология получения производственных количеств актиния-225 и радия-223 в условиях горячих камер.

5.3.6 Изучение различных режимов элюирования 225Ac/213Bi генератора

5.3.6.1 Определение эффективностей элюирования франция-221 и висмута-213

Выделенную актиниевую фракцию использовали для приготовления ^{225}Ac/^{213}Bi генератора и изучения его характеристик. ^{225}Ac адсорбировали на колонке (H = 2 см, ø = 0.6 см), заполненной экстракционно-хроматографической смолой Actinide Resin (TrisKem). Исходная активность ^{225}Ac составляла ~ 1 МБк. Дочерние ^{221}Fr и ^{213}Bi элюировали

растворами HCl и HNO_3 различной концентрации. Исходные кривые элюирования, полученные при пропускании 1 М HCl со скоростью 0.76 мл/мин, представлены на Рисунке 3.6.1.1а. Для расчета эффективностей элюирования ^{221}Fr и ^{213}Bi учитывали их образование и распад непосредственно во время движения элюента через колонку, в результате вид кривых изменялся (Рисунок 3.6.1.1б).

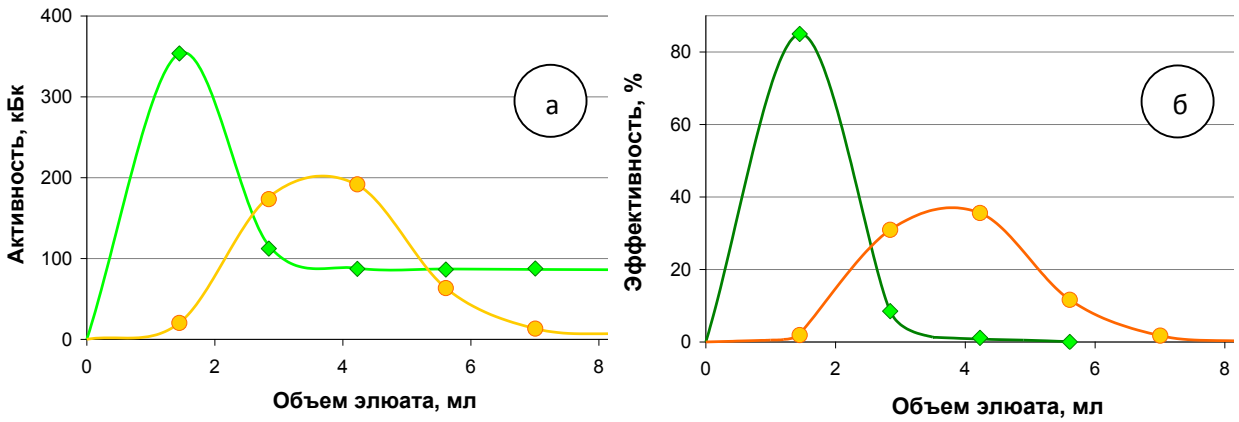


Рисунок 3.6.1.1 - Кривые элюирования ^{221}Fr и ^{213}Bi: а – исходные; б – преобразованные с учетом накопления и распада ^{221}Fr и ^{213}Bi непосредственно во время элюирования. Элюент – 1 М HCl, скорость пропускания 0.76 мл/мин.

Исследовали эффективность элюирования ^{221}Fr и ^{213}Bi в зависимости от кислотности растворов (Рисунок 3.6.1.2).

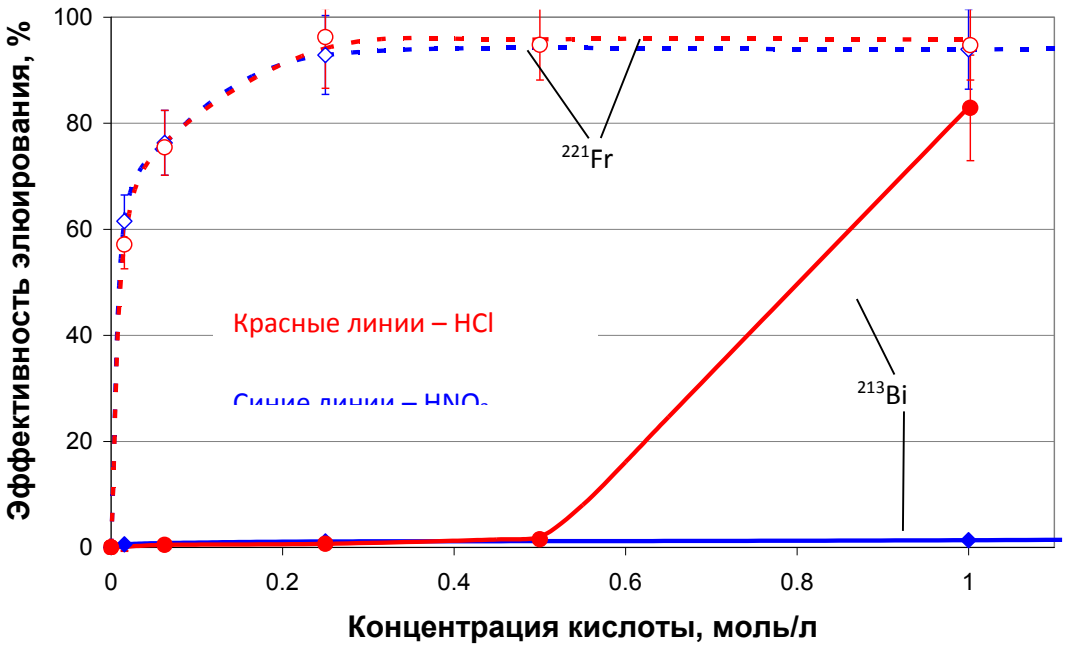


Рисунок 3.6.1.2 - Зависимость эффективности элюирования ^{221}Fr и ^{213}Bi от кислотности растворов HCl и HNO_3.

Обнаружено, что франций легко отделяется от Actinide Resin растворами обеих кислот. Висмут не вымывался растворами HNO_3 в изученном диапазоне концентраций. Показано, что количественное элюирование висмута достигается относительно концентрированными растворами HCl (1 моль/л и выше) вследствие образования хлоридных комплексов.

Для проверки стабильности характеристик приготовили свежий $^{225}Ac/^{213}Bi$ генератор. Его элюировали раствором 1 М HCl ежедневно (за исключением выходных) в течение 20 дней. Эффективность элюирования ^{213}Bi находилась в пределах 80-85%, проскока ^{225}Ac не наблюдали.

5.3.6.2 Оптимизация работы двухколоночного $^{225}Ac/^{221}Fr/^{213}Bi$ генератора

Исследовали эффективность работы двухколоночного $^{225}Ac/^{221}Fr/^{213}Bi$ генератора в зависимости от скорости пропускания элюента. Материнский ^{225}Ac сорбировали на первую колонку с Actinide Resin. ^{221}Fr количественно смывали с первой колонки раствором 0.25 М HNO_3 и направляли элюат в трубку, соединяющую первую колонку со второй, заполненной тем же сорбентом. В трубке ^{221}Fr распадался в ^{213}Bi, последний накапливался на второй колонке до достижения векового равновесия. На Рисунке 3.6.2.1 показано содержание ^{213}Bi в различных частях двухколоночного генератора в зависимости от скорости пропускания элюента.

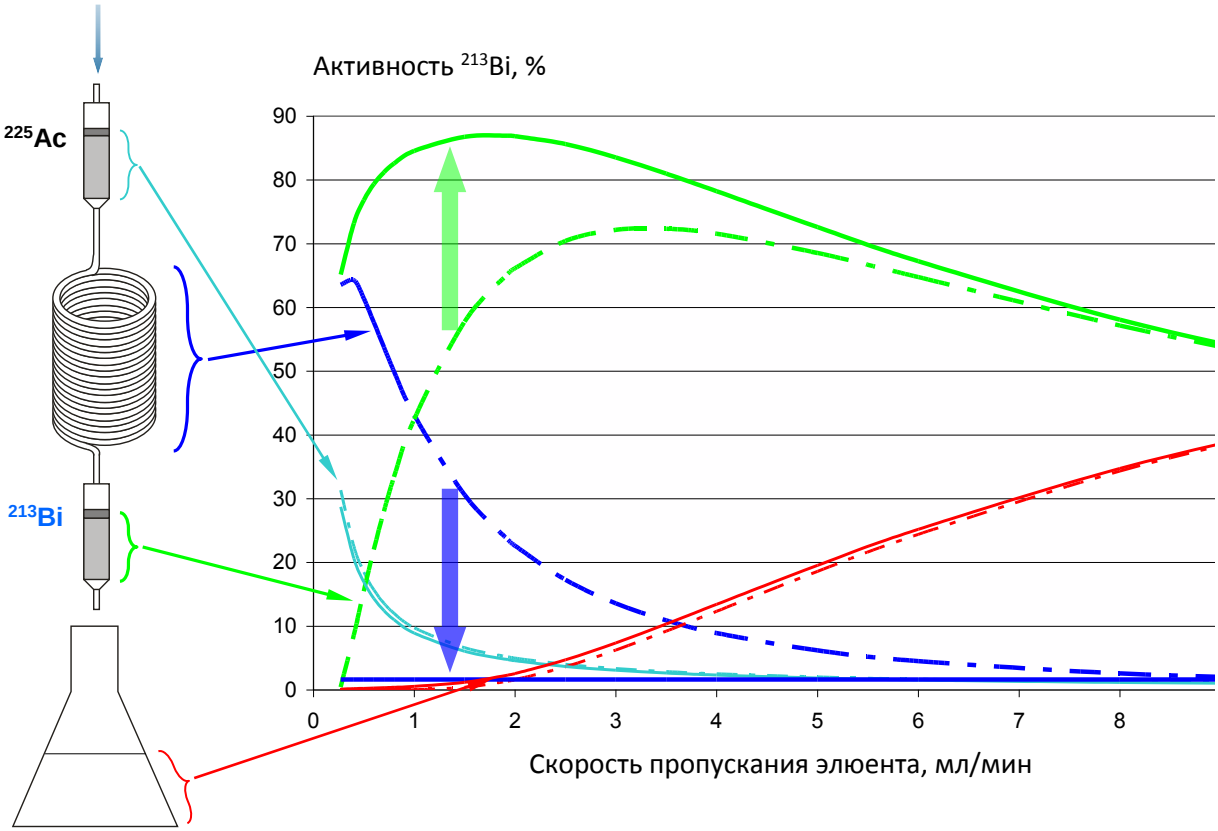


Рисунок 3.6.2.1 - Содержание ^{213}Bi в различных частях двухколоночного генератора в зависимости от скорости пропускания элюента (вековое равновесие достигнуто).

При низких скоростях элюента значительная часть ^{221}Fr распадается в ^{213}Bi в первой колонке, где ^{213}Bi сорбируется (голубая штриховая линия). При высоких скоростях длины трубки недостаточно для полного распада ^{221}Fr, поэтому растет доля ^{213}Bi, образующегося в смыве после второй колонки (красная штриховая линия). Обнаружено, что при оптимальной скорости элюента на второй колонке можно накопить ~70% активности ^{213}Bi (зеленая штриховая линия), причем значительная часть активности ^{213}Bi остается в трубке (~15%, синяя штриховая линия) и успевает проскочить в смыв (8-9%, красная штриховая линия). Для увеличения активности ^{213}Bi, накапливаемой на второй колонке, было предложено использовать две разные скорости пропускания элюента: одну – до достижения векового равновесия, другую – для быстрой транспортировки ^{213}Bi, остающегося в трубке, ко второй колонке (синяя и зеленая стрелки от штриховых линий к сплошным).

При испытаниях прототипа двухколоночного ^{225}Ac/^{221}Fr/^{213}Bi генератора элюат после второй колонки направляли не в смыв, а на первую колонку, образуя петлю. Применяя режим двух скоростей пропускания элюента, удалось увеличить активность ^{213}Bi на второй колонке до ~90%. Затем ^{213}Bi смывали раствором 1 М HCl.

5 Заключение

В ходе проведенных исследований изучено влияние ряда параметров на выход стронция-82 при облучении рубидиевой мишени, произведено моделирование параметров облучения рубидиевых мишеней, в том числе в случае мишени с металлическим рубидием, циркулирующим по контуру, создана модельная установка с циркулирующим металлическим рубидием.

Определен ряд важнейших параметров медицинского генератора рубидия-82, используемого в ПЭТ, которые оказались лучше, чем у американского аналога. Произведен расчет защиты генератора, что важно для создания инжекционной системы нового поколения.

Начата разработка технологии изготовления ториевой мишени в металлической оболочке для эффективного получения актиния-225 и радия-223 (используемых при терапии онкологических заболеваний), а также разработана методика отделения облученного тория от металлической оболочки. Усовершенствована методика получения чистой радиевой фракции, оптимизирован способ совместного выделения актиния-225 и радия-223 из облученного тория. Изучено элюирование ^{213}Bi из генератора ^{225}Ac/^{213}Bi.

5 Список публикаций

1. B.L. Zhuikov. Production of medical radioisotopes in Russia: status and future. A review. Appl. Radiat. Isotop., 2014. V.84, P.48-56.
2. В. М. Чудаков, Б. Л. Жуйков, С. В. Ермолаев, В. М. Коханюк, М. И. Мостова, В. В. Зайцев, С. В. Шатик, Н.А. Костеников, Д. В. Рыжкова, Л. А. Тютин. Исследование характеристик генератора ^{82}Rb для позитронно-эмиссионной томографии. Радиохимия, 2014,т. 56, Вып. 5, с. 455-461.
3. R.A. Aliev, S.V. Ermolaev, A.N. Vasiliev, V.S. Ostapenko, E.V. Lapshina, B.L. Zhuikov, N.V. Zakharov, V.V. Pozdeev, V.M. Kokhanyuk, B.F. Myasoedov, S.N. Kalmykov. Isolation of medicine-applicable actinium-225 from thorium targets irradiated by medium-energy protons. Solvent Extraction and Ion Exchange, 2014, v. 32, p. 468-477.
4. Ostapenko V., Vasiliev A., Lapshina E., Ermolaev S., Aliev R., Totskiy Yu., Zhuikov B., Kalmykov S. Separation of actinium-225 from fission and spallation products by extraction chromatography. J. Radioanalyt. Nucl. Chem. Submitted, 2014.
5. B.L. Zhuikov. The future of isotope production on medium and high energy proton beams. 8th Int. Conf. on Isotopes. Chicago, August 24-29, 2014. Abstracts. P. 252.
6. E. Lapshina, S. Ermolaev, B. Zhuikov, A. Vasiliev, V. Ostapenko, R. Aliev, S. Kalmykov. Recovery of actinium-225 and radium-223 from natural thorium irradiated with protons. 4th International Nuclear Chemistry Congress, Maresias, São Paulo, Brazil, 14-19 September, 2014. Abstract book, p.65.

7. Ostapenko, A. Vasiliev, E. Lapshina, S. Ermolaev, R. Aliev, S. Kalmykov, B. Zhuikov. Separation of ^{225}Ac from rare earth elements generated by proton irradiation of natural thorium. 4th International Nuclear Chemistry Congress, Maresias, São Paulo, Brazil, 14-19 September, 2014. Abstract book, p.67.

8. Жуйков Б.Л. Методы выделения и разделения медицинских радионуклидов, получаемых на ускорителях. Материалы IV Всероссийского симпозиума с международным участием «Разделение и концентрирование в аналитической химии и радиохимии», Краснодар, 28 сентября - 04 октября 2014 г., с. 132.

9. Е.В. Лапшина, С.В. Ермолаев, Б.Л. Жуйков, С.Н. Калмыков, Р.А. Алиев, В.С. Остапенко, А.Н. Васильев, С.С. Данилов. Выделение и концентрирование ^{223}Ra из облученного протонами природного тория. Материалы IV Всероссийского симпозиума с международным участием «Разделение и концентрирование в аналитической химии и радиохимии», Краснодар, 28 сентября - 04 октября 2014 г., с. 146.

10. В.С. Остапенко, А.Н. Васильев, Е.В. Лапшина, С.В. Ермолаев, Р.А. Алиев, С.Н. Калмыков, Б.Л. Жуйков. Выделение ^{225}Ac из природного тория, облученного протонами средней энергии. Материалы IV Всероссийского симпозиума с международным участием «Разделение и концентрирование в аналитической химии и радиохимии», Краснодар, 28 сентября - 4 октября 2014 г., с. 155.

11. S.V. Ermolaev, B.L. Zhuikov, V.M. Kokhanyuk, A.K. Skasyrskaya, O.V. Grekhov, Yu.V. Kiselev, A.N. Mirzojan, V.A. Moiseev, V.L. Serov, A.V. Feschenko, L.V. Kravchuk. Radionuclide Production by High Intensity Proton Irradiation at the INR Linear Accelerator. XXIV Russian Particle Accelerators Conference, Obninsk, Russia, October 6 - 10, 2014.

12. S.V. Ermolaev, A.K. Skasyrskaya. Generators of alpha-emitting radionuclides ^{225}Ac→^{221}Fr→^{213}Bi and ^{223}Ra→^{219}Rn→^{211}Pb. 17th Radiochemical Conference, 11 - 16 May 2014, Mariánské Lázně, Czech Republic.

Список патентов

1. S. Srivastava, B.L. Zhuikov, S.V. Ermolaev, N.A. Konyakhin, V.M. Kokhanuyk, S.V. Khamyanov, N.R. Togaeva. Process and targets for production of no-carrier-added radiotin. US patent 8,705,681 B2, 22.04.2014.

2. B.L. Zhuikov, S.V. Ermolaev, V.M. Kokhanyuk. Method for producing radiostrontium. Canadian Patent 2,719,347. Date of issue of patent 15.07.2014.

6 Лаборатория моделирования физических процессов при высоких энергиях

Руководитель работ д.ф.-м.н. Н.В.Красников.

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Изучение редких распадов B-мезонов в эксперименте LHCb.

Руководитель работ Е.Н.Гущин.

Модернизация и исследование характеристик нового волоконного трекера LHCb.

Руководитель работ Е.Н.Гущин.

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

Руководитель работ С.Н.Гниненко.

Изучение фундаментальных свойств нейтрино в эксперименте ICARUS.

Руководитель работ С.Н.Гниненко.

Модернизация системы регистрации адронного калориметра детектора CMS.

Руководители работ А.С.Пашеньков, к.ф.-м.н. Ю.В.Мусиенко.

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

Руководитель работ О.В.Каравичев.

6.1 Изучение фундаментальных свойств материи на установке CMS в ЦЕРНе: поиск новой физики на Большом адронном коллайдере.

Руководитель работы темы зав. лабораторией, д.ф.-м.н. Н.В. Красников

Исполнители темы

С.н.с., к.ф.-м.н. Ю.М. Андреев

В.н.с., к.ф.-м.н.С.Н. Гниненко

М.н.с. А.В. Дерменев

С.н.с., к.ф.-м.н. М.М. Кирсанов

М.н.с. А.Е. Корнеев

Н.с., к.ф.-м.н. Д.А. Тлисов

С.н.с., к.ф.-м.н. А.Н. Торопин

6.1 РЕФЕРАТ

38 рис., 1 табл., 3 источника

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЕЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, ГЕНЕРАТОРЫ МОНТЕ-КАРЛО, АДРОННЫЕ СТРУИ, КАЛИБРОВКА АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ.

Объектом исследования являются процесс рождения и возможность экспериментального наблюдения тяжелого майорановского нейтрино и дополнительных калибровочных бозонов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе.

Цель работы:

Продолжение анализа данных эксперимента CMS, полученных в 2012 г. при энергии сталкивающихся пучков протонов до 8 ТэВ, с целью выделения событий рождения тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов, проверки предсказаний Стандартной модели и поиска возможных отклонений.

Моделирование сигнальных событий от распадов W_R и N_e с использованием программы полного моделирования и реконструкции событий в детекторе CMS CMSSW. Моделирование фоновых событий с сигнатурой «два лептона и две струи».

Изучение шумов адронного калориметра установки CMS.

Методы выполнения работы:

Разработка методов выделения событий рождения тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов в эксперименте CMS. Развитие Монте-Карло-генераторов для моделирования таких процессов. Анализ данных эксперимента CMS,

собранных в 2010-2012 гг. Создание и поддержка необходимого программного обеспечения.

Мониторирование качества данных и контроль работы детекторных систем эксперимента CMS во время дежурств в ЦЕРНе.

Экспериментальные результаты:

В результате анализа данных, полученных коллаборацией CMS в течение 2010-2012 гг. и соответствующих полной светимости БАК 19,7 фб$^{-1}$, в 2014 г. были получены предварительные ограничения на массу правого бозона W_R около 3000 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино 1800 ГэВ. Новый нижний предел на массу правого W-бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, в 3,7 раза.

Степень внедрения:

Разработана основа ПО для контроля измерительной аппаратуры, реконструкции и анализа физических объектов высокого уровня, доступных наблюдению в эксперименте CMS. Выполнены работы по созданию программного обеспечения для стенда по изучению характеристик новых образцов гибридных фотодиодов, планируемых для установки в адронный калориметр установки CMS.

Научно-технический уровень выполненной НИР:

Результаты, полученные в эксперименте CMS в физических сеансах измерений при энергии сталкивающихся пучков протонов до 8 ТэВ по поиску тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов, уникальны и обозначают передовой рубеж современной науки на мировом уровне.

6.1 ВВЕДЕНИЕ

Открытие нейтринных осцилляций и, следовательно, ненулевой массы покоя нейтрино является на сегодняшний день одним из самых ярких и надежных указаний на существование новой физики за пределами Стандартной модели (СМ). Малость масс нейтрино может быть связана с существованием их партнеров – более тяжелых нейтрино, возникающих во многих расширениях СМ, что делает их поиск актуальной и важной задачей.

Сотрудниками Лаборатории моделирования физических процессов Института ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН) в 2014 г. в рамках минимальной лево-право симметричной модели (ЛПСМ) было продолжено исследование процесса рождения и возможности экспериментального наблюдения тяжелого майорановского нейтрино и дополнительных калибровочных бозонов в эксперименте CMS в ЦЕРНе. Модель объясняет нарушение четности в слабых взаимодействиях и предсказывает существование дополнительных калибровочных бозонов WR и Z', а также семейства тяжелых нейтрино N майорановского типа. Поиск тяжелых нейтрино является одним из актуальных и, возможно, оптимальных путей, которые могут привести к созданию новой, более полной, теории.

6.1.1 ПОИСК ТЯЖЕЛЫХ НЕЙТРИНО В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS

Лево-правосимметричная модель

Эксперимент CMS на БАК в ЦЕРНе является одним из основных экспериментов, использующим крупномасштабный многоцелевой детектор и открывающим новые перспективы для исследования широкого круга фундаментальных проблем и поиска новых явлений, лежащих за пределами СМ. Среди нескольких расширений СМ, которые могут быть исследованы на CMS, ЛПСМ определенно является одной из наиболее привлекательных. Модель включает дополнительно три тяжелых калибровочных бозона, $W_R^{\pm}$ и Z', а также три правых тяжелых майорановских нейтрино, N_l. Эти нейтрино могут быть партнерами легких нейтринных ароматов, т.е. соответственно электронного, мюонного и тауонного нейтрино, и могут генерировать их массы посредством механизма типа «see-saw». Это делает поиски тяжелых нейтрино в эксперименте CMS чрезвычайно важными и актуальными.

Моделирование сигнальных и фоновых событий

Моделирование сигнальных событий и вычисление сечений было выполнено с помощью пакета PYTHIA 6.2 Полное сечение процесса $p+p \rightarrow W_R + X \rightarrow N_e+e^{\pm} + X$ более чем на порядок превосходит сечение реакции $p+p \rightarrow Z' + X \rightarrow 2N_e+ X$, делая его, таким образом, наиболее предпочтительным для поиска тяжелых нейтрино. Моделирование сигнальных событий от распадов W_R и N_e было выполнено с использованием программы полного моделирования и реконструкции событий в детекторе CMS CMSSW. После реконструкции событий, на первом этапе отбора событий–кандидатов требовалось наличие, по крайней мере, четырех реконструированных объектов, а именно, двух или более изолированных электронов (мюонов) и двух или более струй. Эффективность отбора истинных сигнальных событий составила при этом около 90%. Источником фона для сигнальных событий являются процессы СМ с парой лептонов и, по крайней мере, двумя струями в конечном состоянии. Для оценки величины фона эти события были смоделированы, реконструированы и отобраны с помощью тех же программ и критериев, что и сигнальные события. Первоначальное число смоделированных событий фона в детекторе CMS соответствовало их ожидаемому числу для полной светимости $L_t = 30$ фб$^{-1}$.

В результате анализа было показано, что совокупный фон после прохождения условий отбора также может быть хорошо описан экспоненциальной функцией. Несмотря на то, что фон в области масс в несколько сотен гигаэлектронвольт достаточно велик, пик от распадов нейтрино хорошо идентифицируется. Если потребовать, чтобы

реконструированная инвариантная масса комбинации $e_1e_2j_1j_2$ в этом же событии была больше, чем 1 ТэВ, уровень фона под пиком существенно уменьшается. Распределение масс для W_R-событий в присутствии фона показывает, что пик W_R проявляется отчетливо.

Результаты очередного этапа эксперимента

За 2010-2012 гг. детектором CMS было набрано около 25 фб$^{-1}$ удовлетворяющих триггеру экспериментальных данных. Полностью обработаны экспериментальные данные по двум сигнатурам: а) 2 адронных струи + 2 изолированных электрона б) 2 адронных струи + 2 изолированных мюона. В электрон-мюонном канале экспериментально обнаружены события, удовлетворяющие всем критериям отбора, которые хорошо согласуются с предсказаниями СМ. В электронном и мюонном каналах зарегистрирован пик от распада Z-бозона. Рисунок 1 демонстрирует его для электронноой моды распада. Наблюдается хорошее согласие с моделированием методом Монте-Карло. Количество КХД-струй, реконструированных как электроны, также хорошо согласуется с результатами моделирования.

Распределение по количеству первичных взаимодействий и распределение по инвариантной массе четырех объектов на предварительной стадии отбора хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями. Такое согласие с наблюдаемыми данными говорит о правильном понимании всех важных процессов, происходящих при высоких энергиях. События, прошедшие через все стадии отбора, представляют собой картину, представленную на рисунке 2.

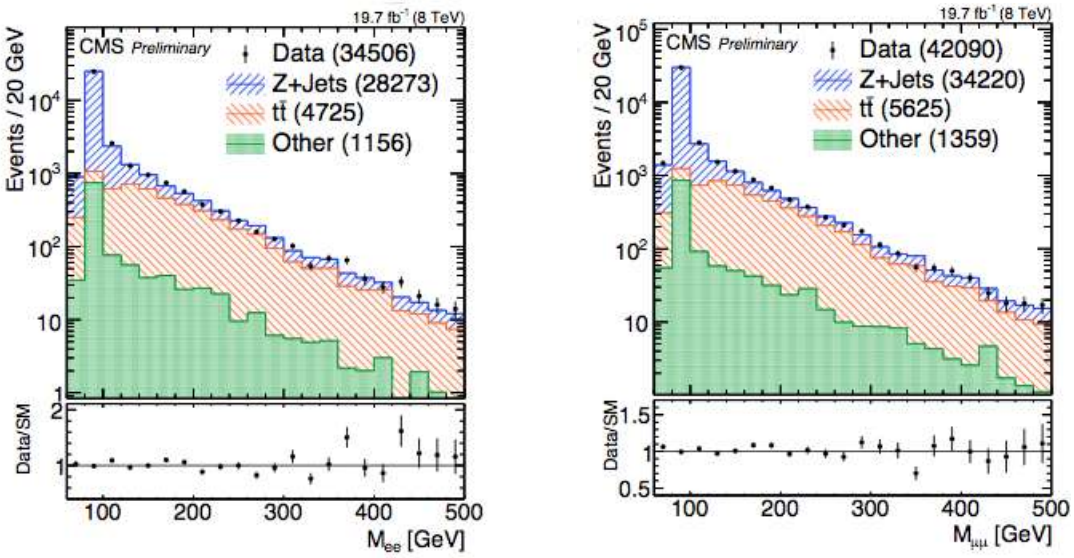


Рисунок 1 - Реконструированная масса Z-бозона в электронном (слева) и мюонном (справа) каналах.

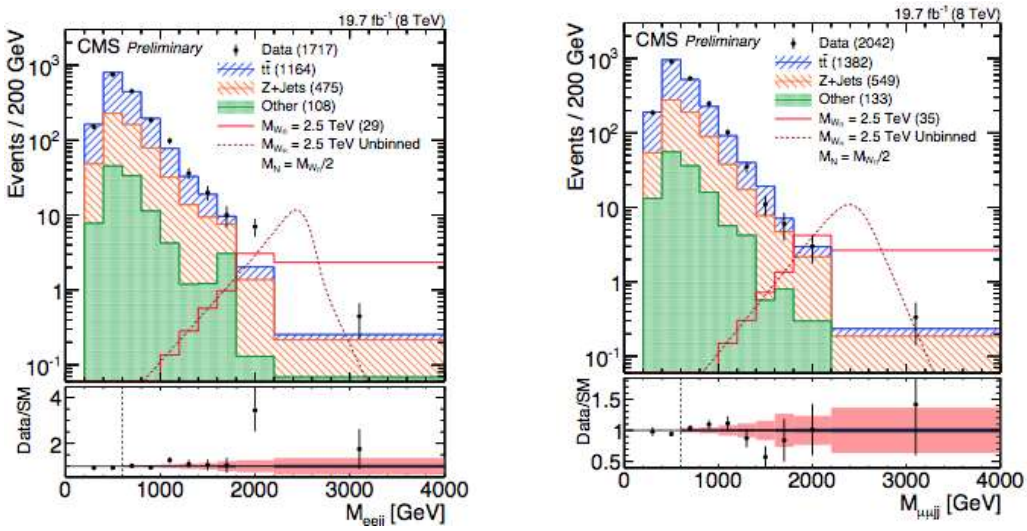


Рисунок 2 - Распределение событий по инвариантной массе четырех объектов после всех стадий отбора в электронном (слева) и мюонном (справа) каналах.

Получены рекордные ограничения на массу правого W-бозона и массу тяжелого нейтрино на основе использования сигнатур с изолированными электронами и мюонами. При массе тяжелого нейтрино порядка половины массы W-бозона его масса M_W должна быть больше 3100 ГэВ. В координатах «масса правого W-бозона M_W - масса тяжелого нейтрино m_N» получены области, в которых существование W-бозона и тяжелого нейтрино с такими массами исключено в рамках лево-правосимметричной калибровочной модели $SU_c(3)\otimes SU_L(2)\otimes SU_R(2)\otimes U(1)$ как для электронного, так и для мюонного каналов. Новый нижний предел на массу правого W-бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, более чем в 4 раза.

В электронном канале наблюден небольшой избыток событий над фоном на уровне 2,8 стандартных отклонения при инвариантной массе электрона, позитрона и двух адронных струй M_{inv} в диапазоне 1,8...2,2 ТэВ, хотя наблюденный избыток событий трудно интерпретировать как наличие W_R-бозона с массой порядка 2 ТэВ в рамках модели $SU_c(3)\otimes SU_L(2)\otimes SU_R(2)\otimes U(1)$ с лево-правой симметрией. Эти результаты опубликованы в журнале European Physical Journal, они вызвали большой интерес у специалистов, уже опубликовано несколько статей, объясняющих наблюдаемое превышение событий над фоном, в частности, в модели с явно нарушенной лево-правой симметрией (см. Deppisch F. et al. Signal of Right-Handed Charged Gauge Bosons at the LHC? // Phys.Rev.D. 2014. V.90. P.053014. DOI: 10.1103/PhysRevD.90.053014; Aguilar-Saavedra J.A., Joaquim F.R. A closer look at the possible CMS signal of a new gauge boson // Phys.Rev.D. 2014. V.90. P.115010. DOI: 10.1103/PhysRevD.90.115010).

Сотрудником ЛМФП Н.В.Красниковым в соавторстве с В.А.Матвеевым написана монография «Открытие бозона Хиггса и поиск новой физики на Большом адронном коллайдере при энергиях 7 и 8 ТэВ» [1]. Монография представляет обзор результатов по поиску новой физики на Большом адронном коллайдере, включая открытие бозона Хиггса, во время сеансов 2010-2012 гг. и будет опубликована издательством «Красанд» в начале 2015 г. Опубликована монография С.И.Битюкова и Н.В.Красникова «Применение статистических методов для поиска новой физики на Большом адронном коллайдере» [2]. Написан и опубликован обзор по поиску правого W-бозона и стерильного нейтрино на детекторах CMS и ATLAS [3].

6.1.2 АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР HCAL

Изучение шумов адронного калориметра HCAL

Выполнялись исследования по тематике группы DPG (Detector Performance Group), изучающей характеристики работы адронного калориметра (HCAL) детектора CMS. Работа велась по тематике рабочих групп DPG: Noise WG, изучающей шумы адронного калориметра, и HBHE 25ns Reconstruction Group, изучающей возможность восстановления энергии зарегистрированной адронным калориметром частицы по заряду в одном интервале (25 нс) зарядово-цифрового преобразователя (QIE) по сравнению со стандартной на настоящее время схемой использования двух временных интервалов (2×25 нс). Схема с использованием одного временного интервала важна для подавления влияния наложения сигналов от срабатываний калориметра вне данного временного интервала (до или после) в случае использования пучков ускорителя в режиме высокой интенсивности, когда временные ворота триггера могут быть уменьшены до 25 нс. Изучалась коррекция восстановленной энергии в одиночном акте срабатывания HCAL, учитывающая Out-Of-Time Pile-Up.

Модернизация фотоприемников адронного калориметра HCAL

В адронном калориметре эксперимента CMS будет применяться новый тип полупроводниковых фотодетекторов — кремниевые фотоумножители (Silicon Photomultiplier, SiPM). SiPM состоит из множества кремниевых ячеек, которые работают в гейгеровском режиме (с усилением порядка 10^6) как независимые счетчики фотонов. Выходной сигнал SiPM представляет собой сумму сигналов от всех ячеек, сработавших от попадания фотона. Основные достоинства SiPM заключаются в низком уровне шума (по сравнению с традиционными лавинными фотодиодами), достаточно высокой эффективности регистрации фотонов (десятки процентов — на уровне вакуумных фотоумножителей) и высоком временном разрешении (десятки пикосекунд).

Сотрудник ЛМФП А.Корнеев принимал участие в тестировании и выборе оптимальных типов SiPM для установки в адронный калориметр детектора CMS. В начале следующего года планируется поступление крупной серии приборов для тестирования, поэтому основные работы в этом году были сосредоточены на подготовке нескольких стендов для массового тестирования SiPM. В результате этой работы были подготовлены как сами стенды, так и программное обеспечение для автоматизации измерений.

Подготовка стендов для массового тестирования SiPM

Для массового тестирования были подготовлены два стенда для контроля основных характеристик SiPM (рисунок 3):

а) Стенд для измерения темновых токов и их зависимости от напряжения смещения, а также для измерения напряжения пробоя. Этот стенд позволяет последовательно подавать на каждый подключенный фотодетектор серию напряжений и измерять величину протекающего тока, изучая, таким образом, вольт-амперную характеристику приборов.

б) Стенд для контроля стабильности работы. Этот стенд предназначен для изучения поведения фотодетекторов с течением времени. Так же предусмотрена установка стенда в печь, что позволит оценить скорость старения фотодекторов.

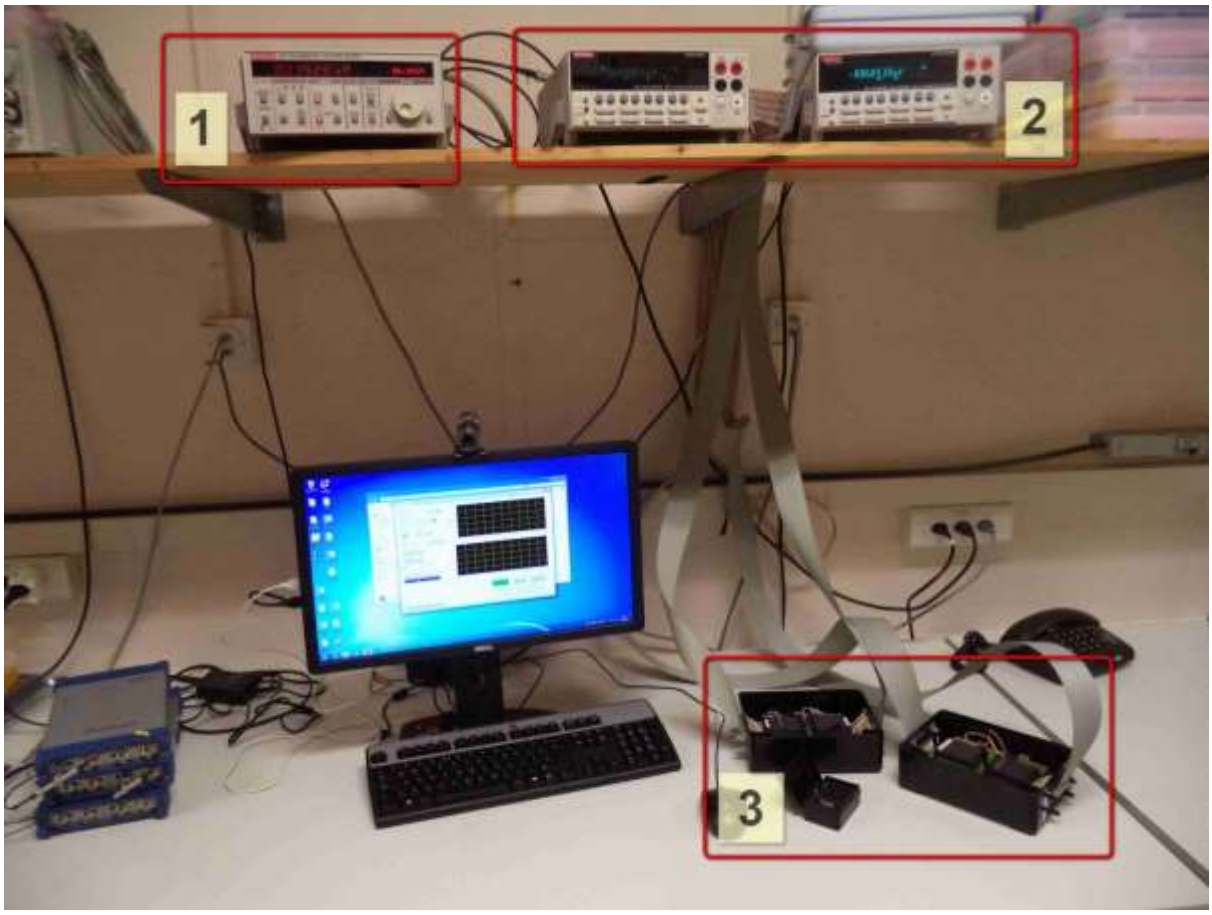


Рисунок 11 - Многоканальные стенды для измерения темновых токов и контроля стабильности работы фотодетекторов SiPM.

Проверка работоспособности МЛФД в реальных условиях эксперимента

В рамках работ по модернизации адронного калориметра HCAL установки CMS было продолжено изучение характеристик кремниевых фотоумножителей на основе экспериментальных данных, набранных в 2012-13 гг. Во внешнем блоке HO адронного

калориметра HCAL были установлены 132 кремниевых фотоумножителя (SiPM) фирм Hamamatsu и Zecotek с целью проверки их работоспособности в реальных условиях эксперимента и дальнейшей замены используемых в настоящее время лавинных фотодиодов на кремниевые фотоумножители. Анализ работоспособности кремниевых фотоумножителей на основе экспериментальных данных позволяет сделать вывод о стабильности их характеристик и возможности их использования с целью модернизации адронного калориметра. Результаты анализа были представлены для доклада на рабочем собрании группы HCAL.

Модернизация модулей адронного калориметра HCAL

Важной задачей в 2014 г. было проведение измерения отклика различных слоев адронного калориметра (цилиндрической части) детектора CMS. Для этого был собран и установлен привод радиоактивного источника SR-90 с индексером и подводящими трубками. Радиоактивный источник вводился внутрь различных слоев адронного калориметра одновременно со снятием показаний с электроники. По результатам испытаний можно отметить радиационную деградацию слоев калориметра, находящихся ближе к оси пучка. Важной работой при подготовке ко второму сеансу работы БАК стала замена блоков считывания сигналов Read-out Module (RM) в торцевой и баррельной частях адронного калориметра. Эти модули преобразуют свет, собранный с пластиковых сцинтилляторов, в электрические сигналы и являются важнейшим элементом адронного калориметра детектора CMS. Всего было снято, починено или заменено, протестировано и установлено обратно 10 таких модулей.

Крайне важной для безопасности детектора CMS работой была замена датчиков температуры адронного калориметра и проверка кабелей для них. Всего было заменено на новые радиационностойкие 32 датчика в баррельной части и 32 датчика в торцевой части адронного калориметра детектора CMS. Также были проверены провода и электроника считывания данных с датчиков. Такой же важной задачей в 2014 г. была проверка высоковольтных высокочастотных кабелей и адапторов для нового переднего адронного калориметра детектора CMS. Передний адронный калориметр используется для подсчёта количества протон-протонных взаимодействий внутри детектора CMS. Кабеля и адаптеры тестировались с помощью осциллографа. Всего было протестировано около 340 кабелей и 340 адаптеров.

6.1.3 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА CMS

CMSSW – программный пакет для обработки данных CMS и моделирования методом Монте-Карло. PYTHIA8 – универсальный генератор для моделирования физических процессов при столкновениях протонов высоких энергий, также может служить адронизатором для генераторов, работающих на уровне матричных элементов. Предполагается, что PYTHIA8 станет основным адронизатором в Run II LHC для CMS.

По этой задаче были выполнены следующие работы: тестирование новых версий PYTHIA8 при совместной работе с CMSSW; тестирование кодов для матчинга партонов и джетов при адронизации LHE-файлов пакетом PYTHIA8 при совместной работе с CMSSW для полного перехода на PYTHIA8 для адронизации и отказа от PYTHIA6; поддержка классов EmissionVeto и EmissionVeto1 для более точной адронизации физических процессов, смоделированных генераторами матричных элементов (в частности, генераторами POWHEG и POWHEG_BOX); реализация возможности использования двух различных версий PYTHIA8 в одной и той же версии CMSSW (переключение производится изменением только конфигурационного файла, без перекомпилирования); добавление новых функций и параметров интерфейса с поддержкой его документации.

В 2014 г. в коллаборации CMS была произведена реорганизация генераторной группы: организованы несколько подгрупп, в частности, подгруппа Generator integration and validation. Сотрудник ЛМФП М. Кирсанов является одним из руководителей подгруппы, его ответственность - интеграция генераторов, поддержка существующих интерфейсов и интегрирование новых генераторов.

6.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы, предусмотренные очередным этапом участия сотрудников Лаборатории МФП в эксперименте CMS, выполнены. Этот этап в основном был связан с проведением анализа набранных экспериментальных данных с целью поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели, дальнейшим участием в сервисных работах на установке CMS, разработкой новых методов реконструкции и анализа событий, а также с работами по модернизации адронного калориметра установки CMS, в частости, с деятельностью по модернизации фотоприемников.

В результате проделанной в 2014 г. работы продолжены исследования потенциала и возможности обнаружения на установке CMS тяжелого нейтрино майорановского типа N_e и нового калибровочного бозона W_R. Тяжелые нейтрино могут быть партнерами легких нейтринных ароматов и могут обеспечивать их массивность. Показано, что необходимое подавление фона от процессов, описываемых Стандартной моделью, достигается за счет требования наблюдения в конечном состоянии двух изолированных электронов и, по крайней мере, двух струй. В 2014 г. представлены предварительные результаты поиска тяжелых нейтрино и правого W_R-бозона, которые возникают в лево-правосимметричных расширениях Стандартной модели. Анализ основан на статистике протон-протонных столкновений при энергии 8 ТэВ, полученной в детекторе CMS на Большом адронном коллайдере при полной светимости 19,7 фб$^{-1}$. Пока не получено доказательств того, что наблюдается избыток событий, превышающий их число, ожидаемое в Стандартной модели. В результате предварительного анализа данных были получены ограничения на массу W_R около 3100 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино порядка половины массы W-бозона. Новый нижний предел на массу правого W-бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, более чем в 4 раза. Диапазон исключаемых масс W_R получен для каждого из лептоных каналов по отдельности (т.е. для электронного и мюонного).

Наряду с участием в физической программе на установке CMS сотрудники Лаборатории МФП в 2014 г. участвовали в дежурствах, обеспечивая высокую эффективность контроля работы детектора, участвовали в сервисных работах группы адронного калориметра, участвовали в работах по модернизации адронного калориметра и принимала активное участие в разработке и совершенствовании генераторов Монте-Карло для моделирования физических событий на установке CMS.

6.1 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Красников Н.В., Матвеев В.А. Открытие бозона Хиггса и поиск новой физики на Большом адронном коллайдере при энергиях 7 и 8 ТэВ. М.: Красанд, 2015. – 210 с.
2. Битюков С.И., Красников Н.В. Применение статистических методов для поиска новой физики на Большом адронном коллайдере. М.: Красанд, 2014. – 272 с.
3. Krasnikov N.V., Matveev V.A. Search for the right-handed W_R boson and a heavy neutrino at the Large hadron collider // Theoretical and Mathematical Physics. 2014. V. 181. P. 1540-1546.

6.1 ПРИЛОЖЕНИЕ

Справочная информация за 2014 г.

Число публикаций за 2014 г. – 153,

в ведущих журналах:

Physical Review Letters - 11

Physics Letters B – 25

Journal of High Energy Physics – 21

Physical Review D – 10

European Physical Journal – 9

Journal of Instrumentation – 3.

Публикации

Сотрудники Лаборатории МФП входят в авторский коллектив коллаборации CMS, который в 2014 г. опубликовал около 80 печатных работ в ведущих научных изданиях (в том числе Physical Review Letters – 8, Physics Letters B – 17, Journal of High Energy Physics – 23, Physical Review D – 12, European Physical Journal C – 13). По тематике работ ЛМФП в рамках коллаборации CMS подготовлена следующая публикация:

Khachatryan V. et al (CMS Collaboration). Search for heavy neutrinos and W-bosons with right-handed couplings in proton–proton collisions at √s=8TeV // Eur. Phys. J. C. 2014. V. 74. P. 3149. DOI 10.1140/epjc/s10052-014-3149-z.

Кроме того, сотрудниками Лабратории МФП опубликовано более 10 работ помимо коллаборации CMS (полный список таких работ приведен в материалах по ПРНД).

Доклады и сообщения

Krasnikov N. Search for dark force at CERN // QUARKS-2014, 18th International Seminar on High Energy Physics, Suzdal, Russia, 2-8 June, 2014.

Tlisov D. Exotica searches in pp collisions at 8 TeV in the CMS detector at the LHC // QUARKS-2014, 18th International Seminar on High Energy Physics, Suzdal, Russia, 2-8 June, 2014.

Kirsanov M. Search for a heavy neutrino and right-handed W boson of the left-right symmetric model in pp collisions at 8 TeV // QUARKS-2014, 18th International Seminar on High Energy Physics, Suzdal, Russia, 2-8 June, 2014.

Kirsanov M. Two-dimensional analysis against one-dimensional one in the search for WR and heavy neutrino // 17th Annual CMS RDMS Conference, Dubna, Russia, 7-8 August 2014.

Tlisov D. Possibility of space anisotropy search at CMS // 17th Annual CMS RDMS Conference, Dubna, Russia, 7-8 August 2014.

Сообщения

Сотрудниками Лаборатории МФП по результатам работ было сделано более 30 сообщений на заседаниях рабочих групп DPG, Noise WG, HCAL Integration & Upgrade адронного калориметра, рабочих групп электромагнитного калориметра и генераторной группы CMS.

6.2 Исследование нарушения CP – чётности и поиски новой физики в распадах B мезонов в эксперименте LHCb

Руководитель работ Е.Н.Гущин.

Исполнители:

Научный сотрудник С.Н.Филиппов

Главный инженер ИЯИ РАН О.В.Каравичев

Научный сотрудник А.А.Тихонов

Заведующий сектором Л.Н.Голышкин

Ведущий инженер З.Н.Шарифуллин

Слесарь С.К.Попов

6.2 РЕФЕРАТ

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, РЕДКИЕ РАСПАДЫ B-МЕЗОНОВ, НАРУШЕНИЕ CP-ЧЕТНОСТИ, КАЛОРИМЕТРИЯ, СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, НУКЛОН, ФОТОН, МЕЗОН

Одним из важных методов проверки Стандартной модели является прецизионное измерение параметров CP-нарушения, поиск и изучение редких распадов D- и B- мезонов. Эксперимент LHCb является мировым лидером по изучению физики тяжелых кварков на протонных пучках. Эксперимент LHCb в 2014 г. продолжил работу в области обработки набранных данных (всего за 2011-2013 г.г. принято >3/fb интегральной светимости), получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе более точное измерение CP-нарушающей фазы ϕs в B_s^0 секторе, измерения угла γ унитарного треугольника матрицы смешивания, обнаружение CP-нарущения в распадах B^0_s мезона, измерения CP ассиметрии в B_d секторе и ряд других. В эксперименте LHCb Институт ядерных исследований РАН отвечал за разработку калориметрической системы, в том числе за изготовление предливневого детектора. В 2014 г., пользуясь плановой остановкой ускорителя, сотрудниками ИЯИ РАН проведены работы по проверке и замене неисправных элементов калориметрической системы: исследование загрузочных характеристик и отбор фотоумножителей. Создан специализированный стенд для измерения параметров и загрузочных характеристик фотоумножителей. Группа ИЯИ РАН провела также работы по разработке новой трековой системы на основе сцинтилляционных волокон, в том числе разработаны новые прототипы многоканальных фотоприемников на основе кремниевых лавинных фотодиодов с улучшенными характеристиками: уменьшенным коэффициентом оптической связи, удовлетворяющей требованиям однородностью усиления и увеличенной чувствительностью.

6.2 Введение

LHCb – эксперимент, предназначенный для изучения физики тяжелых кварков на большом адронном коллайдере LHC. Основная цель эксперимента – поиск эффектов Новой Физики в нарушении CP четности и редких распадах адронов с *c*- и *b*- кварками, в том числе путем прецизионного измерения параметров, имеющих точное предсказание в Стандартной модели (СМ). За годы успешной работы уже получены ключевые результаты, особенно чувствительные к отклонениям от теории. Среди них такие, как измерение вероятности редкого распада $B_s \to \mu\mu$, измерение осцилляционного параметра Δm_d в системе B^0 мезона и угла γ унитарного треугольника матрицы смешивания, поиски сверхредкого распада $K_s \to \mu\mu$, изучение изотопической асимметрии в распадах $B \to K^{(*)}\mu\mu$ и ряд других. Другой пример – это измерение CP-нарушающей ϕs фазы в интерференции между смешиванием и распадами B_s – мезона, предсказанное значение которой в Стандартной модели мало, но эффекты Новой физики могут сделать его большим. Измерение угла смешивания γ унитарного треугольника матрицы Кабибо-Кобаяши-Москава тоже является критическим компонентом в определении параметров смешивания кварков. Результаты LHCb по углу γ уже являются доминирующими для мирового среднего значения.

Институт ядерных исследований участвует в коллаборации LHCb с 1993 г., начиная с проектной стадии эксперимента. После подготовки Технического проекта эксперимента ИЯИ РАН была доверена разработка и создание предливневого детектора, являющегося частью калориметрической системы. Калориметрическая система эксперимента LHCb играет важную роль в идентификации и измерении энергии гамма-квантов, электронов и адронов и выработке триггера нулевого уровня. Это особенно важно для исследования радиационных распадов B-мезонов, таких как $B_s \to \phi\gamma$, или конечных состояний с электронами и π^0, например, $B_d \to K^* e^+ e^-$. Сотрудники ИЯИ РАН занимались разработкой, изготовлением и измерением параметров детектирующих ячеек предливневого детектора на тестовых пучках с целью оптимизации их световыхода. Одновременно были разработаны конструктивные элементы – тонкостенные корпуса модулей и механическая система подвески предливневого детектора.

За время работы эксперимента между 2010 и 2013 гг. предливневый детектор показал устойчивую работу и полное соответствие проектным параметрам. В этот период накопления статистики сотрудники ИЯИ РАН принимали активное участие в эксплуатации установки, занимаясь контролем работоспособности предливневого детектора, дежурством в сменах и обработкой полученной информации.

Параллельно набору и обработке текущих данных эксперимент LHCb проводит подготовку к работе на модернизированном ускорителе LHC при большей энергии и светимости. Основная цель необходимой модернизации установки LHCb – обеспечение возможности работы на светимости до $2*10^{33}$/см^2/сек, что в 5 раз превышает достигнутый уровень. Для этого требуется модернизация электроники считывания всех подсистем и создание полностью гибкого программируемого триггера, что позволит улучшить эффективность отбора конечных адронных состояний в распадах B- и D-мезонов. Модернизированный детектор во второй фазе эксперимента будет способен за 10 лет набрать статистику около 50/фб$^{-1}$ интегральной светимости. В этой связи необходимо проведение модернизации системы идентификации частиц и трековой системы, основным вариантом которой является трекер на основе тонких сцинтилляционных волокон (SciFi), разработка которого была начата в 2011-2012 г.г. ИЯИ РАН совместно с другими российскими институтами и участниками из CERN и других групп принимают участие в разработке этого варианта трекера, в том числе в разработке технологии производства полномасштабных модулей и разработке фотоприемников на основе кремниевых фотоумножителей (SiPM).

6.2 Основные результаты

Основная цель эксперимента LHCb – исследование CP-нарушения и поиск Новой Физики в редких распадах B-мезонов. В 2014 году на ускорителе LHC продолжались плановые работы, в результате которых энергию пучков в 2015 г. планируется увеличить до 6.5 ТэВ. Эксперимент LHCb в 2014 г. продолжил работу в области обработки набранных данных (всего за 2011-2013 г.г. принято >3/fb интегральной светимости), получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе более точное измерение CP-нарушающей фазы ϕs в B_s^0 секторе, измерения угла унитарного треугольника матрицы смешивания, обнаружение CP-нарущения в распадах B^0s мезона, измерения CP ассиметрии в B_d секторе и ряд других.

Среди важнейших результатов, полученных LHCb в 2014 году можно выделить следующие:

Доложено (arXiv:1411.4849) об открытии двух новых частиц $\Xi_b^{'-}$ и Ξ_b^{*-}, предсказанных кварковой моделью, но не наблюдавшихся ранее. Обе частицы состоят из b-, s- и d- кварков и являются барионными резонансами.

Точное измерение CP нарушения в распадах $B_s^0 \to J/\psi KK$ и $B_s^0 \to J/\psi\pi\pi$ рассматривается как метод, наиболее чувствительный к вкладам Новой физики в CP нарушающую фазу ϕs в B_s^0 секторе. После обработки 3 фб$^{-1}$ данных получено

(arXiv:1411.3104, Phys. Lett. B 736 (2014) 186) наиболее точное значение в мире величины ϕs = -0.010 ± 0.039 rad, что совпадает с предсказаниями СМ.

Измерение угла γ унитарного треугольника матрицы смешивания Кабибо-Кобаяши-Москава: после обработки 3 фб$^{-1}$ данных $B_{(s)} \to D_{(s)} K^{(*)}$ получено [LHCb-CONF-2014-004] значение $\gamma = (72.9^{+9.2}_{-9.9})°$.

Новый результат измерения CP асимметрии в B_d секторе после обработки 3 фб$^{-1}$ данных $a^d_{sl} = (-0.02 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.30(\text{syst}))\%$ готовится к печати. Вместе с опубликованным раньше в Phys. Lett. B728 (2014) 607-615 значением $a^s_{sl} = (-0.06 \pm 0.50(\text{stat}) \pm 0.36(\text{syst}))\%$, эти результаты полностью согласуются с предсказанием СМ.

Тест лептонной универсальности, используя распады $B^+ \to K^+ \ell^+ \ell^-$, опубликован в Phys. Rev. Lett. 113, 151601 (2014). Значение отношения вероятностей распадов $B^+ \to K^+ \mu^+ \mu^-$ и $B^+ \to K^+ e^+ e^-$ найдено равным $0.745^{+0.090}_{-0.074}(\text{stat}) \pm 0.036(\text{syst})$. Этот результат является наиболее точным в мире и согласуется со СМ на уровне 2.6 σ.

Измерено время жизни состоящего из двух тяжелых кварков B_c мезона, используя полулептонные моды распада с J/ψ мезоном и мюоном с конечном состоянии. Результат τ=509±8±12 fs получен после обработки 2 фб$^{-1}$ данных и опубликован в Eur. Phys. J. C74 (2014) 2839. Теоретические предсказания пока не слишком точны для сравнения.

Опубликован (Phys. Rev. Lett. 112, 222002 (2014)) результат измерения экзотических свойств $Z(4430)^-$. Обработка данных на статистике 3 фб$^{-1}$ подтвердила первые наблюдения Belle, что это действительно частица с числами $J^P = 1^+$ с достоверностью 9.7σ. Минимальное содержание кварков может быть $c\underline{c}d\underline{u}$, - четырехкварковое состояние или 2 кварк + 2 антикварк, что будет первым наблюдаемым отклонением для существующих мезонов от стандартной кварк-антикварковой модели.

6.2.1 Исследование загрузочных характеристик фотоумножителей адронного калариметра

С остановкой ускорителя LHC в 2012 г. на ремонтно-восстановительные работы основными задачами всех экспериментов, использовавших пучки ускорителя, стали обработка накопленной статистики и обновление установок. За три года интенсивной работы появились как вышедшие из строя детали детекторов, так и компоненты, деградировавшие под действием высоких доз радиации. Замена или ремонт многих частей установок были невозможны из-за их недоступности в условиях нормальной эксплуатации. Доступ к таким частям потребовал бы переборки детектора с затратой очень большого времени и, соответственно, потерей пучкового времени. Другим фактором,

препятствующим своевременной замене деталей детекторов, является высокий уровень остаточной радиации некоторых компонентов.

Для калориметрической системы наиболее актуальной стала замена фотоумножителей (ФЭУ) адронного калориметра, показавших возрастание темнового тока и рост амплитуды импульсов с ростом среднего тока через фотоумножитель, пропорциональный интенсив-ности регистрируемых частиц. В течение 2014 г. была проведена замена ~300 ФЭУ на новые. В то же время, для выяснения причин ухода параметров снятых с детектора ФЭУ, с ними был проведен ряд измерений в разных условиях и с различными вариантами экранировки, заземления и т.д. Были проведены и измерения в атмосфере гелия для проверки на наличие микротрещин. Причин, вызывающих ухудшение параметров фото-умножителей, выявлено не было.

Обращение к фирме – изготовителю позволило выявить возможный источник ухудшения параметров ФЭУ – наличие постороннего вещества с внутренней стороны колбы фотоумножителя в области вывода электродов наружу. Это, однако, не объясняет появление таких ФЭУ на адронном калориметре, поскольку на электромагнитном используются такие же ФЭУ, а эффект ухудшения параметров отсутствует.

В связи с этим встал вопрос о критериях предварительного отбора новых фотоумножите-лей, предназначенных на замену. Анализ показал, что для ФЭУ, снятых с калориметра из-за ухудшения параметров, характерно возрастание амплитуды импульса при увеличении среднего анодного тока от нулевых значений до 10 мкА. Средний ток при этом обеспечи-вался подсветкой от дополнительного светодиода. Поэтому в качестве критерия отбора новых ФЭУ было выбрано отношение амплитуды импульса от светодиода при выключенной подсветке к амплитуде, соответсвующей среднему току 10 мкА.

Для измерений был собран стенд, показанный на Рис.1. Процедура измерений заключалась в измерении темнового тока ФЭУ после прогрева в течение ~20 мин, а также амплитуды с фотоумножителя до включения подсветки и спустя один час после. Отбирались ФЭУ, для которых отношение амплитуд изменялось не более чем на 5%.

Рисунок 1 – Общий вид стенда для измерения параметров фотоумножителей

Надёжность измерений контролировалась повторными измерениями выборочных ФЭУ и контролем за стабильностью среднего тока через фотоумножитель. Оказалось, что примерно для 10% ФЭУ наблюдались флуктуации анодного тока и, соответственно, отсутствовала повторяемость измерений. Поэтому было принято решение повысить качество измерений, обеспечив непрерывный контроль за изменениями амплитуды фотоумножителя. Стенд был расширен добавлением системы регистрации на базе компьютера, каркаса VME, электроникой в стандарте VME и соответствующим программным обеспечением.

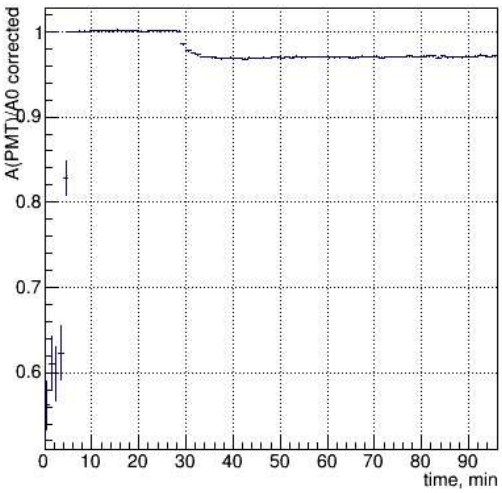


Рисунок 2 - Типичная амплитудная характеристика отобранного ФЭУ.

На Рис.2 показано изменение отношения амплитуд хорошего ФЭУ. При включении подсветки через ~20 мин после прогрева оно уменьшается на 3% и остаётся стабильной. Отбирались ФЭУ, относительный уход амплитуды которых не превышал ±5%.

Около 90% фотоумножителей уложились в заданный интервал отклонения, в то же время были обнаружены ФЭУ с флуктуациями амплитуды и с выбросами, характерными для процессов пробоя или утечек (Рис.2). Поскольку в измерениях использовался один и тот же сменный делитель Кокрофт-Уолтона, можно предположить, что эти процессы происходят внутри колбы фотоумножителя.

Более длительные измерения в течение ~10 часов показали медленный дрейф амплитуды на 3%, как показано на Рис.3. Такой дрейф можно объяснить прогревом фотоумножителя и его динодной системы, хотя и требует проверки. Планируется провести дополнительные измерения, обеспечив хорошую термоизоляцию ФЭУ и окружающих элементов.

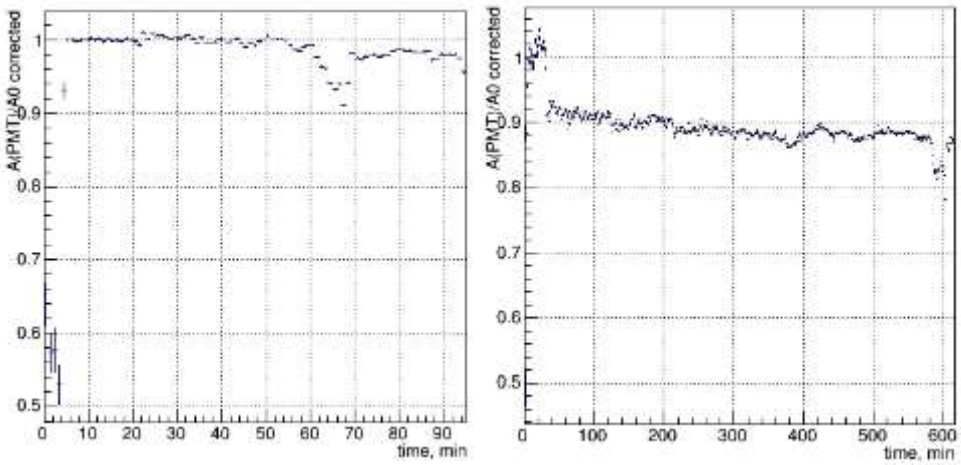


Рисунок 3 - Зависимость амплитуды от времени для забракованных фотоумножителей.

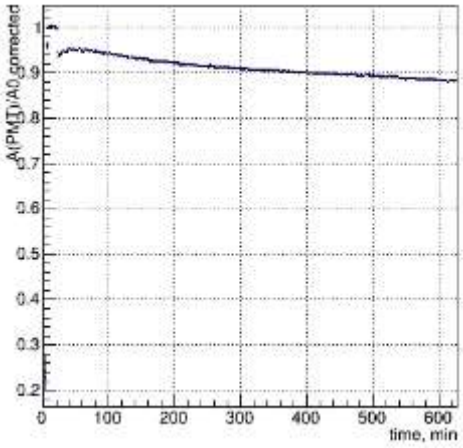


Рисунок 4 - Временной дрейф амплитуды фотоумножителя за ~10 часов.

Отбор качественных фотоумножителей для адронного калориметра является чрезвычайно важным для эксперимента LHCb, поскольку информация с него используется как для идентификации адронов, так и для выработки триггера. Нестабильность параметров адронного калориметра ведёт, в конечном счете, к ухудшению качества данных.

Для поиска причин ухудшения параметров ФЭУ в 2015 г. при участии сотрудников ИЯИ РАН будет создан специализированный стенд, который позволит контролировать темновой ток и амплитуду ФЭУ в течение длительного времени при разных условиях засветки. Поскольку измерения стабильности занимают длительное время, стенд будет сделан многоканальным, с одновременным измерением параметров 12 ФЭУ. Стенд планируется использовать для проверки новых фотоумножителей, предназначенных на замену, покупка которых предполагается в 2015 г. в количестве 1000 шт.

6.2.2 Участие ИЯИ РАН в создании волоконно-оптического координатного детектора LHCb

Параллельно с обработкой данных и методическими работами на детекторе в 2014 г. коллаборация LHCb проводила работы по подготовке модернизации установки для работы на повышенной энергии и светимости после 2018 г. На современном этапе модернизации установки группа ИЯИ РАН участвует в разработке новой трековой системы на основе сцинтилляционных волокон, в том числе в разработке новых фотоприемников – кремниевых фотоумножителей с уникальными характеристиками.

Основные цели и новые направления для производства прототипов SiPM (KETEK) в 2013-2014 г.:

- Повышение геометрической эффективности SiPM за счет увеличения размеров пикселей до 60 μм × 62.5 μм (GE=69.6%) и 82.5 μм × 62.5 μм (GE=73.5%);

- Увеличение размеров SiPM до необходимых: 64 канала/чип и 108 пикселей/канал для варианта с 6 рядами волокон;

- Для улучшения чувствительности к зеленому свету и повышения радиационной стойкости планируется попробовать варианты структуры с разной толщиной эпитаксиального слоя и глубиной залегания p-n перехода;

- Уменьшение времени восстановления пикселя за счет большей толщины структуры (меньшей емкости пикселя) и уменьшения гасящего сопротивления RQ. Учитывается также зависимость RQ(T);

- Применение новых материалов для канавок между пикселями в целях улучшения светоизоляции и уменьшения оптической связи.

Основные геометрические и электрические параметры приведены на рисунке и в таблице ниже. Всего в производство было запущено 12 пластин с разными вариантами структуры, при этом на каждой пластине предусмотрены варианты с разной геометрией чипов, как показано на рисунке.

Splitplan CERN 05 - LHCB Batch												
	Reference		Opaque y-line trench			Epitaxy				New Technology		
Wafer Nr.	C4-1	C4-2	C4-3	C4-4	C4-5	C4-6	C4-7	C4-8	C4-9	C4-10	C4-11	C4-12
Substrate												
Epitaxial Layer						0.4 μm	0.4 μm	0.6 μm	0.8 μm			0.4 μm
Deep P		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Opaque y-line trench			X	X	X		X				X	
Target RQ Value	0.5 MΩ D2	0.3 MΩ D1	0.5 MΩ D2	0.3 MΩ D1	0.5 MΩ D2	0.3 MΩ D1	0.5 MΩ D2	0.5 MΩ D2	0.5 MΩ D2	0.3 MΩ D1	0.5 MΩ D2	0.5 MΩ D2
Polyres 40T 10 dies measured	492 kΩ	288 kΩ	522 kΩ	311 kΩ	560 kΩ	252 kΩ	611 kΩ	475 kΩ	479 kΩ	238 kΩ	483 kΩ	448 kΩ

Таблица 1 – Приведены параметры изготовления опытной партии из 12 пластин с различными структурами лавинной зоны, разными величинами гасящего сопротивления и вариантами конструкции канавок.

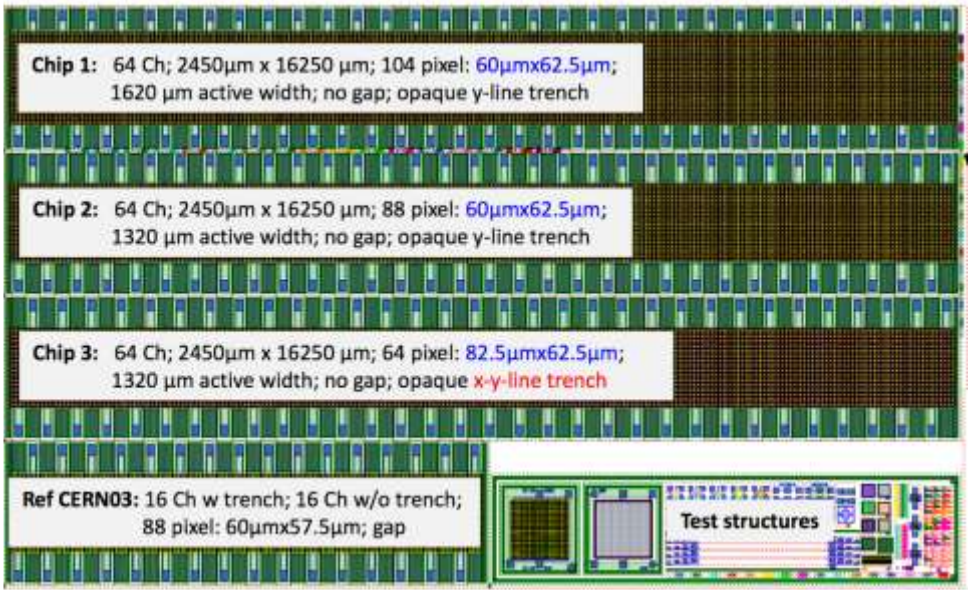


Рисунок 5 – Показаны варианты чипов с разными геометрическими параметрами и размерами ячеек, изготовленные на каждой пластине.

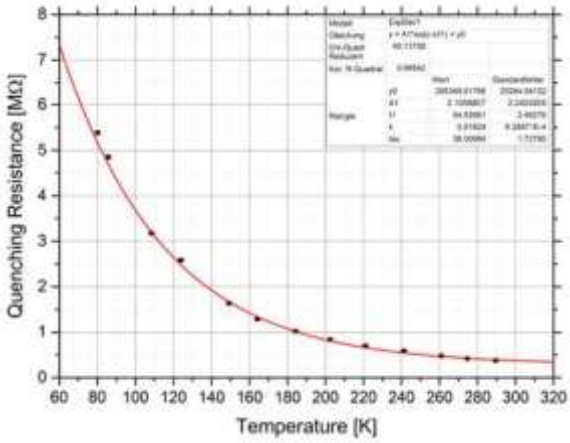
Исследования пареметров произведенных чипов включали в себя измерения робойного напряжения, коэффициентов оптической связи, проверку работоспособности всех каналов чипа, измерение коэффициента усиления и чувствительности каналов (PDE, эффективности регистрации фотона) в зависимости от длины волны.

Wafer	Bd Voltage [V]	X-talk(3.5 OV)	X-talk (3.5 OV)	op channel	Gain(3.5 OV)	PDE(3.5 OV)
w1c2	~ 23.4	~ 7%	~ 6%	49/64	8.27E+06	~41 %
w1c3	~ 23.6	~ 9%	~ 8%	54/64	1.21E+07	~43 %
w1c2_fw	"	"	"	62/64	"	~42 %
w1c3_fw	"	"	"	62/64	"	~44 %
w2c2_fw	~ 27.0	~ 7%	~ 5.7%	57/64	8.27E+06	~40 %
w2c3_fw	~ 27.0	~ 7%	~ 7%	58/64	1.00E+07	~43 %
w3c2*	XXXXX	XXXXX	XXXXX	7/64	XXXXXXXXX	XXXXXXXXX
w3c3*	~ 25.0	~ 6%	~ 1.4%	28/64	1.22E+07	~40%
w3c2_fw	~ 25.0	~ 5%	~ 3.5%	60/64	8.15E+06	~39%
w3c3_fw	"	"	"	47/64	"	~41%
w4c2_fw*	~ 25.0	~ 5%	~ 5%	57/64	8.12E+06	~38%
w4c3_fw*	~ 25.0	~ 3%	~ 1.3%	62/64	1.15E+07	~40%
w7c2*	~ 32.4	~ 5.5 %	~ 5%	49/64	6.5E+06	~38%
w7c3*	~ 32.4	~ 3%	~1.6%	44/64	9.4E+06	~40%
w7c2_fw	"	"	"	49/64	"	~39%
w7c3_fw	"	"	"	30/64	"	~40%
w8c2	~ 36.4	~ 8%	~11%	59/64	5.8E+06	~33%
w8c3	~ 36.4	~ 9%	~11%	58/64	8.2E+06	~35%
w9c2	~ 40.5	~ 7%	~ 9.5%	58/64	6.4E+06	~30%
w9c3	~ 40.5	~ 8.5%	~ 9.5%	61/64	1.5E+07	~21%
w11c2	XXXXX	XXXXX	XXXXX	48/64	XXXXXXXX	XXXXXXXX
w11c3	XXXXX	XXXXX	XXXXX	36/64	XXXXXXXX	XXXXXXXX

Таблица 2 – Приведены основные результаты выборочных измерений опытных образцов 64-канальных чипов фотодиодов: напряжение пробоя, коэффициент оптической связи (два метода), количество работающих каналов, коэффициент усиления и эффективность регистрации фотона.

6.2.3 Измерение гасящего полирезистора новых образцов SiPM

Известно, что величина гасящего резистора Rq в структуре ячейки SiPM играет важную роль для формирования длительности сигнала и устойчивости работы SiPM. При этом в зависимости от выбранной технологии производства возможна зависимость от температуры. Поскольку для уменьшения шумов рабочая температура SiPM в волоконном трекере LHCb должна быть достаточно низкой (-40 .. -50 C), то изменение значения Rq в интервале температур от +20C до – 50C играет существенную роль. Производители SiPM работают над оптимизацией технологии резистора, чтобы минимизировать температурный эффект. Ниже приведены результаты измерения величины резистора ячейки SiPM фирмы KETEK для партии детекторов, произведенных для LHCb в 2014 г.



T [K]	t [°C]	RQ [Ohm]	Factor
300	26.9	3.74E+05	0.97
293.15	20.0	3.86E+05	1.00
290	16.9	3.92E+05	1.02
280	6.9	4.13E+05	1.07
273.15	0.0	4.30E+05	1.11
270	-3.1	4.38E+05	1.14
260	-13.2	4.69E+05	1.22
250	-23.2	5.06E+05	1.31
240	-33.2	5.50E+05	1.43
233.15	-40.0	5.85E+05	1.52
230	-43.2	6.03E+05	1.56
220	-53.2	6.66E+05	1.73
210	-63.2	7.43E+05	1.93
200	-73.2	8.34E+05	2.16

Рисунок 6 – Показаны результаты измерения величины гасящего сопротивления в зависимости от температуры чипа. При изменении температуры от комнатной до рабочей (-40C) сопротивление увеличивается в 1.5 раза.

Из приведенной таблицы видно, что величина резистора возрастает в интервале от 293 К (+20C) до 233 К (-40C) примерно в 1.5 раза. Это позволяет оптимизировать величину резистора при комнатной температуре таким образом, чтобы получить необходимые параметры длительности сигнала при рабочей температуре.

6.2.4 Результаты измерений опытной партии 64-канальных чипов фирмы КЕТЕК

Были получены чипы, разработанные с учетом новых требований LHCb, направленных на улучшение базовых параметров SiPM: коэффициент оптической связи менее 5%, улучшение чувствительности в зеленой области спектра, 64 канала в одном чипе с дальнейшей разработкой упаковки для чипа. Производителем было предложено несколько вариантов структуры для улучшения параметров, в том числе при производстве пластин были предусмотрены разные варианты геометрии ячейки. Для ячеек с большим размером можно ожидать увеличенного коэффициента полезной площади.

На первом этапе измерений были произведены выборочные проверки зависимости шумового счета от порога (x_talk), проверка однородности напряжения пробоя V_BD, температурный коэффициент шума и чувствительность PDE. Предварительные результаты можно изложить в следующем виде:

- Однородность напряжения пробоя V_BD каналов в одном чипе превосходная: разброс не превышает 100 мВ. Это обеспечит незначительный разброс усиления и позволяет не производить индивидуальную подстройку напряжений на каналах.

- Оптическая связь была существенно уменьшена за счет применения 1 μm канавок между пикселями с наполнением непрозрачным содержащим вольфрам материалом. Измеренный коэффициент оптической связи оказался менее 5%

По результатам проведенных измерений предварительно принято решение, что основные параметры разработанных фотодиодов удовлетворяют требованиям эксперимента, но ряд характеристик, таких как выход годных каналов и эффективность регистрации зеленого света, должны быть улучшены в будущих опытных партиях.

6.2 Заключение

Группа ИЯИ РАН полностью выполнила все поставленные задачи по участию в реализации экспериментальной программы LHCb в 2014 г. Эксперимент LHCb в 2014 г. продолжил работу в области обработки набранных данных (всего за 2011-2013 г.г. принято >3/fb интегральной светимости), получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе наиболее точное в мире измерение CP-нарушающей фазы $\phi s = -0.010 \pm 0.039$ rad в B_s^0 секторе, измерение угла $\gamma=(72.9^{+9.2}_{-9.9})°$ унитарного треугольника матрицы смешивания, измерения CP ассиметрии в B_d секторе и ряд других.

На этапе создания установки LHCb группа ИЯИ РАН разработала и изготовила предливневый детектор, составляющую часть калориметрической системы. Как показал весь опыт эксплуатации, конструкция и структура предливневого детектора является надежной и удовлетворяет поставленным требованиям эксперимента. На сегодняшний день все 12032 ячейки работоспособны. Радиационные повреждения после набора почти 3/fb интегральной светимости и естественное старение со времени производства (2005-2006 гг) элементов детектора малозаметны и не оказывают существенного влияния на общие характеристики. С точки зрения операционной эксплуатации общая эффективность детектора близка к 100%. Во время плановой остановки ускорителя в 2014 г. сотрудниками ИЯИ РАН проведены работы по проверке и замене неисправных элементов калориметрической системы: исследование загрузочных характеристик и отбор фотоумножителей, создан стенд для проверки параметров и измерения загрузочных параметров фотоумножителей. В рамках разработки новой трековой системы LHCb на основе сцинтилляционных волокон совместно с фирмами KETEK и HAMAMATSU разработаны новые прототипы многоканальных фотоприемников на основе кремниевых лавинных фотодиодов с улучшенными характеристиками. Коэффициент оптической связи уменьшен до 5% (V_{ov} = 3.5 В) за счет применения светонепроницаемого материала в канавках. Однородность усиления удовлетворяет требованиям эксперимента. Несмотря на достигнутые результаты, работы по увеличению эффективности регистрации зеленого света будут продолжены.

6.2 Список основных публикаций LHCb в 2014 г.

1 LHCb Collaboration, “Precision luminosity measurements at LHCb”, JINST 9 (2014) 12005

2 LHCb Collaboration, “Precision measurement of the mass and lifetime of the Xi_b^- baryon”, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 242002

3 LHCb Collaboration, “Measurement of the CP-violating phase ϕ_s in $\bar{B}^{0}_{s}\to D_{s}^{+}D_{s}^{-}$ decays”, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 21, 211801

4 LHCb Collaboration, “Measurement of the $\chi_b(3P)$ mass and of the relative rate of $\chi_{b1}(1P)$ and $\chi_{b2}(1P)$ production”, JHEP 1410 (2014) 88

5 LHCb Collaboration, “Measurements of $C\!P$ violation in the three-body phase space of charmless $B^{\pm}$ decays”, Phys. Rev. D90 (2014) 112004

6 LHCb Collaboration, “Measurement of the forward W boson cross-section in pp collisions at √ s =7TeV”, JHEP 12 (2014) 079

7 LHCb Collaboration, “Measurement of the CKM angle γ using $B^\pm \to D K^\pm$ with $D \to K^0_{\rm S} \pi^+\pi^-, K^0_{\rm S} K^+ K^-$ decays”, JHEP 1410 (2014) 97

8 LHCb Collaboration, “Search for CP violation using T-odd correlations in $D^0 \to K^+K^-\pi^+\pi^-$ decays”, JHEP 1410 (2014) 5

9 LHCb Collaboration, “First observations of the rare decays $B^+\!\rightarrow K^+\pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$ and $B^+\rightarrow\phi K^+\mu^+\mu^-$”, JHEP 1410 (2014) 064

10 LHCb Collaboration, “Measurement of $C\!P$ asymmetries in the decays $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ and $B^+ \rightarrow K^{+} \mu^+ \mu^-$”, JHEP 1409 (2014) 177

11 LHCb Collaboration, “First observation of a baryonic B_c^+ decay”, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 15, 152003

12 LHCb Collaboration, “Measurement of the $\bar{B}^0-B^0$ and $\bar{B}^0_s-B^0_s$ production asymmetries in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV”, Phys. Lett. B739 (2014) 218-228

13 LHCb Collaboration, “Measurement of CP violation parameters in B0->D K*0 decays”, Phys. Rev. D90 (2014) 112002

14 LHCb Collaboration, “ Study of $\chi _{{\mathrm {b}}}$ meson production in $\mathrm {p} $ $\mathrm {p} $ collisions at $\sqrt{s}=7$ and $8{\mathrm {\,TeV}} $ and observation of the decay $\chi _{{\mathrm {b}}}\mathrm {(3P)} \rightarrow \Upsilon \mathrm {(3S)} {\gamma } $”, Eur. Phys. J, C74 (2014) 10, 3092

15 LHCb Collaboration, “Dalitz plot analysis of $B_s^0 \rightarrow \bar{D}^0 K^- \pi^+$ decays”, Phys. Rev. D90 (2014) 7, 072003

16 LHCb Collaboration, “Observation of $B^0_s \to K^{*\pm}K^\mp$ and evidence for $B^0_s \to K^{*-}\pi^+$ decays”, New J. Phys, 16 (2014) 123001

17 LHCb Collaboration, “Observation of overlapping spin-1 and spin-3 $\bar{D}^0 K^-$ resonances at mass $2,86 {\rm GeV}/c^2$”, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 162001

18 LHCb Collaboration, “Measurement of CP violation and constraints on the CKM angle γ in $B^{\pm}\rightarrow D K^{\pm}$ with $D \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ decays”, Nucl. Phys. B888 (2014) 169-193

19 LHCb Collaboration, “Measurement of CP asymmetry in $B^0_s \rightarrow D^{\mp}_s K^{\pm}$ decays”, JHEP 1411 (2014) 060

20 LHCb Collaboration, “Observation of charmonium pairs produced exclusively in pp collisions”, J. Phys, G41 (2014) 11, 115002

21 LHCb Collaboration, “Measurement of the B_s^0 meson lifetime in $D_s^+\pi^-$ decays”, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 172001

22 LHCb Collaboration, “Evidence for CP Violation in $B^+\to p \overline p K^+$ Decays”, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 14, 141801

23 LHCb Collaboration, “Measurement of CP violation in $B_s^0 \to \phi \phi$ decays”, Phys. Rev. D90 (2014) 5, 052011

24 LHCb Collaboration, “Measurement of the ratio of B_c^+ branching fractions to $J/\psi\pi^+$ and $J/\psi\mu^+\nu_\mu$”, Phys. Rev. D90 (2014) 3, 032009

25 LHCb Collaboration, “Effective lifetime measurements in the $B_s^0 → K^+K^− , B^0 → K^+π^−$ and $B_s^0 → π^+K^−$ decays”, Phys. Lett. B736 (2014) 446-454

26 LHCb Collaboration, “Test of lepton universality using $B^{+}\rightarrow K^{+}\ell^{+}\ell^{-}$ decays”, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 15, 151601

27 LHCb Collaboration, “First measurement of the charge asymmetry in beauty-quark pair production”, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 8, 082003

28 LHCb Collaboration, “Observation of Z production in proton-lead collisions at LHCb”, JHEP 1409 (2014) 030

29 LHCb Collaboration, “ Search for CP violation in $D^{\pm}\rightarrow K^0_{\mathrm{S}} K^{\pm}$ and $D^{\pm}_{s}\rightarrow K^0_{\mathrm{S}} \pi^{\pm}$ decays”, JHEP 1410 (2014) 25

30 LHCb Collaboration, “Observation of the $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$ decay”, JHEP 1407 (2014) 103

31 LHCb Collaboration, “Precision measurement of the mass and lifetime of the Ξ_b^0 baryon”, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 032001

32 LHCb Collaboration, “Study of the kinematic dependences of Λ_{b}^{0} production in pp collisions and a measurement of the $\Lambda_{b}^{0} \to \Lambda_{c}^{+}$ π^{-} branching fraction”, JHEP 1408 (2014) 143

33 LHCb Collaboration, “Study of Υ production and cold nuclear matter effects in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=5 TeV”, JHEP 1407 (2014) 094

34 LHCb Collaboration, “Measurement of the CP-violating phase ϕ_s in $\overline{B}^0_s\rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$ decays”, Phys. Lett. B736 (2014) 186

35 LHCb Collaboration, “Observation of the $B_s^0 \to J/\psi K_s^0 K^\pm \pi^\mp$ decay”, JHEP 1407 (2014) 140

36 LHCb Collaboration, “Measurement of CP asymmetry in $D^0 \rightarrow K^- K^+$ and $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ decays”, JHEP 1407 (2014) 041

37 LHCb Collaboration, “Measurement of the Ξ_b^- and Ω_b^- baryon lifetimes”, Phys. Lett. B736 (2014) 154-162

38 LHCb Collaboration, “Measurement of the resonant and CP components in $\overline{B}^0\to J/\psi \pi^+\pi^-$ decays”, Phys. Rev. D90 (2014) 1, 012003

39 LHCb Collaboration, “Observation of the resonant character of the $Z(4430)^-$ state”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 22, 222002

40 LHCb Collaboration, “Evidence for the decay $B_c^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$”, JHEP 1405 (2014) 148

41 LHCb Collaboration, “Evidence for the decay $X(3872)\rightarrow\psi(2S)\gamma$”, Nucl. Phys. B886 (2014) 665-680

42 LHCb Collaboration, “Angular analysis of charged and neutral $B \to K \mu^+\mu^-$ decays”, JHEP 1405 (2014) 082

43 LHCb Collaboration, “Differential branching fractions and isospin asymmetries of $B \to K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ decays”, JHEP 1406 (2014) 133

44 LHCb Collaboration, “Study of beauty hadron decays into pairs of charm hadrons”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 202001

45 LHCb Collaboration, “Measurement of polarization amplitudes and CP asymmetries in $B^0 \to \phi K^*(892)^0$”, JHEP 1405 (2014) 069

46 LHCb Collaboration, “Measurement of $\psi(2S)$ polarisation in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV”, Eur. Phys. J, C74 (2014) 5, 2872

47 LHCb Collaboration, “Observation of Photon Polarization in the b→sγ Transition”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 16, 161801

48 LHCb Collaboration, “Measurement of resonant and CP components in $\bar{B}_s^0\to J/\psi\pi^+\pi^-$ decays”, Phys. Rev. D89 (2014) 9, 092006

49 LHCb Collaboration, “Precision measurement of the ratio of the Λ^0_b to $\overline{B}^0$ lifetimes”, Phys. Lett. B734 (2014) 122

50 LHCb Collaboration, “Measurement of charged particle multiplicities and densities in pp collisions at $\sqrt{s}=7\;$TeV in the forward region”, Eur. Phys. J, C74 (2014) 5, 2888

51 NA62 Collaboration, “Study of the $K^\pm\to\pi^\pm\gamma\gamma$ decay by the NA62 experiment”, Phys. Lett. B732 (2014) 65-74

52 LHCb Collaboration, “A study of CP violation in $B^{\pm} \to DK^{\pm}$ and $B^{\pm} \to D\pi^{\pm}$ decays with $D \to K_S^0K^{\pm}\pi^{\mp}$ final states”, Phys. Lett. B733 (2014) 36-45

53 LHCb Collaboration, “Measurements of the B^+, B^0, B^0_s meson and Λ^0_b baryon lifetimes”, JHEP 1404 (2014) 114

54 LHCb Collaboration, “Measurement of Υ production in pp collisions at $\sqrt{s}=2,76$ TeV”, Eur. Phys. J, C74 (2014) 4, 2835
55 LHCb Collaboration, “Searches for Λ^0_{b} and Ξ^{0}_{b} decays to $K^0_{\rm S} p \pi^{-}$ and $K^0_{\rm S}p K^{-}$ final states with first observation of the $\Lambda^0_{b} \rightarrow K^0_{\rm S}p \pi^{-}$ decay”, JHEP 1404 (2014) 087
56 LHCb Collaboration, “Measurement of the B_c^+ meson lifetime using $B_c^+ \to J\!/\!\psi \mu^+ \nu_{\mu} X$ decays”, Eur. Phys. J, C74 (2014) 5, 2839
57 LHCb Collaboration, “Search for Majorana neutrinos in $B^- \to \pi^+\mu^-\mu^-$ decays”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 13, 131802
58 LHCb Collaboration, “Updated measurements of exclusive J/ψ and ψ(2S) production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV”, J. Phys, G41 (2014) 055002
59 LHCb Collaboration, “Observation of associated production of a Z boson with a D meson in the forward region”, JHEP 1404 (2014) 091
60 LHCb Collaboration, “Measurement of the $\bar{B}_s^0\to D_s^-D_s^+$ and $\bar{B}_s^0\to D^-D_s^+$ effective lifetimes”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 11, 111802
61 LHCb Collaboration, “Studies of beauty baryon decays to $D^0 p h^-$ and $\Lambda_c^+ h^-$ final states”, Phys. Rev. D89 (2014) 3, 032001
62 LHCb Collaboration, “Study of forward Z + jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, JHEP 1401 (2014) 033
63 LHCb Collaboration, “Search for CP violation in the decay $D^+ \to \pi^-\pi^+\pi^+$”, Phys. Lett. B728 (2014) 585-595
64 LHCb Collaboration, “Measurements of indirect CP asymmetries in $D^0\to K^-K^+$ and $D^0\to\pi^-\pi^+$ decays”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 4, 041801
65 LHCb Collaboration, “Measurement of CP violation in the phase space of $B^{\pm} \rightarrow K^{+} K^{-} \pi^{\pm}$ and $B^{\pm} \rightarrow \pi^{+} \pi^{-} \pi^{\pm}$ decays”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 1, 011801
66 LHCb Collaboration, “Search for the decay $D^0 \to \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$”, Phys. Lett. B728 (2014) 234-243
67 LHCb Collaboration, “Observation of $\bar{B}_{(s)} \to J/\psi f_1$(1285) Decays and Measurement of the f_1(1285) Mixing Angle”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 9, 091802
68 LHCb Collaboration, “Measurement of the charge asymmetry in $B^{\pm}\rightarrow \phi K^{\pm}$ and search for $B^{\pm}\rightarrow \phi \pi^{\pm}$ decays”, Phys. Lett. B728 (2014) 85-94
69 LHCb Collaboration, “Study of J/ψ production and cold nuclear matter effects in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5$ TeV”, JHEP 1402 (2014) 072
70 The LHCb Collaboration, “Measurement of the flavour-specific CP-violating asymmetry a_{sl}^s in B_s^0 decays”, Phys. Lett. B728 (2014) 607-615

6.3 Развитие Grid технологий

Руководитель работ зав.сект. Л.И.Степанова.

6.3 Введение

Развитие исследований в физике высоких энергий, требует совместной работы многих организаций по обработке большого объёма данных в относительно короткие сроки. Для этого необходимы географически распределенные вычислительные системы способные передавать и принимать данные порядка сотен терабайт в сутки, одновременно обрабатывать сотни тысяч задач и хранить сотни петабайт данных.

Наиболее впечатляющие результаты по организации глобальной инфраструктуры распределенных вычислений получены в проекте WLCG (Worldwide LHC Computing Grid или Всемирный грид для Большого адронного коллайдера) в ЦЕРНе при обработке данных с экспериментов на LHC. На семинаре 4 июля 2012 года, посвященном наблюдению бозона Хигса, директор ЦЕРНа Р.Хойер дал высокую оценку грид технологиям и их значимости для мировой науки. Без организации грид инфраструктуры на LHC было бы невозможно обрабатывать и хранить колоссальный объём данных, поступающих с коллайдера, а значит и совершать научные открытия.

Суть распределенной модели архитектуры компьютерной системы состоит в том, что весь объем информации с детекторов БАК после обработки в реальном времени и первичной реконструкции (восстановления треков частиц, их импульсов и других характеристик из хаотического набора сигналов от различных регистрирующих систем) должен направляться для дальнейшей обработки и анализа в региональные центры разных уровней или ярусов (Tier's): Tier0 (CERN) -> Tier1 -> Tier2 -> Tier3 -> компьютеры пользователей. Уровни различаются по масштабу ресурсов (сетевые, вычислительные, дисковые, архивные) и по выполняемым функциям.

6.3 Основные результаты

В ИЯИ создан региональный центр уровня Tier2 (Ru-Troitsk-INR-LCG2), выполняемыми функциями которого являются репликация и хранение наборов анализируемых событий, моделирование, анализ экспериментов CMS, ALICE, LHCB на Большом адронном коллайдере

Сайт ИЯИ Ru-Troitsk-INR-LCG2 обеспечивает в инфраструктуре WLCG/EGEE (Wold-Wide LHC Computing GRID/Enabling Grids for E-sciencE) как базовые сервисы (службы) грид: Berkley DB Information Index (top level BDII), site BDII, Computing Element (CREAMCE), Workload Management System (WMS), Logging&Bookkeeping Service (LB), Accounting Processor for Event Logs (APEL), Storage Element (SE), User Interface (UI)); так и специализированные грид-сервисы: VO boxes для ALICE, CMS , Storage Element типа

XROOTD для ALICE, Frontier – сервис кэширования доступа к центральным базам и глобальной файловой системе CVMFS. Для доступа к программному обеспечению виртуальных организаций установлена глобальная файловая система CVMFS. Установлена и настроена служба переключения пользователей в задачах-пилотах — GLEXEC. Рабочие узлы связаны по локальной сети, базирующейся на 1 гигабитной структуре.

Для передачи данных эксперимента CMS установлена система PhEDEx (Physics Event Data Export). Система PhEDEx имеет отличный мониторинг и поисковые сервисы. Программная среда CMS называется CMSSW. Релизы CMSSW автоматически загружаются в файловой системе CVMFS (/cvmfs/cms.cern.ch)

Запуск задач ALICE осуществляется посредством системы AliEn (ALICE Environment). Релизы программного обеспечения ALICE находятся в файловой системе CVMFS (/cvmfs/alice.cern.ch)

Программное обеспечение LHCB находятся в файловой системе CVMFS (/cvmfs/lhcb.cern/ch)

Ресурсы ИЯИ грид кластера в 2014г.

Диски 353 TB

Процессоры 344 ядер 4398 HEP-SPEC06

Запрашиваемые ресурсы эксперимента CMS для сайта уровня Tier2 на 2015г.

8700 HEP-SPEC06 процессорных ресурсов

551TB дискового пространства

Важнейшие результаты, полученные в 2012 – 2014 гг: Основные особенности полученного результата: полное функциональное и операционное интегрирование в глобальную грид систему WLCG по обработке и распределенному анализу данных экспериментов БАК кластера ИЯИ РАН уровня Tier2.

Грид-кластер ИЯИ РАН выведен на производственный уровень по уровню средней загрузки заданиями, стабильности работы грид сервисов, скорости и стабильности обмена данными с центрами уровня Tier1 глобальной грид системы WLCG

Поставленные перед научно-исследовательской работой задачи полностью выполнены

6.3 Основные публикации

Созданы следующие тесты WLCG/EGEE сервисов

1 MyProxy тесты. MyProxy предоставляет решение для делегирования полномочий GRID порталов, позволяет аутентификацию GRID услуги от имени пользователя: https://github.com/italiangrid/org.glite.wms/tree/master/org.glite.testsuites.ctb/WMS/WMS-api/python

2 Хранение и управление данными тесты (https://www.gridpp.ac.uk/wiki/Storage_and_Data_Management_Testing) dCache-srm-client тесты. dCache-srm-client поддерживает большое количество dCache-srm операций, основанных на одном Java приложении https://svnweb.cern.ch/trac/lcgdm/changeset/4307/testing/trunk/unstable/dCache-srm-client/

DMLite (плагин основанный на библиотеке для доступа и хранения данных) Python Unit тесты https://svnweb.cern.ch/trac/lcgdm/browser/dmlite/trunk/tests/python

7 Лаборатория физики элементарных частиц

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Руководитель работ к.ф.-м.н. А.Ю.Поляруш.

Измерение распада $K+ \rightarrow \pi+\nu\nu$ в эксперименте NA62.

Эксперимент по исследованию редких распадов каонов эксперимент ОКА, сотрудничество ИЯИ-ИФВЭ.

Разработка конструкции нового годоскопа заряженных частиц. Исследование характеристик прототипов электроники детектора NA62 на тестовых пучках ускорителя и космических мюонах.

Экспериментальное исследование редких и запрещённых распадов заряженных и нейтральных каонов и пионов.

Исследование нарушения дискретных симметрий с использованием интенсивных пучков остановленных положительных каонов.

7.1 Эксперимент по исследованию редких распадов каонов эксперимент ОКА, сотрудничество ИЯИ-ИФВЭ

Модернизация установки ОКА. Завершено создание 120 модулей нового адронного калориметра. Все модули установлены в зоне установки. Изготовлены 240 портативных источников питания типа Кокрофт-Уолтон для ФЭУ адронного калориметра. В ходе ноябрьского сеанса на ускорителе записали несколько суток некоторое число экспозиций областей ГДА. Он-лайн анализ показал, что даже половинки новых модулей в 4-5 раз лучше по световыходу, чем целые модули старого ГДА. Станция майларовых дрейфовых трубок смонтирована в зоне установки.

Обработка ранее набранной статистики. Завершена реконструкция декабрьского сеанса 2012 г. и апрельского сеанса 2013 г. На части статистики 2012 г. (~6 миллионов распадов) получены предварительные результаты по измерению параметров формфакторов распада Ke3: измерен средний наклон векторного форм-фактора , который находится в согласии с предсказаниями Киральной Пертурбативной Теории (χPT). Измерен также коэффициент при квадратичном члене форм-фактора.

На статистике сеанса 2012 г. проведено исследование когерентного рождения $K+\pi0$ системы на ядрах меди при импульсе пучка 17.7 ГэВ. Проведено выделение когерентного

рождения K+ π0- системы на ядрах меди. Определено сечение этого процесса для области K* - мезона. Наблюдается когерентное образование K+ π0 - системы за счет кулоновского, сильного взаимодействий и интерференции между ними. Определено сечение кулоновского рождения в области K*, также получена оценка на фазу между кулоновской и сильной амплитудами.

Проведение сеанса измерений на установке ОКА. В ноябрьском сеансе 2014 г. Были выполнены следующие работы: Включение всей аппаратуры установки. Испытание новой аппаратуры. Была успешно установлена, включена и подробно исследована новая станция майларовых дрейфовых трубок. Было записано достаточное количество событий для подробного исследования характеристик трубок при разных напряжениях. Проведено облучение нового адронного калориметра на пучке мюонов. Измерен отклик башен калориметра на мюонах.

7.2 Измерение распада $K^+ \to \pi^+\nu\nu$ в эксперименте NA62

Завершение методических работ по выбору базовой ячейки годоскопа заряженных частиц CHOD. Были изготовлены и изучены на стенде космических мюонов новые прототипы ячеек годоскопа заряженных частиц. Получены результаты измерения временного разрешения прототипов счётчиков для нового падового годоскопа заряженных частиц установки NA62. Изучены прототипы сцинтилляционных счётчиков размерами 90 × 90 мм, 100 × 100 мм, 150 × 150 мм, 180 × 100 мм и 270 × 100 мм. Рассмотрены варианты прямого светосбора с грани и с угла сцинтиллятора, а также светосбор с помощью спектросмещающего волокна. В качестве фотодетекторов использовались кремниевые фотодиоды производства ЦПТА и SensL, компактный фотоэлектронный умножитель (ф.э.у.) R7400U и в качестве эталонного – ф.э.у. R7899_20 с хорошей квантовой эффективностью в зеленой области света. Измерения проводились на космических мюонах и пучковом гало 21 канала в зоне установки ОКА. Полученное усредненное по площади временное разрешение для ячейки 100 × 100 мм составило 590 ± 10 пс при считывании волокнами и 260 ± 25 пс для варианта прямого светосбора с грани сцинтиллятора.

Подготовка производства сцинтиллятора для годоскопа заряженных частиц CHOD. В рамках подготовки массового производства сцинтиллятора изготовлено 20 счётчиков по полной технологии. Счётчики были отправлены в ЦЕРН и смонтированы в виде прототипа годоскопа заряженных частиц.

Участие в проведении первого сеанса на установке NA-62. В октябре-декабре на выведенном пучке SPS был проведен первый сеанс на установке NA-62. В ходе сеанса был

успешно запущен мюонный годоскоп MUV3, который активно использовался в триггере. Был установлен и запущен полномасштабный прототип годоскопа заряженных частиц. Произведен набор данных при разных параметрах годоскопов. Данные обрабатываются.

7 Публикации

Результаты работ, проведенных сотрудничеством ИЯИ-ИФВЭ, доложены на конференциях, опубликованы в журналах:

1. Measurement of charged kaon semileptonic decay branching fraction $K^- \to e^- \bar{\nu}_e \pi^0$ using ISTRA+ detector Phys.Atom.Nucl. 77 (2014) 725-732, Я.Ф. 77 (2014) 765–774

2. В.Ф. Образцов “High statistics measurement of the K+ -->pi0 e+ nu (Ke3) decay formfactors” 37-th International Conference for High Energy Physics (ICHEP- 2014) Валенсия, Испания 02.07.14-09.09.14 Работа принята к печати, будет опубликована в трудах конференции.

3. О. П. Ющенко “Исследование на большой статистике распада Ke3 на установке ОКА” Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий” Москва, Россия 17.11.14-21.11.14 Работа принята к печати, будет опубликована в трудах конференции

4. В. С. Буртовой "Исследование когерентного процесса K+ ядро --> K+ π0 ядро при энергии 18 ГэВ на установке ОКА". Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий” Москва, Россия 17.11.14-21.11.14 Работа принята к печати, будет опубликована в трудах конференции

5. Prospects for $K^+ \to \pi^+\nu\nu$ at CERN in NA62 arXiv:1411.0109

6. С.А. Холоденко "Time resolution measurements of scintillating counters prototypes for a new trigger charged hodoscope(CHOD)" Instrumentation for Colliding Beam Physics INSTR14, Novosibirsk 24.02.14-01.03.14

7. Time resolution measurements of scintillating counters for a new NA62 trigger charged hodoscope" Journal of Instrumentation(JINST) 9(2014)C09002

8 Лаборатория физики электрослабых взаимодействий

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Руководитель работ проф. Ю.Г.Куденко.

Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов.

Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях КЕК и J-PARC.

Разработка новых сцинтилляционных детекторов для экспериментов с ускорительными нейтрино.

Европейский проект нейтринного эксперимента с длинной базой LAGUNA-LBNO.

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

Исследование нарушения дискретных симметрий с использованием интенсивных пучков остановленных положительных каонов.

Разработка и создание сцинтилляционных детекторов заряженных частиц для учебно-исследовательских работ в школах и учебных институтах .

Руководители работ к.ф.-м.н. О.В.Минеев, к.ф.-м.н. Ю.В.Мусиенко.

8 Реферат

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов проведён анализ 100% данных эксперимента E949 на предмет поиска тяжёлых стерильных нейтрино с массами 140-300 МэВ/c^2 в распаде положительных каонов $K^+ \to \mu^+\nu_H$. Получен новый предел на смешивание тяжелых стерильных нейтрино с обычными нейтрино: ограничение на вероятность смешивания в области масс тяжелых нейтрино от 175 до 300 МэВ/c^2 составляет около 10^{-8}, что примерно на порядок улучшает предыдущий экспериментальный результат (CERN PS191).

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведен анализа данных, набранных в 2010 - первой половине 2013 года. В результате было получено несколько важных результатов по измерению как осцилляционных параметров, так и различных сечений взаимодействия нейтрино с веществом. В дальнем детекторе Супер-Камиокандэ было зарегистрировано 120 событий, идентифицированных как мюоноподобные, появившиеся в результате взаимодействия в детекторе через заряженный ток мюонных нейтрино в широком диапазоне энергий (до ~5 ГэВ). Ожидаемое число таких событий в отсутствие осцилляций $\nu_\mu \to \nu_\mu$ составило бы 446.0 ± 22.5 событий. Этот результат по обнаружению осцилляций мюонных нейтрино ($\nu_\mu \to \nu_\mu$) позволяет с высокой точностью определить угол смешивания θ_{23} и разность квадратов масс нейтрино Δm^2_{32} («атмосферные» параметры осцилляций): $\sin^2\theta_{23}=0.514^{+0.055}_{-0.056}$ для нормальной иерархии масс нейтрино (NH, $m_3 > m_2$) и 0.511±0.055 для инверсной иерархии (IH, $m_3<m_2$); $\Delta m^2_{32}= (2.51\pm0.1)\times10^{-3}$ эВ^2/c^4 (NH), $\Delta m^2_{13}= (2.48\pm0.10)\times10^{-3}$ эВ^2/c^4 (IH). Ненулевое значение угла θ_{13} и точное определение угла θ_{23} позволяют решать задачу определения CP-нарушающей фазы δ в лептонном секторе. Наши результаты демонстрируют намек на ненулевое значение этой фазы около $-(3/2)\pi$.

Другой результат, полученный в рамках эксперимента T2K, касается исследования примеси электронных нейтрино в исходном пучке мюонных нейтрино. Ожидается, что эта примесь составляет примерно 1.2% от всего потока нейтрино от ускорителя. В результате анализа установлено, что отношение величины измеренного компонента электронных нейтрино к величине, предсказанной на основе моделирования, равна 1.01±0.10, что подтверждает ожидаемую оценку этого фона.

В рамках эксперимента T2K впервые было измерено сечение квазиупругого взаимодействия нейтрино с ядром кислорода посредством нейтральных токов (NCQE).

В T2K также получены и опубликованы два важных результата по измерению инклюзивных сечений взаимодействий нейтрино (электронного и мюонного) в комплексе ближнего детектора, причем инклюзивное сечение взаимодействие электронного нейтрино было измерено впервые с 1978 г.

Еще один анализ данных эксперимента T2K посвящен поиску *стерильных* нейтрино по результатам изучения энергетического спектра электронных нейтрино в ближнем детекторе (0.2 – 10 ГэВ).

Важным достижением эксперимента T2K в 2014 году является успешное переключение в режим работы с *антинейтрино*, что позволяет исследовать CP-нарушение в лептонном секторе, а также измерять сечения взаимодействия антинейтрино с веществом.

В рамках подготовки будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой изготовлено свыше девяти тысяч пластин сцинтиллятора на основе полистирола методом экструзии (в компании Унипласт, г. Владимир) размером 900 x 10 x 7 мм^3. В 202-м корпусе ИЯИ РАН функционирует производственный участок для массового производства этих счетчиков. Средний световыход с обоих концов счетчиков составляет 100-140 фотоэлектронов на минимально ионизирующую частицу (зависит от температуры окружающей среды), что является очень хорошим показателем. Уровень бракованных счетчиков (с низким световыходом) не превышает 1% от общего числа счетчиков. Две партии счетчиков (200 + 4500 штук) отправлены в ЦЕРН для монтажа и инженерно-тестовых работ.

Проведен инженерный сеанс в эксперименте NA62 (ЦЕРН), разработан и протестирован на каонном пучке прототип нового триггерного детектора заряженных частиц NEWCHOD. Разработана, создана и испытана быстрая аналоговая электроника для этого детектора, а также протестированы лавинные фотоприемники SensL с активной площадью 3x3 мм^2.

8 Введение

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

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов проводится анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску тяжелых стерильных нейтрино с массами 140-300 МэВ. В результате этого анализа получено новое ограничение на параметры смешивания этой гипотетической частицы с активными нейтрино.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведена дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2010-2013 гг. В 2014 г. набор данных был продолжен, причем часть сеансов проводилась в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования CP-нарушения в лептонном секторе. Кроме того, важным результатом анализа является измерение сечений взаимодействия нейтрино (мюонных и электронных) с различными ядрами, а также поиск стерильных нейтрино.

Закончена подготовка к набору статистики и проведен инженерный сеанс в эксперименте NA62 (ЦЕРН), основной целью которого является измерение распада каона на пион и 2 нейтрино. Это распад чувствителен к новой физике за рамками Стандартной Модели.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой продолжается создание прототипа ближнего нейтринного детектора, работающего в сильном магнитном поле и состоящего из 9000 сцинтилляционных сегментов на основе экструдированных пластиков, спектросмещающих волокон и лавинных фотодиодов.

8 Основные результаты

8.1 Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов

Проведён анализ 100% данных эксперимента E949 на предмет поиска тяжёлых стерильных нейтрино с массами 140-300 МэВ/c^2 в распаде положительных каонов $K^+ \to \mu^+\nu_H$. При анализе импульсных спектров заряженных частиц, образовавшихся при остановке и распаде заряженных каонов (всего 1.7×10^{12} событий), были использованы статистические методы поиска локальных максимумов, аналогичные методам, которые были использованы при поиске хиггсовских бозонов на Большом адронном коллайдере. Получен новый предел на смешивание тяжелых стерильных нейтрино с обычными нейтрино: ограничение на вероятность смешивания в области масс тяжелых нейтрино от 175 до 300 МэВ/ c^2 составляет около 10^{-8}, что примерно на порядок улучшает предыдущий экспериментальный результат (CERN PS191).

8.2 Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях КЕК и J-PARC

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведен анализа данных, набранных в 2010 - первой половине 2013 года (данные из 1-4 сеансов, 6.57×1020 POT, протонов на мишени), на предмет поиска дефицита мюонных нейтрино ($\nu\mu\to \nu\mu$). В дальнем детекторе Супер-Камиокандэ было зарегистрировано 120 событий, идентифицированных как мюоноподобные, появившиеся в результате взаимодействия в детекторе через заряженный ток мюонных нейтрино в широком диапазоне энергий (до ~5 ГэВ). Ожидаемое число таких событий в отсутствие осцилляций $\nu\mu\to\nu\mu$ составило бы 446.0 ± 22.5 событий. Этот результат по обнаружению осцилляций мюонных нейтрино ($\nu\mu\to \nu\mu$) позволяет с высокой точностью определить угол смешивания θ23 и разность квадратов масс нейтрино Δm232 («атмосферные» параметры осцилляций): sin2θ23=0.514+0.055-0.056 для нормальной иерархии масс нейтрино (NH, m3 > m2) и 0.511±0.055 для инверсной иерархии (IH, m3<m2); Δm232= (2.51±0.1)×10-3 эВ2/c4 (NH), Δm213= (2.48±0.10)×10-3 эВ2/c4 (IH). Ненулевое значение угла θ13 и точное определение угла θ23 позволяют решать задачу определения CP-нарушающей фазы δ в лептонном секторе. Наши результаты демонстрируют намек на ненулевое значение этой фазы около –(3/2)π.

Другой результат, полученный в рамках эксперимента T2K, касается исследования примеси электронных нейтрино в исходном пучке мюонных нейтрино. Знание этого компонента нейтринного пучка позволяет более точно предсказывать параметры осцилляций «на появление» ($\nu\mu \rightarrow \nu e$). Ожидается, что эта примесь составляет примерно 1.2% от всего потока нейтрино от ускорителя. Основными источниками электронных нейтрино в исходном пучке являются распады мюонов (преимущественно в области энергий нейтрино < 1.6 ГэВ) и каонов. Измерение примеси электронных нейтрино осуществляется с помощью ближнего детекторного комплекса ND280, в котором имеются детекторы для выделения треков заряженных частиц и электромагнитный калориметр для регистрации ливней от взаимодействий электронов и позитронов. В результате анализа установлено, что отношение величины измеренного компонента электронных нейтрино к величине, предсказанной на основе моделирования, равна 1.01±0.10, что подтверждает ожидаемую оценку этого фона.

В рамках эксперимента T2K впервые было измерено сечение квазиупругого взаимодействия нейтрино с ядром кислорода посредством нейтральных токов (NCQE). Это сечение было получено с помощью обнаружения гамма-квантов, испущенных возбужденными состояниями ядра кислорода, образовавшимися в результате взаимодействия с нейтрино в черенковском детекторе Супер-Камиокандэ. Временн'ая привязка к пучку ускорительных нейтрино, имеющих банчевую структуру, а также точное определение вершин нейтринных взаимодействий в рабочем объеме детектора, позволяют существенно подавить большой фон естественной радиоактивности. При анализе части набранной статистики (3.01×1020 POT) выделено 43 события в диапазоне энергий гамма-квантов от 4 до 30 МэВ, что сравнимо с ожидаемым числом событий – 55.7, из которых 17.3 событий соответствуют фоновым (из них лишь 1.2 событий – от естественной радиоактивности). Для средней энергии нейтрино 630 МэВ полученное сечение взаимодействия составляет 1.35×10-38 см2, что сравнимо с теоретическим значением 2.01×10-38 см2.

В T2K также получены и опубликованы два важных результата по измерению инклюзивных сечений взаимодействий нейтрино (электронного и мюонного) в комплексе ближнего детектора.

В первой работе измерялось инклюзивное сечение взаимодействия электронных нейтрино с ядрами углерода посредством заряженных токов – на установке ND280, расположенной под углом 2.5 градусов к оси протонного пучка. Электронные нейтрино составляют примерно 1% примеси в исходном (мюонном) потоке нейтрино. Получены дифференциальные сечения взаимодействия электронных нейтрино с ядрами углерода при

энергии около 1 ГэВ – в зависимости от параметров конечного электрона (импульса, угла рассеяния) и от величины переданного 4-импульса. Полное сечение взаимодействия электронного нейтрино с ядром углерода равно σ = 1.11 ± 0.09 (стат.) ± 0.18 (сист.) 10-38 см2/нуклон и согласуется с предсказаниями нейтринных генераторов NEUT и GENIE, а также с предыдущим измерением в эксперименте Гаргамелль (1978 г.).

В другой работе инклюзивное сечение взаимодействия мюонных нейтрино измерялось на установке INGRID, ближнем детекторе, расположенном на оси нейтринного пучка. В качестве мишени здесь рассматривались ядра железа, а также углеводород (CH), из которого состоит пластиковый сцинтиллятор. Для средней энергии нейтрино 1.51 ГэВ сечение взаимодействия мюонных нейтрино с ядрами железа и углерода, соответственно, равно 1.444 ± 0.002 (стат.) +0.189 -0.157 (сист.) x 10-38 см2/нуклон и 1.379 ± 0.009 (стат.) +0.178 -0.147 (сист.) x 10-38 см2/нуклон, а их отношение мало отличается от единицы: 1.047 ± 0.007 (стат.) ± 0.035 (сист.). Полученные результаты хорошо согласуются с модельными предсказаниями.

Еще один анализ данных эксперимента T2K посвящен поиску стерильных нейтрино по результатам изучения энергетического спектра электронных нейтрино в ближнем детекторе (0.2 – 10 ГэВ). Измеренный спектр сравнивался с моделированными данными, что позволило исключить области неизвестных параметров смешивания гипотетических стерильных нейтрино. Эта работа будет продолжена после анализа большего объема данных.

Важным достижением эксперимента T2K в 2014 году является успешное переключение в режим работы с антинейтрино, что позволяет исследовать CP-нарушение в лептонном секторе, а также измерять сечения взаимодействия антинейтрино с веществом. В дальнейшем предполагается чередование нейтринных и антинейтринных режимов работы.

8.3 Разработка новых сцинтилляционных детекторов для экспериментов с ускорительными нейтрино

Для ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой продолжаются работы по изготовлению прототипа ближнего нейтринного детектора.

Изготовлено свыше девяти тысяч пластин сцинтиллятора на основе полистирола методом экструзии (в компании Унипласт, г. Владимир) размером 900 x 10 x 7 мм3. В 202-м корпусе ИЯИ РАН функционирует производственный участок для массового производства этих счетчиков (для вырезания канавок в пластинах, а также для вклеивания оптического спектросмещающего волокна и разъема в данные канавки). На следующем этапе проводятся тесты и измерения спектрометрических параметров полученных счетчиков. Средний световыход с обоих концов счетчиков составляет 100-140 фотоэлектронов на минимально ионизирующую частицу (зависит от температуры окружающей среды), что является очень хорошим показателем. Уровень бракованных счетчиков (с низким световыходом) не превышает 1% от общего числа счетчиков.

В апреле 2014 г. первая партия из 200 счетчиков была отправлена в ЦЕРН – для проведения различных инженерных и тестовых работ. Вторая партия из 4500 счетчиков - для монтажа детектора - была отправлена в ЦЕРН в середине декабря 2014 г.

8 Заключение

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов проведён анализ 100% данных эксперимента E949 на предмет поиска тяжёлых стерильных нейтрино с массами 140-300 МэВ/c^2 в распаде положительных каонов $K^+ \to \mu^+\nu_H$. Получен новый предел на смешивание тяжелых стерильных нейтрино с обычными нейтрино: ограничение на вероятность смешивания в области масс тяжелых нейтрино от 175 до 300 МэВ/c^2 составляет около 10^{-8}, что примерно на порядок улучшает предыдущий экспериментальный результат (CERN PS191).

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведен анализа данных, набранных в 2010 - первой половине 2013 года. В результате было получено несколько важных результатов по измерению как осцилляционных параметров, так и различных сечений взаимодействия нейтрино с веществом. В дальнем детекторе Супер-Камиокандэ было зарегистрировано 120 событий, идентифицированных как мюоноподобные, появившиеся в результате

взаимодействия в детекторе через заряженный ток мюонных нейтрино в широком диапазоне энергий (до ~5 ГэВ). Ожидаемое число таких событий в отсутствие осцилляций $\nu_\mu \to \nu_\mu$ составило бы 446.0 ± 22.5 событий. Этот результат по обнаружению осцилляций мюонных нейтрино ($\nu_\mu \to \nu_\mu$) позволяет с высокой точностью определить угол смешивания θ_{23} и разность квадратов масс нейтрино Δm^2_{32} («атмосферные» параметры осцилляций): $\sin^2\theta_{23}=0.514^{+0.055}_{-0.056}$ для нормальной иерархии масс нейтрино (NH, $m_3 > m_2$) и 0.511±0.055 для инверсной иерархии (IH, $m_3<m_2$); $\Delta m^2_{32}= (2.51\pm0.1)\times10^{-3}$ эВ^2/с^4 (NH), $\Delta m^2_{13}= (2.48\pm0.10)\times10^{-3}$ эВ^2/с^4 (IH). Ненулевое значение угла θ_{13} и точное определение угла θ_{23} позволяют решать задачу определения CP-нарушающей фазы δ в лептонном секторе. Наши результаты демонстрируют намёк на ненулевое значение этой фазы около $-(3/2)\pi$.

Другой результат, полученный в рамках эксперимента T2K, касается исследования примеси электронных нейтрино в исходном пучке мюонных нейтрино. Ожидается, что эта примесь составляет примерно 1.2% от всего потока нейтрино от ускорителя. В результате анализа установлено, что отношение величины измеренного компонента электронных нейтрино к величине, предсказанной на основе моделирования, равна 1.01±0.10, что подтверждает ожидаемую оценку этого фона.

В рамках эксперимента T2K впервые было измерено сечение квазиупругого взаимодействия нейтрино с ядром кислорода посредством нейтральных токов (NCQE).

В T2K также получены и опубликованы два важных результата по измерению инклюзивных сечений взаимодействий нейтрино (электронного и мюонного) в комплексе ближнего детектора, причем инклюзивное сечение взаимодействие электронного нейтрино было измерено впервые с 1978 г.

Еще один анализ данных эксперимента T2K посвящен поиску *стерильных* нейтрино по результатам изучения энергетического спектра электронных нейтрино в ближнем детекторе (0.2 – 10 ГэВ).

Важным достижением эксперимента T2K в 2014 году является успешное переключение в режим работы с *антинейтрино*, что позволяет исследовать CP-нарушение в лептонном секторе, а также измерять сечения взаимодействия антинейтрино с веществом.

Проведен инженерный сеанс в эксперименте NA62 (ЦЕРН), основной целью которого является измерение редкого распада заряженного каона на пион и 2 нейтрино. Завершена разработка и проведены тесты на каонном пучке детектора заряженных частиц NEWCHOD.

В рамках подготовки будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой изготовлено свыше девяти тысяч пластин сцинтиллятора на основе полистирола методом экструзии (в компании Унипласт, г. Владимир) размером 900 x 10 x 7 мм^3.

В 202-м корпусе ИЯИ РАН функционирует производственный участок для массового производства этих счетчиков. Средний световыход с обоих концов счетчиков составляет 100-140 фотоэлектронов на минимально ионизирующую частицу (зависит от температуры окружающей среды), что является очень хорошим показателем. Уровень бракованных счетчиков (с низким световыходом) не превышает 1% от общего числа счетчиков. Две партии счетчиков (200 + 4500 штук) отправлены в ЦЕРН для монтажа и инженерно-тестовых работ.

8 Публикации

1 A.V. Artamonov,…, M. Khabibullin,…, Yu. Kudenko,…, A. Shaikhiev,…, et al. (E949 Collaboration) / Search for heavy neutrinos in K^+\to\mu^+\nu_H decays // 14 pages, arXiv:1411.3963 [hep-ex].

2 A.T. Shaikhiev / Search for heavy neutrinos in kaon decays // Докладн на м/н конференции 18th International Seminar on High Energy Physics, QUARKS 2014, Суздаль, Россия, 2-8 июня 2014.

3 A.T. Shaikhiev / Search for heavy neutrinos in kaon decays // Докладн на м/н конференции XXXth International Workshop on High Energy Physics, Particle and Astroparticle Physics, Gravitation and Cosmology: Predictions, Observations and New Projects, HEPFT 2014, ИФВЭ, Протвино, Россия, 23-27 июня 2014.

4 A.T. Shaikhiev / Search for heavy neutrinos in K+ -> mu+ nu_H decays // Постерный доклад на м/н конференции The 2nd Symposium Theory Meeting Experiment: NEUTRINOS and COSMOS, TMEX 2014, Варшава, Польша, 3-5 сентября 2014.

5 А.Т. Шайхиев и Ю.Г. Куденко / Новые результаты по поиску стерильных нейтрино в каонных и нейтринных экспериментах // Доклад на м/н конференции International Conference-Session of the Section of Nuclear Physics of the Physical Sciences Division of the Russian Academy of Sciences, МИФИ, Москва, 17-21 ноября 2014.

6 K. Abe, …, M. Khabibullin,…, Yu. Kudenko,… et al. / Recent results from the T2K experiment // 6 pages, Nucl.Phys.Proc.Suppl. 246-247 (2014) 23-28.

7 K. Abe, …, M. Khabibullin,…, Yu. Kudenko,… et al. / Precise measurement of the neutrino mixing parameter \theta_{23} from muon neutrino disappearance in an off-axis beam // 8 pages, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 181801, arXiv:1403.1532 [hep-ex].

8 K. Abe, …, M. Khabibullin,…, Yu. Kudenko,… et al. / Measurement of the intrinsic electron neutrino component in the T2K neutrino beam with the ND280 detector // 18 pages, Phys. Rev. D89 (2014) 092003, arXiv:1403.2552 [hep-ex].

9 K. Abe, …, M. Khabibullin,…, Yu. Kudenko,… et al. / Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current interaction cross section by observing nuclear deexcitation gamma rays // 11 pages, Phys. Rev. D90 (2014) 072012, arXiv:1403.3140 [hep-ex].

10 K. Abe, …, M. Khabibullin,…, Yu. Kudenko,… et al. / Measurement of the inclusive nu_mu charged current interaction cross section on iron and hydrocarbon in the T2K on-axis neutrino beam // 15 pages, Phys. Rev. D90 (2014) 052010, arXiv:1407.4256 [hep-ex].

11 K. Abe, …, M. Khabibullin,…, Yu. Kudenko,… et al. / Measurement of the inclusive electron neutrino charged current cross section on carbon with the T2K near detector // 7 pages, Phys.Rev.Lett. 113 (2014) 241803, arXiv:1407.7389 [hep-ex].

12 K. Abe, …, M. Khabibullin,…, Yu. Kudenko,… et al. / Neutrino oscillation physics potential of the T2K experiment // 40 pages, arXiv:1409.7469 [hep-ex].

13 K. Abe, …, M. Khabibullin,…, Yu. Kudenko,… et al. / Search for short baseline nu_e disappearance with the T2K near detector, 8 pages, arXiv:1410.8811 [hep-ex].

14 Yu. Kudenko / Neutrino physics: status and open questions // Доклад на международной конференции The 13th International Workshop on tau lepton physics (TAU-2014), Aachen, Germany, 15-19 September, 2014.

15 Yu. Kudenko / Neutrino physics // Lecture at CERN-JINR School, CERN, Geneva, Switzerland, 29 September 2014.

17 Yu. Kudenko / T2K experiment: results and prospects // Доклад на 18-й международной конференции по физике высоких энергий QUARKS-2014, 2-8 июня 2014 г., г. Суздаль, Россия.

18 L. Agostino,…, I. Karpikov, A. Khotjantsev, Y. Kudenko, A. Mefodiev, O. Mineev, T. Ovsiannikova, N.Yershov,… et al. / LBNO-DEMO. Large-scale neutrino detector demonstrators for phased performance assessment in view of a long-baseline oscillation experiment (The LBNO-DEMO (WA105) Collaboration) // 217 pages, arXiv:1409.4405 [physics.ins-det].

19 S.K. Agarwalla,…, M.M. Khabibullin,…, Yu.G. Kudenko,..., et al. (LAGUNA-LBNO Collaboration) / Optimised sensitivity to leptonic CP violation from spectral information: the LBNO case at 2300 km baseline // 25 pages, arXiv:1412.0593 [hep-ph].

20 S.K. Agarwalla,…, M.M. Khabibullin,…, Yu.G. Kudenko,..., et al. (LAGUNA-LBNO Collaboration) / The LBNO long-baseline oscillation sensitivities with two conventional neutrino beams at different baselines // 251 pages, arXiv:1412.0804 [hep-ph].

9 Лаборатория новых методов детектирования нейтрино и других элементарных частиц

Руководитель работ к.ф.-м.н. И.М.Железных.

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Разработка и создание нейтринных телескопов в низкофоновых подземных лабораториях и глубоко под водой для исследования природных потоков нейтрино и других элементарных частиц.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Разработка альтернативных методов детектирования космических нейтрино сверхвысоких и экстремально высоких энергий.

Разработка полупроводниковых детекторов ядерных частиц на основе новых микропиксельных лавинных фотодиодов.

9 РЕФЕРАТ

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРИНО

Объект исследования.

Новые (альтернативные оптическим) методы регистрации космических нейтрино сверхвысоких и экстремально высоких энергий;

детекторы элементарных частиц с использованием новейших лавинных фотодиодов.

Цели работы.

Совместные российско-греческие глубоководные исследования в Средиземном море (в рамках межправительственного соглашения о научно-технологическом сотрудничестве между Россией и Грецией).

Разработки:

- гидроакустического метода детектирования космических нейтрино сверхвысоких энергий;

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

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

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

Методы выполнения работы.

Разработка метода быстрого моделирования «трехмерных» электронно-адронных каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий в воде, во льду, в лунном реголите с учетом эффекта Ландау - Померанчука – Мигдала и главных флуктуаций с целью дальнейших расчетов производимых каскадами акустических сигналов в воде и радио сигналов во льду и лунном грунте.

Исследование механизма генерации звука в воде электронно-фотонными каскадами, производимыми импульсным твердотельным лазером с использованием лабораторного гидроакустического стенда.

Создание и испытание макетов (лабораторных образцов) сцинтилляционных детекторов гамма квантов, заряженных частиц и нейтронов на основе МЛФД.

Разработка и синтез соединений лития для изготовления пластических сцинтилляторов, регистрирующих нейтроны.

9 Введение

В июле 2013 г. на международной конференции по космическим лучам в Рио де Жанейро было сделано сенсационное сообщение о детектировании нейтринным телескопом IceCube на Южном полюсе диффузного (изотропного) потока космических нейтрино внеатмосферного (астрофизического) происхождения в области высоких энергий (всего 28 событий с энергиями $6x10^{13}$ - $2x10^{15}$ эВ в течение двух лет, из них 12 событий – фоновых) [1]. Это первые положительные экспериментальные результаты более чем 50-летнего развития новой отрасли Астрономии – нейтринной астрономии высоких энергий ($E>10^9$ эВ), предложенной в 1958-1961 г.г. в работах [2].

Если для оптической регистрации взаимодействий астрофизических нейтрино с энергиями $6x10^{13}$ - $2x10^{15}$ эВ с массивом прозрачного льда потребовался объем детектора IceCube порядка 1 кубического километра, то для детектирования космических нейтрино с энергиями 10^{16}-10^{19} эВ (в том числе космологических или ГЗК- нейтрино) объем нейтринной мишени должен быть не менее 10 - 1000 кубических километров вещества.

Для создания нейтринных телескопов подобных гигантских размеров еще в 80-х годах в ИЯИ РАН впервые были предложены альтернативные методы детектирования нейтрино, а именно радиоволновой [3] и радиоастрономический [4] методы с использованием антарктического льда и Луны как нейтринных мишеней. Еще раньше в 70-х годах в ФИАНе (Г.А. Аскарян и Б.А. Долгошеин) был предложен гидроакустический метод. Разработка радиоволнового нейтринного телескопа РАМАНД в Антарктиде [5] и разработка глубоководных оптического детектора (проект НЕСТОР) и акустического детектора нейтрино (проект САДКО) в Средиземном море успешно выполнялись до 1991 г. в рамках программы М.А. Маркова «Советский ДЮМАНД».

Одновременно в рамках этой программы была весьма успешно выполнена разработка нового класса лавинных фотодиодов - микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД), предложенных в ИЯИ РАН (З.Я. Садыгов и др.), В те годы ИЯИ РАН опережал зарубежных научных конкурентов на 5-10 лет.

Несмотря на трудности с финансированием работа по созданию альтернативных детекторов нейтрино и других элементарных частиц продолжалась в 90-е и 2000-е годы. Так поиск радиоимпульсов, которые возникают при взаимодействии нейтрино с лунным реголитом, проводился на Калязинском радиоастрономическом телескопе в начале 2000-х в рамках программы В.А. Матвеева «Нейтринная физика и астрофизика». Это позволило не только опробовать радиоастрономический метод, но и получить ограничения на потоки космических нейтрино экстремально высоких энергий [6].

В настоящее время проекты создания в Антарктиде гигантских радио детекторов нейтрино с регистрирующим объемом вплоть до 10^3 куб. км (ARA - Askaryan Radio Array и ARIANNA) осуществляются американскими учеными. Представляет большой интерес также проект использования радиоастрономического телескопа SKA (площадью 1 кв. км) в Австралии и Юной Африке для регистрации радио импульсов от каскадов экстремально высоких энергий, производимых нейтрино и другими космическими частицами, бомбардирующими Луну. Следует считать актуальной задачей создание в Средиземном море не только оптического нейтринного телескопа КМ3 NeT, но и разработку (на базе полигона НЕСТОР) гидроакустического метода детектирования нейтрино.

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

Таким образом развитие новых методов детектирования космических нейтрино и других частиц, которое началось в СССР и России, сейчас весьма успешно продолжено, но в основном за рубежом.

Очень малое текущее финансирование проектов разработки альтернативных методов детектирования нейтрино или координатно-чувствительных детекторов частиц на основе новых лавинных фотодиодов, получаемое ИЯИ РАН, делает научное соревнование с зарубежными учеными затруднительным, но выше перечисленные исследования в России необходимо продолжать и в случае их финансирования проводить фундаментальные и прикладные исследования мирового уровня [7-9].

Необходимо также подчеркнуть, что успехи в разработках координатно-чувствительных (матричных) детекторов элементарных частиц на основе новейших мультипиксельных лавинных фотодиодов – МЛФД будут иметь важнейшее значение не только для экспериментальной физики высоких энергий и астрофизики, но и для создания в России нового поколения медицинского оборудования, в частности позитронно-эмиссионных томографов (ПЭТ-сканеров) [10-11].

9 Основные результаты НИР в 2014 г.

9.1 Составление проекта НЕСТОР-САДКО:

В 2014 г. Институтом ядерных исследований РАН (головная организация) совместно с Атлантическим отделением Института океанологии РАН (г. Калининград), Институтом прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород) и Институтом ядерной физики и физики элементарных частиц национального научно-исследовательского центра «ДЕМОКРИТОС», Афины, Греция составлен международный проект

«Разработка и создание компонентов глубоководного нейтринного телескопа в Средиземном море и новых эффективных технологий и технических средств для многоцелевых исследований морской среды» (проект НЕСТОР – САДКО, научный руководитель с российской стороны академик В.А. Матвеев).

Предлагаемый проект НЕСТОР – САДКО нацелен на усиление российского участия в реализации Российско-Греческой программы научно-технологического сотрудничества по созданию в Средиземном море вблизи берегов Греции глубоководного детектора космических нейтрино высоких энергий –«нейтринного телескопа» НЕСТОР - с целью развития новой ветви Астрономии – Нейтринной Астрономии Высоких Энергий.

Проект НЕСТОР – САДКО направлен также на активизацию российских океанологических исследований в Средиземном море с применением уникальных глубоководных технологий и оборудования, которые будут разработаны в ходе проекта: а именно

- глубоководного альфа-бета-гамма спектрометра (ИЯИ РАН и ОКБ океанологической техники РАН),
- компактного погружного фотометра на основе лавинных фотодиодов нового поколения для измерения оптических свойств воды (ИЯИ РАН и ОКБ ОТ РАН),
- глубоководной аппаратуры для нейтринного телескопа НЕСТОР (ИЯИ РАН и ОКБ ОТ РАН совместно с Институтом ядерной физики и физики элементарных частиц национального научно-исследовательского центра «ДЕМОКРИТОС», Афины, Греция), - гидроакустической антенны с цифровыми гидрофонами (Институт прикладной физики РАН),
- бескабельных зондов и автоматических пробоотборников (Атлантическое отделение Института океанологии РАН),

Важная роль проекта НЕСТОР в Российско-Греческом сотрудничестве была подтверждена протоколом межправительственной Российско-Греческой рабочей группы (13 марта 2014 г., Афины).

С целью получения финансирования проект НЕСТОР-САДКО был представлен на конкурс на право заключения госконтракта в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы в рамках сотрудничества с научно-исследовательскими организациями и университетами стран-членов ЕС».

Греческая сторона обязалась истратить на совместный проект сумму в евро аналогичную российскому вкладу.

Однако по определенной причине (связанной с работой экспертной комиссии) проект НЕСТОР-САДКО не попал в число победителей конкурса (не хватило 1 балла из 100).

9.2 Заявка на участие в конкурсе 2015 г. по программе Президиума РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика»

Проект: «Разработка и создание пилотной установки - системы антенн, способных регистрировать импульсы в метровом радиоволновом диапазоне» (научный руководитель Р.Д. Дагкесаманский).

В 2014 году за рубежом активно разрабатывалась программа использования гигантского радиотелескопа SKA, сооружаемого в Австралии и Южной Африке (с общей площадью антенн в 1 квадратный километр), для детектирования космических лучей сверхвысоких и экстремально высоких энергий, которые взаимодействуют с поверхностными слоями Луны. Предложение принять участие в разработке такой программы для SKA было получено сотрудниками ПРАО АКЦ ФИАН и ИЯИ РАН в марте 2014 г. (см. Приложение 1). Доклад на конференции по научным программам для SKA был представлен Джастином Бреем (Justin Bray) в начале октября 2014 г.[13].

Идея радиоастрономического метода детектирования космических нейтрино и протонов (ядер), «бомбардирующих» Луну, с применением радиотелескопов на Земле и даже на лунных спутниках была предложена в ИЯИ РАН и ПРАО АКЦ ФИАН еще в конце 80-х годов.

В проекте RAMHAND [4] речь шла о поиске радиоимпульсов в диапазоне от нескольких сотен МГц до нескольких ГГц, производимых каскадами от космических частиц высоких энергий в лунном реголите. Позднее было показано, что мониторинг коротких всплесков черенковского радиоизлучения от Луны на более низких частотах может оказаться более эффективным, особенно когда речь идет о детектировании нейтрино предельно высоких энергий ($E > 10^{22}$эВ). О преимуществах такого подхода шла речь, в частности, в работе [8].

В представленном проекте предлагается разработать и создать на базе Пущинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО АКЦ ФИАН) с участием ИЯИ РАН (электроника, проведение расчетов) пилотную установку – систему антенн, способных регистрировать импульсы в метровом диапазоне волн, то есть расширить частотный диапазон регистрируемых радиоимпульсов вплоть до нескольких десятков МГц. Предполагается, что эффективная площадь пилотной установки составит около 1000 кв. м., а время мониторинга радиоимпульсов от Луны составит 4-5 часов в сутки. Технические и экспериментальные

результаты проекта могут иметь большое значение для развития радиоастрономического метода детектирования космических частиц экстремально высоких энергий, в частности с использованием радиотелескопа SKA.

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

(см. также [12])

9.3.1. Разработка гибридного алгоритма расчёта LPM-G4-3D и расчёт каскадов для энергий 10^4 –10^7 гэВ.

Разработан и отлажен гибридный алгоритм расчёта трёхмерного каскада от нейтрино сверхвысоких энергий в воде LPM-G4-3D. В этом алгоритме рассчитанные по Geant4 3-мерные каскады использовались для вычисления “хвостовых” каскадов с промежуточными энергиями в диапазоне $10^{-1} \div 10^3$ Гэв. Использовался метод линейной аппроксимации на основе 5-ти базовых “хвостовых” Geant-4 каскадов, рассчитанных для энергий 10^{-1}, 10^0, 10^1, 10^2 и 10^3 ГэВ. На основе этого алгоритма были проведены расчёты для каскадов от энергий 10^4, 10^5, 10^6, 10^7 и 10^8 ГэВ с пороговой энергией $E_{th}=10^3$ ГэВ. Проведение расчётов для более высоких энергий предоставляет большие трудности из-за резкого возрастания времени вычислений. Поэтому была сделана дальнейшая модернизация алгоритма с целью существенного увеличения скорости вычислений.

9.3.2. Модернизация гибридного LPM-G4-3D алгоритма и расчёт каскадов для энергий 10^9 –10^{11} ГэВ.

Модернизация расчёта трёхмерного каскада по гибридному LPM-G4-3D алгоритму заключалась в добавлении, к 5-ти Geant-4 базовым “хвостовым” каскадам, 3-х хвостовых каскадов, рассчитанных для энергий 10^4, 10^5 и 10^6 ГэВ по предыдущей версии программы LPM-G4-3D. На основе модернизированной программы были проведены вычисления каскадов $2\pi RdE/dV$ (как функции от Z и R) для энергий 10^9, 10^{10} и 10^{11} ГэВ со значением пороговой энергии 10^6 ГэВ. В качестве “хвостовых” каскадов использовалась линейная аппроксимация по 8-и базовым каскадам, описанным выше. На рисунке 1 приведены каскады, рассчитанные по модернизированному LPM-G4-3D алгоритму для энергий 10^9, 10^{10}, 10^{11} ГэВ (пороговая энергия в этом расчёте $E_{th} = 10^6$ ГэВ.

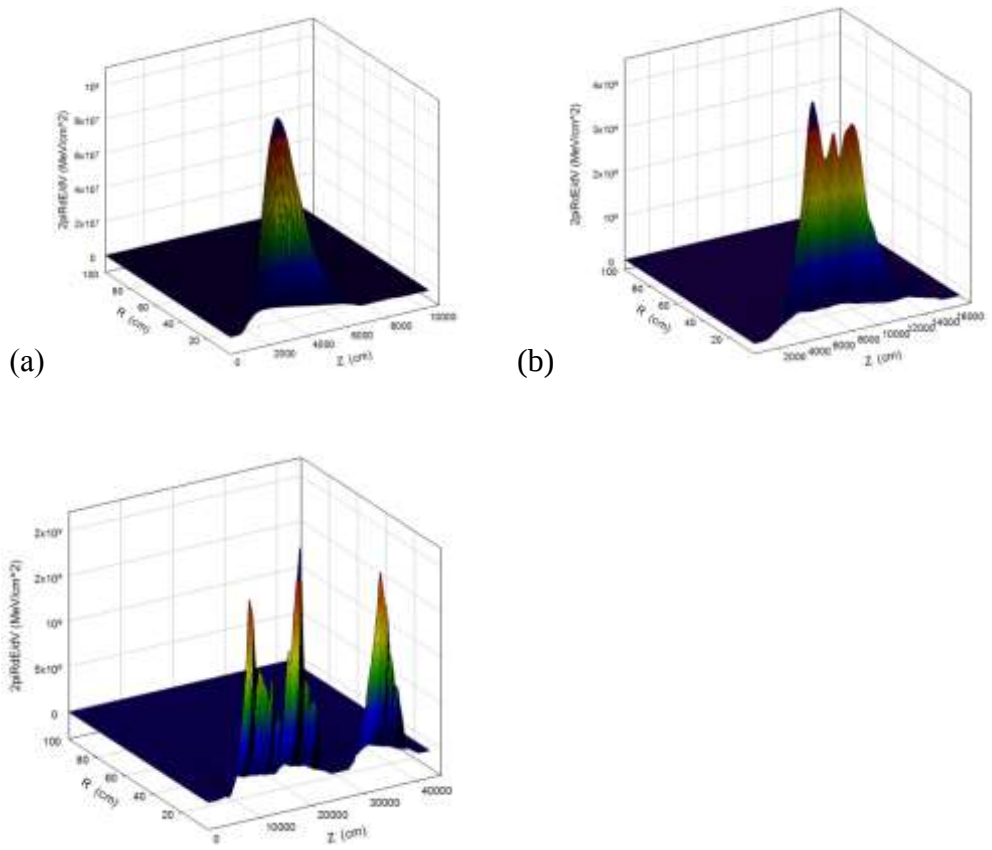


Рис. 1. Трёхмерные каскады в воде 2πRdE/dV (как функции от Z и R) рассчитанные по модернизированному LPM-G4-3D алгоритму (8 базовых “хвостовых” каскадов, пороговая энергия Eth = 106 ГэВ. Для энергий (a) – 109 (усреднение по 100 частицам), (b) – 1010 (усреднение по 10 частицам), (c) – 1011 ГэВ (каскад от одной частицы).

Также проведено интегрирование по соответствующим координатам и вычислены продольные (dE/dZ) и радиальные (dE/dR) интегральные распределения.

9.4 Проведение гидроакустических исследований, связанных с проектом НЕСТОР

В рамках договора о сотрудничестве между ИЯИ РАН и Институтом ядерной физики и физики частиц, научно-исследовательский центр «Демокритус», Афины, Греция, создан и испытан лабораторный образец автономного глубоководного измерителя термоупругих свойств воды на основе импульсного лазера.

Моделирование и изучение механизма термоакустической генерации звука в воде даёт важную информацию для проектирования гидроакустических детекторов нейтрино с большим объемом детектирования. Возникающий в водной массе электрон-фотонный (адрон-электронный) каскад, вызывает мгновенный разогрев воды в объеме каскада с последующим излучением акустического импульса.

Измерения термоупругих свойств воды в диапазоне температур от +10 С до +30 С проводились в лабораторных условиях с использованием лазера на иттрий-алюминиевом гранате (ИАГ), активированном неодимом с длиной волны 1,06 мкм и длиной затухания в воде 5-10 см, и измерительного стенда, включающего в себя измерительный гидрофон, малошумящий предварительный усилитель, селективный усилитель UNIPAN 232B, осциллограф Tektronix , систему сбора и обработки данных с частотой дискретизации 96 кГц , разрешением 16 бит на основе персонального компьютера в среде Windows (рис.2).

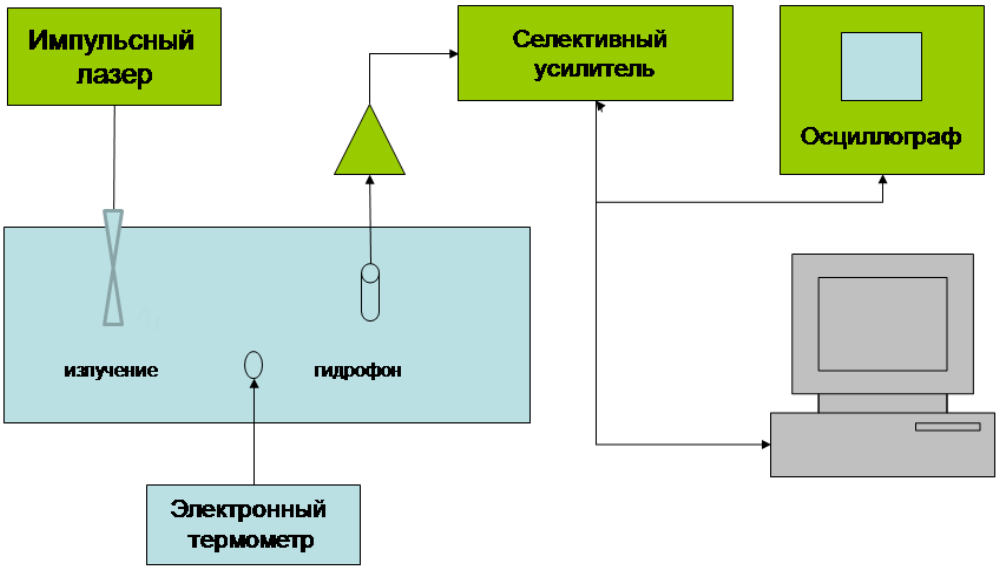


Рис.2. Блок-схема автономного измерительного модуля

Исследовано влияние акустических и электромагнитных помех на соотношение сигнал\шум термоакустического импульса в воде. По результатам исследований проведена оптимизация измерительной установки. Выполнены измерения характеристик акустического импульса в диапазоне температур 10 - 30 град.С в пресной воде. Зависимость амплитуды акустических импульсов в диапазоне температур 10-30 град.С приведена на рис.4. Красная линия соответствует расчетным значением сигнала.

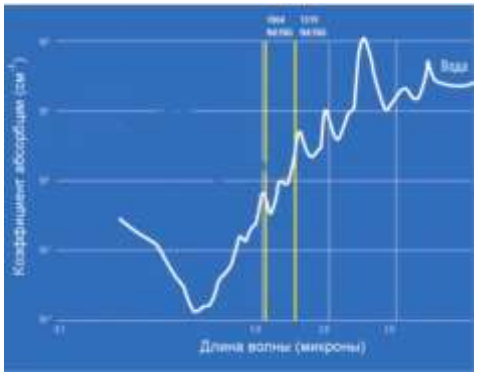


Рис.3. Спектр поглощения для воды.

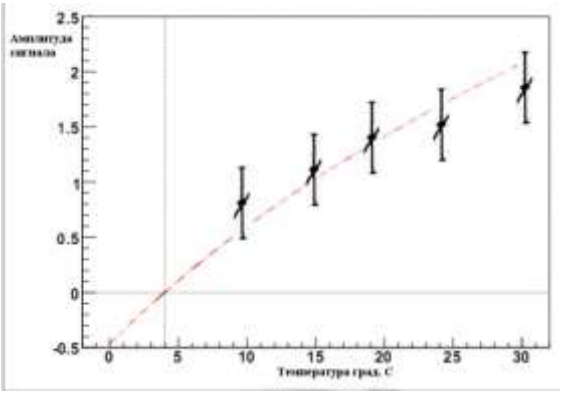


Рис.4. Температурная зависимость сигнала.

Замена лазера позволила увеличить область энерговыделения за счет меньшего поглощения света водой на длине волны 1,06 мкм, по сравнению с прежним лазером с длиной волны 3 мкм (см. рис.3), однако резко упал уровень акустического сигнала, что потребовало внести изменения в лабораторный стенд. Используемая в лазере импульсная ксеноновая лампа создает достаточно сильные акустические и электромагнитные помехи.

В будущем при создании компактного измерительного модуля потребуется замена лазера на аналогичный, но с импульсной накачкой излучением от мощных светодиодов.

9. 5 Разработка лабораторных образцов детекторов элементарных частиц на основе лавинных фотодиодов нового поколения – МЛФД

(совместно с ОИЯИ, З.Я. Садыгов).

Работы по применению мультипиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД) в детекторах ядерных частиц проводятся в рамках подписанного ИЯИ РАН «Протокола о совместной научной, технологической и инновационной деятельности в 2012-2015 г.г….» с ОИЯИ (Дубна), Институтом физики НАН Азербайджана (Баку) и с фирмами – производителями инновационной продукции “Zecotek Photonics Singapore Pte Ltd” и НПО (коллаборация “Дубна-МЛФД”). Статья о разработке нового метода изготовления МЛФД - матриц для позиционно-чувствительных детекторов частиц опубликована в [14].

Для создаваемой в России межведомственной программы «ФОТОНИКА» совместно с ОИЯИ (Дубна) предложено направление «Однофотонные устройства приема и обработки информации» и предложен проект: «Разработка сверхчувствительных и быстродействующих полупроводниковых матричных лавинных фотоприемников и создание на их основе оптических систем обнаружения и распознавания удаленных объектов».

Для выполнения работ по изучению фотометрических, спектральных и временных характеристик полупроводниковых фотоприемников и работы позиционно-чувствительных детекторов на их основе в 2014 г. была продолжена модернизация универсального

автоматизированного стенда ЛНМДН и ЗЧ ИЯИ РАН, что позволило в 2014 г. проводить со студентами МФТИ (кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии) лабораторные работы по теме «Позиционно-чувствительные детекторы на основе полупроводниковых фотоприемников», разработанные совместно с сотрудниками ЛАЯ и ЛРЯФ.

Проведены тестовые измерения с прототипом позиционно-чувствительного детектора тепловых нейтронов на основе сцинтиллятора ZnS/LiF, световодов прямоугольного сечения (20 кв.мм) и микропиксельных фотодиодов (совместно с ЛНИ ИЯИ).

Результаты работ были доложены на конференции по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах РНСИ-КС-2014 27-31 октября 2014 г., Санкт-Петербург [15].

Тезисы доклада В.С.Литвин, В.Н.Марин, С.Х.Караевский, и др., "Двухкоординатные сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе твердотельных фотоумножителей и световодов" опубликованы в сборнике тезисов докладов конференции.

9.6 Разработка и синтез соединений лития для изготовления полистирольного сцинтиллятора, регистрирующего нейтроны.

В течение 2014 года совместно с ИФВЭ (Протвино) продолжены работы в рамках программы разработки и создания нейтронного полистирольного сцинтиллятора (НПС). Для получения НПС с повышенной сцинтилляционной эффективностью (СЭ) были опробованы в качестве активатора соединения класса бензоксазолов (диметил-аминофенил-бензоксазол ВО) и индолов (1 метил-2 бифенилин-индол).

Измерены СЭ образцов полистирольного сцинтиллятора разных составов (в зависимости от концентрации активатора в пределах 0,5 – 5%). Получены графики зависимости СЭ образцов от концентрации активатора в стироле. Амплитуды максимумов кривых изготовленных образцов лежат в районе 1 – 2% и в пределах ошибки измерения равны максимуму СЭ эталона (стирол + 2% PT + 0,05% POPOP).

Образцы НПС, полученные методом полимеризации в ампулах стирола, имеют более однородный состав и без пузырьков и более высокую прозрачность по сравнению с образцами, полученными методом прессования гранул полистирола. Для изготовления образцов НПС чувствительной части детектора тепловых нейтронов необходимо продолжить в следующем году отработку полимеризации стирола в ампулах с увеличением их объема не менее чем в два раза. Для проведения измерений изготовлен образец модуля детектора из НПС в виде тонкого параллелепипеда с двумя лавинными фотодиодами.

9 Заключение

В 2014 г. лабораторией ЛМДН и ЭЧ в ходе выполнения задания НИР по разработке новых (альтернативных) методов регистрации космических нейтрино и других частиц:

1. Составлен проект о проведении совместных российско-греческих глубоководных исследований вблизи берегов Греции (в рамках действующего межправительственного соглашения о научно-технологическом сотрудничестве между Россией и Грецией и договора ИЯИ РАН с Институтом ядерной физики и физики частиц, научно-исследовательским центром «Демокритос» в Афинах).

Тема проекта:

«Разработка и создание компонентов глубоководного нейтринного телескопа в Средиземном море и новых эффективных технологий и технических средств для многоцелевых исследований морской среды» (проект НЕСТОР – САДКО, научный руководитель с российской стороны академик В.А. Матвеев).

2. Подготовлена (совместно с ПРАО ФИАН) заявка на участие в конкурсе 2015 г. по программе Президиума РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика».

Предполагаемый проект нацелен на развитие радиоастрономического метода детектирования космических нейтрино и протонов (ядер) экстремально высоких энергий, «бомбардирующих» Луну, с применением радиотелескопов на Земле, в частности, сооружаемого гигантского радиотелескопа СКА.

Тема проекта:

«Разработка и создание пилотной установки - системы антенн, способных регистрировать импульсы в метровом радиоволновом диапазоне» (научный руководитель Р.Д. Дагкесаманский).

3. Продолжена разработка метода быстрого моделирования «трехмерных» электронно - адронных каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий, выполнен расчет электронно-фотонных каскадов с энергиями 10^{15}-10^{21} эВ в веществе с целью дальнейших расчетов производимых ими акустических и радио сигналов.

4. Проведены гидроакустические исследования, связанные с проектом НЕСТОР:

испытан лабораторный образец компактной лазерной установки для глубоководных измерений термоупругих свойств воды (в частности коэффициента Грюнайзена).

5. Выполнялась разработка МЛФД-матриц и лабораторных образцов позиционно-чувствительных детекторов элементарных частиц на основе лавинных фотодиодов. Для создаваемой в России межведомственной программы «ФОТОНИКА» совместно с ОИЯИ (Дубна) предложено направление «Однофотонные устройства приема и обработки

информации» и предложен проект: «Разработка сверхчувствительных и быстродействующих полупроводниковых матричных лавинных фотоприемников и создание на их основе оптических систем обнаружения и распознавания удаленных объектов».

6. Продолжены работы по отработке технологии получения нейтронного полистирольного сцинтиллятора.

9 Литература. Список научных публикаций и докладов.

1. S.R. Klein. IceCube collaboration, 2013, arXiv:1311.6519 [astro-ph.HE].

2. И.М. Железных. О взаимодействии нейтрино высоких энергий в космических лучах с веществом. Дипломная работа, физический факультет, МГУ, 1958.

M.A. Markov. Proc,10 Int. Conf. High-Energy Physics, Rochester, 1960, p. 579.

M.A. Markov, I.M. Zheleznykh. On high energy neutrino physics in cosmic rays. Nucl.Phys., 1961, v.27, pp. 385-394.

3. Г.А.Гусев, И.М. Железных. О детектировании мюонов и нейтрино по радиоизлучению каскадов, производимых ими в диэлектрических средах. Письма в ЖЭТФ, т. 38, стр.505-507, 1983.

4. I.M. Zheleznykh (Moscow, INR). Prospects for large scale detectors of superhigh energy neutrinos (10^{15} eV to 10^{20} eV). Published in "Boston 1988, Proceedings of the 13th Int. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics", ed. J.Schneps, T. Kafka et al., World Scientific, pp. 528-535.

Р.Д. Дагкесаманский, И.М. Железных, Радиоастрономический метод регистрации нейтрино и других элементарных частиц супервысоких энергий. Письма в ЖЭТФ, т. 50, вып.5, стр. 233-235, 1989.

5. I.N. Boldyrev, M.A. Markov, A.L. Provorov, I.M. Zheleznykh et al. RAMAND: a status report. "Venice 1991", Proc. of the 3d Int. Workshop on Neutrino Telescopes, ed. Baldo-Ceolin, pp. 337-355.

6. Березняк А.Р., Дагкесаманский Р.Д., Железных И.М., Коваленко А.В.,Орешко В.В., «Ограничения на поток нейтрино сверхвысоких энергий по радиоастрономическим наблюдениям», Астрон. журнал, 82, № 2, 1-8 (2005).

7. V.A. Matveev, I.M. Zheleznykh, P.I. Korotin, V.T. Paka, N.M. Surin/ " Alternative Techniques for dear-water monitoring"//Nuclear Instr. & Methods in Phys. Res. A 626-627 (2011) S106-S108.

8. R.D. Dagkesamanskii, V.A. Matveev, I.M. Zheleznykh/ "Prospects of radio Detection of extremely high energy neutrinos bombarding the Moon"//Nuclear Instr. & Methods in Phys. Res. A 626-627 (2011) S44-S47.

9. D. Besson, R. Dagkesamanskii, E. Kravchenko, I Kravchenko, I. Zheleznykh/ "Tethered balloons for radio detection of ultra high energy cosmic neutrinos in Antarctica"//Nuclear Instr.& Methods in Phys. Res. A662 (2012) S50-S53.

10. I.M. Zheleznykh, Z.Ya. Sadygov, B.A. Khrenov, A.F. Zerrouk./ Prospects of Application of Multi-pixel Avalanche Photo Diodes in Cosmic Rays Experiments// Proc. 32nd ICRC, Beijing, 11-18 Aug. 2011.

11. Z. Sadygov A. Ariffin, I. Zheleznykh et al./”Technology of manufacturing micropixel avalanche photodiodes and a compact matrix on their basis”// Physics of Particles and Nuclei Letters, 2013, Vol. 10, No. 7, pp. 780-782.

12. Igor Zheleznykh, Leonid Dedenko, Grigorii Dedenko, Anna Mironovich,“Simulation of cascades caused by UHE and EHE neutrinos in dense media”, report at Int. Cosmic Ray Conf., Rio de Janeiro, Brazil, 2-7 July 2013.

13. J.D.Bray, J.Alvarez-Muniz, S.Buitink, R.D.Dagkesamanskii, R.D.Ekers, H.Falcke, K.G.Gayley, T.Huege, C.W.James, M.Mevius, R.L.Mutel, R.J.Protheroe, O.Scholten, R.E.Spencer, S.ter Veen// Lunar detection of ultra-high-energy cosmic rays and neutrinos with the Square Kilometre Array // arXiv: 1408.6069v2, 19 Dec. 2014.

14. З. Садыгов, А. Ариффин, И. Железных, Ф. Зерроук и др. «Технология производства лавинных микро- пиксельных фотодиодов и матриц на их основе». Письма в Журнал Физика Элементарных Частиц и Атомного Ядра. № 1(185), стр. 105-110, 2014.

15. В.С.Литвин, В.Н.Марин, С.Х.Караевский, и др., "Двухкоординатные сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе твердотельных фотоумножителей и световодов", доклад на Конференции по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах (РНСИ-КС-2014), 27-31 октября 2014 г., Санкт-Петербург.

9 Приложение 1

Кому:
zhelezny@minus.inr.ac.ru<zhelezny@minus.inr.ac.ru>;rdd@prao.ru<rdd@prao.ru>;Robert Mutel<robert-mutel@uiowa.edu>;Ken Gayley<ken.gayley@gmail.com>;Ray Protheroe<ray.protheroe@gmail.com>;Ron Ekers<Ron.Ekers@csiro.au>;Jaime Alvarez-Muniz<jaime.alvarezmuniz@gmail.com>;Peter Gorham<gorham@phys.hawaii.edu>;David Saltzberg<saltzbrg@physics.ucla.edu>;mevius@astron.nl<mevius@astron.nl>;ben.stappers@manchester.ac.uk<ben.stappers@manchester.ac.uk>;ralph.spencer@manchester.ac.uk<ralph.spencer@manchester.ac.uk>;German Gusev<gusevgag@mail.ru>;

Dear all,

You are hereby invited to participate in the drafting of a chapter on the feasibility of using the Square Kilometre Array to detect ultra-high-energy particles (neutrinos and cosmic rays) hitting the Moon. The chapter is currently being prepared for the SKA science meeting in June in Sicily to update the SKA science case:

https://indico.skatelescope.org/conferenceDisplay.py?ovw=True&confId=270

You are being invited on behalf of the undersigned because of your previous involvement with the lunar technique, and because we believe that the challenges of using the SKA for UHE particle searches can only be met by a large collaboration. This email is only a request for an informal commitment - however, some help with drafting the document will be expected. Our hope is to gather all interested parties in order to make the very best case possible for using the SKA for UHE particle detection, with the expectation that this group will form the nucleus of a future collaboration.

An abstract for this chapter was submitted last Friday, and is attached below. We apologise that there was no time to have a broader discussion before submission - however, we only became aware of the deadline at the last minute. Note that we do not intend a-priori to make any statements on the relative feasibility of neutrinos vs cosmic rays, high vs low frequencies, and/or the previous efforts of one collaboration or another.

Please reply if you are interested in being part of this effort. We look forward to hearing your response.

Regards,

J. Bray, S. Buitink, H. Falcke, T. Huege, C.W. James, O. Scholten, F. Schröder, and S. ter Veen

email: clancy.james@physik.uni-erlangen.de

Ph: +49 (0) 9131-85-28961

Erlangen Centre of Astroparticle Physics (ECAP),
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
Erwin-Rommel Straße 1
91058 Erlangen
GERMANY

10 Лаборатория нейтринной астрофизики

Руководитель работ д.ф.-м.н. Р.А.Мухамедшин.

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов ШАЛ и взаимодействий адронов при энергиях 10^{14} – 10^{18} эВ.

Тёмная материя и темная энергия в астрофизике космических лучей.

Руководитель работ д.ф.-м.н. В.И.Докучаев.

Топология магнитного поля, динамика Солнца и потоки нейтрино.

Руководитель работ к.ф.-м.н. Е.А.Гаврюсева.

Новые свойства атомных ядер и нейтрино и их роль в формировании новых явлений в физике и астрофизике. Руководитель работ к.ф.-м.н. Ю.С.Копысов.

Нейтринные эксперименты в Фермилабе. Руководитель работ д.ф.-м.н. А.В.Буткевич.

Поиск двойного безнейтриного бета распада изотопа 76Ge. Руководитель работ к.ф.-м.н. И.Р.Барабанов

Разработка жидкого органического сцинтиллятора с ультранизким содержанием радиоуглерода (14C) для регистрации нейтрино низких энергий. Совместно с БНО. Руководитель работ к.ф.-м.н. Е.А.Янович.

Регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Руководитель работ к.ф.-м.н. А.В.Копылов.

Безнейтринный двойной бета распад. Руководители работ д.ф.-м.н. Л.Б.Безруков, к.ф.-м.н. И.Р.Барабанов

Измерение сечений взаимодействия нейтрино с ядрами углерода. Руководитель работ д.ф.-м.н. А.В.Буткевич

Тунка. Руководитель работ д.ф.-м.н. Б.К.Лубсандоржиев

Активные процессы в галактических и внегалактических объектах. Тёмная материя и тёмная энергия в астрофизике космических лучей. Руководитель работ д.ф.-м.н. В.И.Докучаев.

Исследование содержания изотопа С14 в углеводородах. Руководители работ к.ф.-м.н. Е.А.Янович, к.ф.-м.н. А.М.Гангапшев.

10.3 Поиск двойного безнейтриного бета распада изотопа 76Ge

Руководитель работ к.ф.-м.н. И.Р.Барабанов

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

10.3 Реферат

Поиск безнейтринного двойного бета-распада ядер является в настоящее время одной из центральных задач экспериментальной физики низких энергий. Его целью является определением природы массы нейтрино (Дираковской или Майорановской) и возможным нарушением лептонного числа. Решение этих задач будет иметь фундаментальные следствия для физики частиц и космологии. Эксперимент GERDA предполагает создание детектора нового поколения с ультранизким фоном для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge. Основным преимуществом проекта является применение пассивной защиты из жидкого инертного газа и создание германиевых кристаллов нового типа, обеспечивающих высокую степень дискриминации фоновых событий по форме импульса. Проект включает три последовательные фазы. В 2013 г. Завершена первая фаха эксперимента. В результате получен верхний предел для периода полураспада ^{76}Ge – $2{,}1\cdot10^{25}$ лет (90%). В 2014 г велась полномасштабная подготовка второй фазы эксперимента, в которой наряду с модифицированными старыми кристаллами, будут использованы 30 новых кристаллов нового типа (кристаллы с точечным анодом, так наз. BTG кристаллы.

10.3 Введение

ДВОЙНОЙ БЕТА-РАСПАД (2β0ν) - особый вид бета-распада ядер, при к-ром ядро испускает два электрона или позитрона, превращаясь в ядро-изобару с зарядом $Z \mp 2$ (Z - заряд родительского ядра). В случае сохранения лептонного числа Д. б--р. сопровождается испусканием двух электронных антинейтрино или нейтрино :

$$\left.\begin{array}{l} A\,(Z,\ N) \to A\,(Z+2,\ N-2) + 2e^- + 2\tilde{\nu}_e; \\ A\,(Z,\ N) \to A\,(Z-2,\ N+2) + 2e^+ + 2\nu. \end{array}\right\} \quad (1)$$

Если лептонное число не сохраняется, нейтрино может быть истинно нейтральной частицей, т. е. совпадать со своей античастицей. Такое нейтрино называют майорановским. В этом случае возможен **2β0ν** распад:

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

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

1) нейтрино является майорановской частицей

2) масса нейтрино отлична от нуля.

В современной “классической” Стандртной модели частиц масса нейтрино строго равна нулю и БДБР несозможен. Однако одним из велиуих физических открытий начала 21-го века является открытие эффекта осцилляции нейтрино. Существование этого эффекта однозначно свидетельствует о наличии массы нейтринои необходимости рашрениеяСтандртной модели ипроцесс БДБР становитсяворзможным. Результаты экспериментов позволяют определить толь разности квадратов масс различных типов нейтрино, но не позволяют определить их абсолютные значения.

В простейшем раширенииСтандртной модели БДБР происходит в результате обмена легкими Майорановскими нейтрино или смесь правых токов в слабом взаимодействии. Этот процесс может быть также инициирован обменом суперсимметричных частиц и рассматривается в некоторых суперсимметричных моделях. Распад ($0\nu\beta\beta$) является очень чувствительным источником для определения эффективной массы майорановского нейтрино, которая определяется как

$$\langle m_{ee} \rangle = \left| \sum_i U_{ei}^2 m_i \right|,$$

где U_{ei} – матрица смешивания, m_i – соответствующие собственные значения масс. Период полураспада для безнейтринного двойного бета-распада обратно пропорционален квадрату массы майорановского нейтрино:

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} \, |M_{GT}^{0\nu}|^2 \left(\frac{\langle m_{ee} \rangle^2}{m_e^2} \right),$$

где $G^{0\nu}$ – фазовый объем, $M_{GT}^{0\nu}$– матричный элемент перехода. Таким образом поиск БДБР позволяет в случае положительного результата подтвердить майорановскую природу нейтрино (как и предполагается в простейших моделях расширения Стандртной модели, так и получить оценку ее массы. Другим следствием наблюдения БДБР, возможно даже более важным как для физики частиц, так и для космологии, было бы открытие нарушение закона сохранения лептонного числа.

10.3 Основная часть. Эксперимент GERDA

Эксперимент GERDA (Germanium Detector Array) предполагает создание детектора нового поколения с ультранизким фоном для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge. Сотрудничество GERDA состоит из 13 институтов из 5 стран. Принципиальная схема эксперимента GERDA основана на более раннем предложении расположить открытые Ge

детекторы внутри жидкого газа большого объема. Эта идея основана на выводе из результатов предшествующих экспериментов с германиевыми детекторами, что фоновые сигналы в значительной мере определяются внешним излучением Для достижения низкого уровня фона используется комбинированная защита: в большой водяной бак со сверхчистой водой установлен цилиндрический криогенный сосуд диаметром 4 м и длиной 6 м из нержавеющей стали, содержащий жидкий аргон высокой чистоты. Для снижения фона от материала криостата на его внутренней поверхности установлена дополнительная защита из меди высокой чистоты.

В центре криостата установлены безоболочечные германиевые детекторы, обогащенные по изотопу Ge-76 (86%) с общей массой 20 кг на первой стадии эксперимента. Для контроля фона установлено также 2 кристалла из германия натурального состава. Эскиз принципиальной схемы GERDA изображен на рис. 1.

Жидкий инертный газ, используемый в качестве пассивной защиты, может быть очищен до высокой степени чистоты по радиоактивным примесям, недоступной для твердотельной защиты, используемой в предыдущих экспериментах.

Рис. 1. Схема установки GERDA

Проект включает три последовательные фазы. Целью проекта является достижение индекса фона на уровне 10^{-3} /кэВ.кг.год к концу второй фазы эксперимента и на основании полученных результатов разработку крупномасштабного проекта с массой ~ 1 тонны ^{76}Ge. В

первой Фазе эксперимента использовались детекторы ^{76}Ge, которые применялись в предыдущих экспериментах HDM и IGEX (в общей сложности около 18 кг).

В течение 2013 г. закончена первая фаза эксперимента. Используемые в анализе данные были получены в период ноябрь 2011 – май 2013 с полной экспозицией 21,6 кг.год. Достигнутый индекс фона составляет 10^{-2} /кэВ.кг.год при использовании дискриминации по форме импульса. Полученный результат представлен на рис 2.

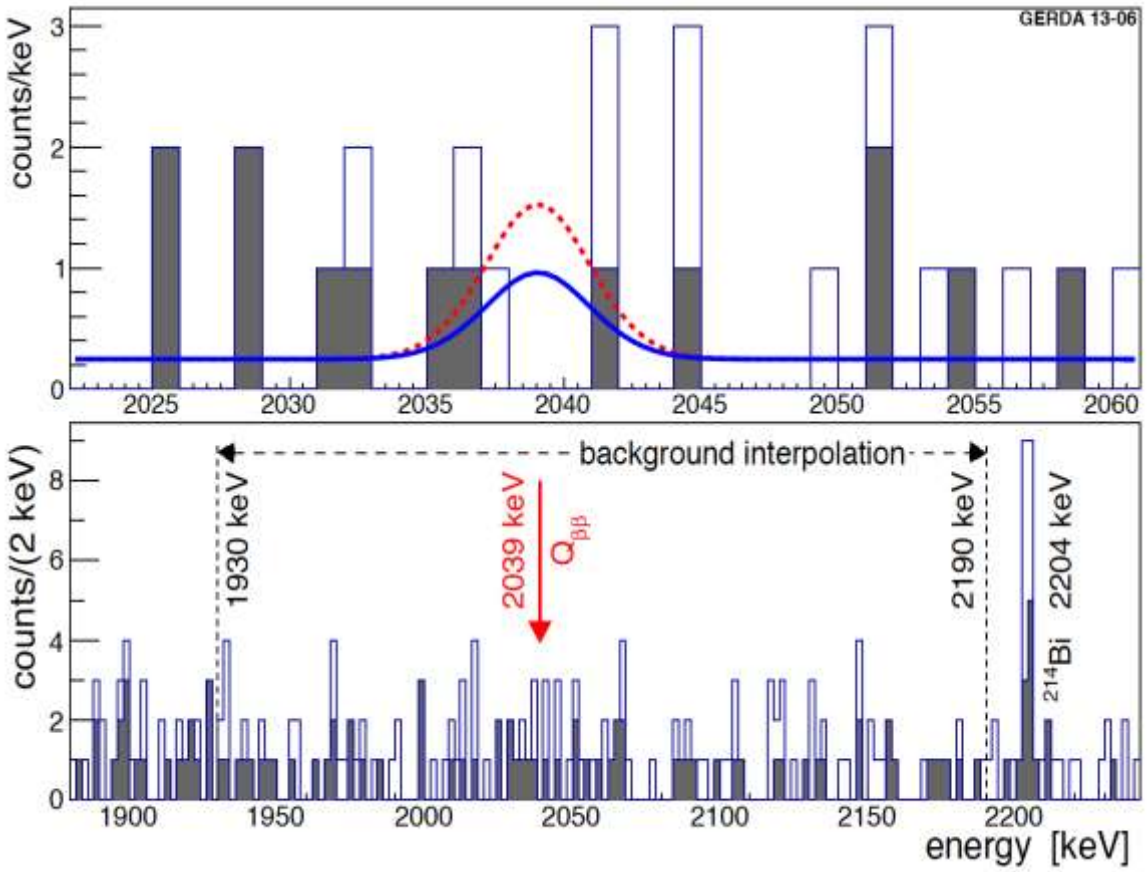


Рис 2. Спектр зарегистрированных событий при экспозицией 21,6 кг.год

В области **2β0ν** распада зарегистрировано 3 события при ожидаемых 2,5 событиях от фона. Из отсутствия сигнала получен верхний предел для периода полураспада ^{76}Ge – $2{,}1\cdot10^{25}$ лет (90%).

Результат является наилучшим по сравнению сдругим современными экспериментами по поиску двойного безнейтринного бета распада.

Результат внес окончательную ясность в 10-летнюю проблему интригующего положительно результата в эксперименте Клапдора на основании данный эксперимента Гайдельберг-Москва.

Вторая фаза эксперимента

В 2014 г началась полномасштабная подготовка второй фазы эксперимента

1. Изготовлены , испытаны и подготовлены к установке в криостат 30 кристаллов нового типа (кристаллы с точечным анодом, так наз. BEG детекторы) из обогащенного 76 Ge. (рис.3)

2. Модернизированы и готовы к использованию коаксиальные детекторы, используемые в первой фазе эксперимента, которые предполагается использовать во второй фазе эксперимента в параллель с новыми детекторами.

3. Смонтирован первый стринг (Рис.4) из новых детекторов и готов к установке в криостат.

4. Изготовлена новая система верхнего блока (рис. 5), обеспечивающая герметичность криостата. Общий вес блока 60 кг. Новая конструкция обеспечит установку и съем данных с 4 стрингов новых детекторов и 3-х стрингов старых детекторов, использованных в первой фазе.

5. Измерена активность радона с новой системой верхнего блока 12,5 мБк, что не вносит существенного увеличения в фон криостата

6. Изготовлена и испытана система регистрации сцинтилляционного сигала в жидком аргоне. Система состоит их набора оптических волокон диаметром 470 мм и длинной 2200 мм, просматриваемых[16-ю ФЭУ. Система будет окружать германиевые детекторы и включена на антисовпадения с ними.

На основе данных, полученных в первой фазе, выполнен поиск:

1) $2\nu2\beta$ распада на возбужденные уровни 76Se (2_1^+, 0_1^+, 2_2^+), который должны существовать в рамках Стандартной модели. Из отсутствия сигнала получены верхние пределы для искомых распадов на уровне 10^{23} – 10^{25} лет.

2) $2\nu2\beta$ 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.

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

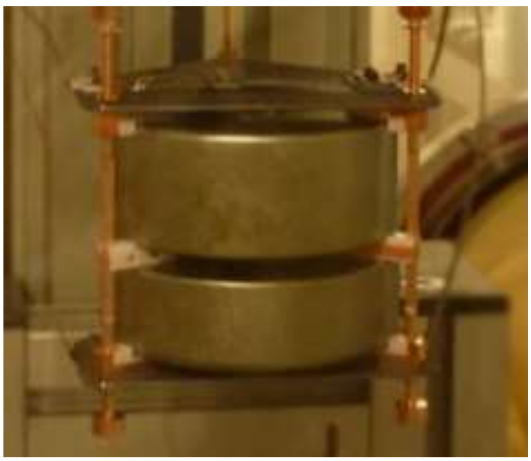


Рис.3. Новые детекторы в собранном виде.

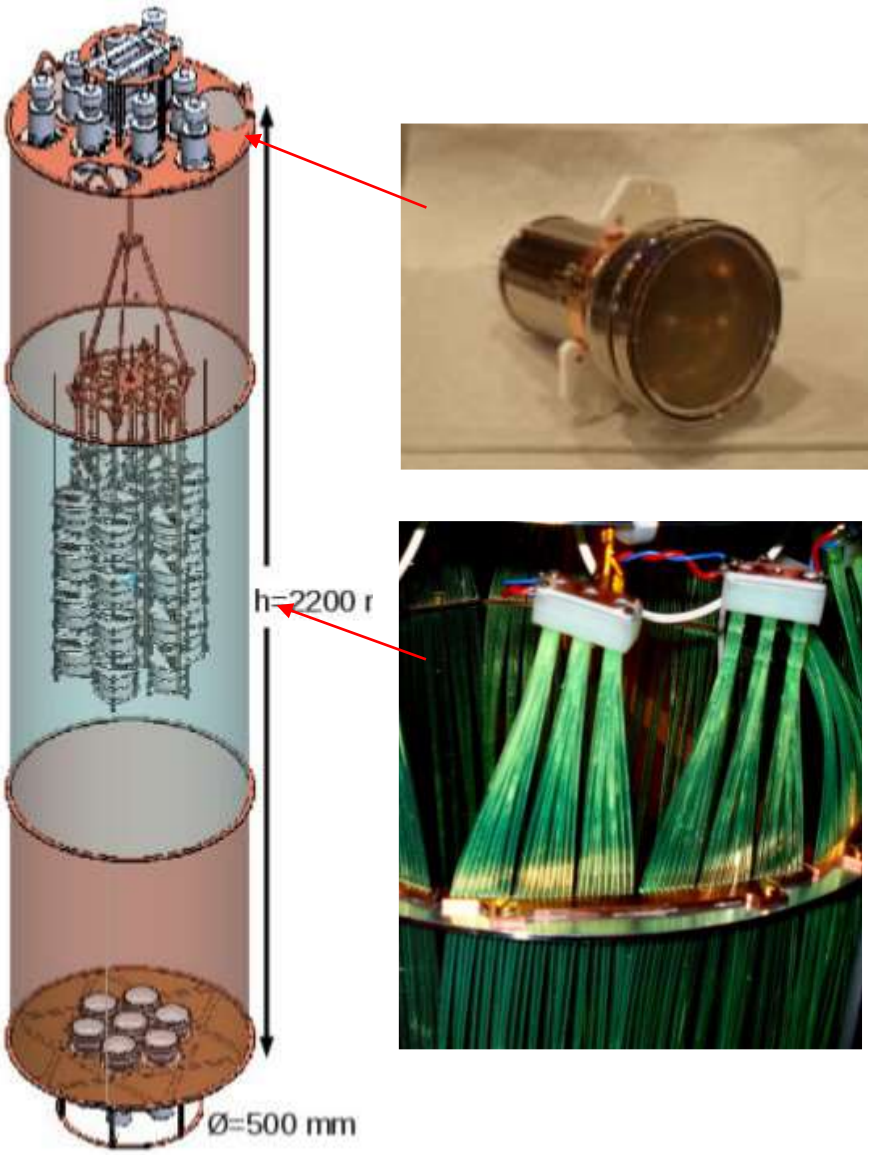


Рис.4. Схема второй фазы эксперимента.

Рис.5. Новый Ø540 (вертикальный) запорный блок для Ø490 LAr вето

10.3 Заключение

В течение 2014г выполнена вся необходимая подготовительная работа для начала второй фазы эксперимента. Основная цель второй фазы эксперимента снижение уровня фона на порядок по сравнению с результатом первой фазы до уровня 10^{-3} /кэВ.кг.год

Из анализа данных, полученных в первой фазе эксперимента получены:

1. Верхние пределы для 2ν2β 76Ge распада 76Ge на возбужденные уровни 76Se
2. Ограничения для 2ν2β распада 76Ge с участием майорона для различных мод распада.

10.3 Публикации:

1,GERDA Col “The background in the neutrinoless double beta decay experiment GERDA”, EPJC 74 (2014) 2764.

2. GERDA Col “**Neutrinoless double beta decay**” **CERN COURIER,** Feb 24, 2014,

3. GERDA Col ” Production, characterization and operation of 76Ge enriched BEGe detectors in GERDA” Принято к печати в Eur. Phys. J. C (2014)

10.4 Новые свойства атомных ядер и нейтрино и их роль в формировании новых явлений в физике и астрофизике

10.4 РЕФЕРАТ

Начата программа исследований с целью сформулировать теоретическую концепцию холодной трансмутации атомных ядер (ХТЯ) не выходя за рамки традиционной ядерной физики. Предложена возможная модель ХТЯ на примере трёхчастичных ядерных реакций с участием изотопов водорода $^{2}\mathrm{D}$, $^{1}\mathrm{H}$ и бериллия $^{9}\mathrm{Be}$, входящих в состав молекул $^{9}\mathrm{BeD_2}$ и $^{9}\mathrm{BeDH}$:

$^{2}\mathrm{D} + {}^{2}\mathrm{D} + {}^{9}\mathrm{Be} \Longrightarrow [{}^{13}\mathrm{C}^{*}] \Longrightarrow$ конечные продукты,

$^{2}\mathrm{D} + {}^{1}\mathrm{H} + {}^{9}\mathrm{Be} \Longrightarrow [{}^{12}\mathrm{C}^{*}] \Longrightarrow$ конечные продукты,

где $[{}^{13}\mathrm{C}^{*}]$ и $[{}^{12}\mathrm{C}^{*}]$ — ядерно-молекулярные активированные комплексы (ЯМАК), содержащие внутри себя высоковозбуждённую разрушенную альфа-частицу, а $^{9}\mathrm{Be}$ — ядро-катализатор, который исходные молекулы превращает в ядерно-молекулярные активированные комплексы, распадающиеся на конечные продукты нуклеосинтеза, включая $^{3}\mathrm{He}$, $^{3}\mathrm{H}$, сопутствующие нейтроны, протоны и умеренное энерговыделение. Ядерно-молекулярные активированные комплексы представляют собой составные рыхлые ядра веретенообразной формы, оси которых совпадают с осями исходных молекул, имеющих линейную форму. ЯМАК являются виртуальными магистральными состояниями (doorway), а весь процесс ХТЯ можно описывать в рамках теории возмущений не ниже второго порядка, включая и процесс кумулятивного преодоления кулоновского барьера. Наиболее простой вариант модели ЯМАК, с которого можно начать исследование и расчёты ХТЯ, — модель анизотропного осесимметричного осцилляторного потенциала, описывающего нуклонное гало активированного комплекса, составленного из нуклонов разрушенной альфа-частицы и, возможно, нейтрона из ядра $^{9}\mathrm{Be}$. Найдены теоретические аргументы в пользу возможности протекания аналогичных процессов с участием в качестве ядра-катализатора изотопов никеля.

10.4 ВВЕДЕНИЕ

В последней четверти века в зарубежных странах и в России развивается новое направление в науке, которое в разных странах имеет разное название: В Италии и Японии – это “Condensed Matter Nuclear Science” (CMNS), в США – “Low Energy Nuclear Reactions” (LENR) (международные конференции проводились под названием International Conference on Cold Fusion” (ICCF)), в России – Холодная трансмутация атомных ядер (ХТЯ). По этой теме в России была проведена 21 конференция и 13-я международная конференция ICCF13.

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о появлении избыточного тепловыделения в различных экспериментах с ме-

таллами, насыщенными водородом, обогащённым дейтерием, а также следов ядерных излучений типа гамма-квантов, нейтронов, трития. Несмотря на большой поток работ, авторы которых пытаются разобраться в физической сущности новых явлений, единой теоретической концепции наблюдаемых процессов не существует. В истекшем 2014 году были проведены исследования с целью сформулировать теоретическую концепцию ХТЯ, не выходящую за рамки традиционной ядерной физики.

10.4 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первые намётки такой концепции содержатся в работе [1], доложенной Г. Т. Зацепиным в апреле 1978 г. в Вашингтоне на мемориальном симпозиуме, посвящённом памяти К. Л. Коуэна. Обсуждалась возможность каталитического ускорения *pp*-реакции водородной цепи в присутствии третьей частицы-нуклида. Отмечалось, что необходимое условие ускорения – существование рыхлых составных ядер, т. н. «активированных ядерных комплексов». Оставался невыясненным вопрос, какова природа рыхлых ядерных состояний. Решение этого вопроса было предложено в докладах [2,3,4,5,6]. В рамках теории самосогласованного поля ядра была разработана гипотеза о существовании процесса кумулятивного преодоления кулоновского барьера. Процесс осуществляется через формирование и распад квазистационарной протяжённой осесимметричной ядерной структуры, которая является ключевым пунктом новой концепции. В качестве рабочей гипотезы предполагается, что такие ядерные структуры служат основой для осуществления процессов ХТЯ.

В настоящем исследовании особое внимание уделено трёхчастичной ядерной реакции, протекающей внутри молекулы $^{9}\mathrm{Be}^{2}\mathrm{D}_2$:

$$^{2}\mathrm{D} + {}^{2}\mathrm{D} + {}^{9}\mathrm{Be} \Rightarrow [^{13}\mathrm{C}^{*}] \Rightarrow \begin{cases} {}^{9}\mathrm{Be} + {}^{3}\mathrm{He} + n + 3{,}27\ \text{МэВ} & (1) \\ {}^{9}\mathrm{Be} + {}^{3}\mathrm{H} + p + 4{,}03\ \text{МэВ} & (2) \\ {}^{8}\mathrm{Be} + {}^{3}\mathrm{He} + 2n + 3{,}61\ \text{МэВ} & (3) \\ {}^{8}\mathrm{Be} + {}^{3}\mathrm{H} + p + n + 2{,}37\ \text{МэВ} & (4) \end{cases},$$

Причина этого состоит в том, что нам необходимо, чтобы в состав ЯМАК входила разрушенная альфа-частица, благодаря которой можно осуществить кумулятивный процесс втягивания заряженных нуклидов внутрь компактного ядра. Это можно реализовать следующим образом. Два дейтрона в состоянии с изоспином $T = 0$ и спином $S = 1$, входящие в состав линейной молекулы BeD_2 с противоположными спинами уже сами по себе составляют квазистационарное пороговое состояние возбуждённой до возможности распада альфа-частицы, квантовые числа которой могут совпадать с квантовыми числами её основного состояния. Есть ещё и другое возбуждённое состояние с теми же характеристиками, но составленное из двух возбуждённых дейтронов, состоящих из протона и нейтрона в синглетном состоянии с изоспином $T = 1$ и спином $S = 0$, энергия которого отличается от

энергии первого состояния. Благодаря этому возможен виртуальный переход из дейтронного в квазидейтронное состояние. Но в этом состоянии уже нет жёсткой связи нейтрона с протоном, и уровень квазидейтрона является виртуальным. Однако, в этом состоянии нейтроны, как и электроны молекулы D_2, могут оказаться спаренными, а вся молекула D_2 превращается в ядерно-молекулярный активированный комплекс. В этом состоянии резко уменьшается потенциальный барьер кулоновского поля благодаря самосогласованному притягивающему потенциалу нейтронов. В этом смысл кумулятивного процесса увеличения проницаемости кулоновского (и, возможно, центробежного) потенциального барьера. Если в центре такого ядерно-молекулярного комплекса окажется другое ядро, например, ^{4}He, ^{8}Be, ^{9}Be и др., то возможно резонансное каталитическое усиление кумулятивного эффекта за счёт возникновения более плотного веретенообразного нейтронного гало. Возможность протекания ХТЯ типа (1)–(4) становится очевидной, однако эти умозрительные рассуждения должны быть подкреплены прецизионными расчётами, прежде чем делать окончательные выводы о реализуемости описанных процессов. В 2015 году планируется подготовить необходимый теоретический аппарат и начать соответствующие расчёты. На первом этапе таких расчётов предполагается для описания самосогласованной структуры ЯМАК использовать осесимметрический анизотропный осцилляторный потенциал.

В качестве обоснования предлагаемого решения задачи приводятся следующие аргументы в пользу возможности существования кумулятивного процесса преодоления кулоновского барьера:

1. Двухпротонная радиоактивность – первый пример такого процесса.
2. Деформируемость ядер, осуществляемая посредством деформации самосогласованного ядерного потенциала, включая сильную деформацию нейтронного гало.
3. Для сильно возбуждённых ядер нет запретов на существование сильно вытянутого самосогласованного потенциала. Если удастся получить такое решение самосогласованной задачи, то, согласно квантовомеханическому пониманию эргодической гипотезы такие состояния ядер должны реализовываться в природе.

Получены предварительные указания на то, что ключевую роль для ХТЯ может играть нейтринный конденсат. Его возбуждение внешними воздействиями может служить спусковым механизмом для процессов ХТЯ. Экспериментальным указанием на существование нейтринного заряда может служить обнаруженный в ИЯИ РАН дефицит скорости счёта в экспериментах по калибровке солнечного галлий-германиевого нейтринного телескопа искусственными источниками нейтрино [7]. Этот дефицит может быть связан с переворотом спина нейтрино в геофизическом «магнитном поле» нейтринного типа, индуцированном геофизическими токами нейтринного заряда. Для проверки такой

возможности предлагается новый калибровочный эксперимент с секционированным 8-камерным (или 16-камерным) нейтринным детектором, способным измерять пространственную анизотропию скоростей счёта нейтрино от калибровочного нейтринного источника.

10.4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические исследования, проведённые в отчётном году, дают указание на возможность формулировать концепцию осуществления реакций ХТЯ, не выходя за рамки традиционной ядерной физики. Ключевую роль здесь должны играть кумулятивные процессы преодоления ядерного кулоновского барьера заряженными нуклидами, входящими в состав активированного ядерного комплекса. Интересную возможность дальнейших исследований кумулятивного эффекта предоставляет теория альфа-распада. Открывается возможность дальнейшего уточнения периодов полураспада альфа-распадных ядер и соответствующих «факторов запрета» для всех типов ядер, содержащих нечётное число нейтронов и/или протонов [6]. Повышение точности согласования рассчитанных факторов запрета с экспериментальными данными будет свидетельствовать в пользу существования кумулятивных процессов.

В связи с возможностью существования нейтринного заряда у атомных ядер и у нейтрино и вследствие этого появления новой физической реальности в форме почти вырожденного нейтринного конденсата в макроскопических объёмах любого вещества, появляется возможность активного влияния нейтринного конденсата на процессы ядерных превращений типа холодной трансмутации ядер. Эти процессы могут играть очень важную роль в процессах ядерных превращений, как в астрофизических, так и в лабораторных условиях.

10.4 ЛИТЕРАТУРА

1. Yu. S. Kopysov. “Solar neutrinos and the catalytic role of a third particle in hydrogen burning”. AIP Conference Proceedings No. 52, New York, 1979.

2. Ю. С. Копысов / Нейтринный заряд и холодная трансмутация ядер. // Доклад на 20-й Российской конференции по холодной трансмутации ядер химических элементов и шаровой молнии. Лоо, Сочи, Краснодарский край, 29 сентября – 6 октября 2013 г.

3. Ю. С. Копысов / Нейтринный заряд и холодная трансмутация ядер. // Программа и тезисы 20-й Российской конференции по холодной трансмутации ядер химических элементов и шаровой молнии. Москва, 2013, стр. 31.

4. Ю. С. Копысов / Нуклеохимия холодной трансмутации атомных ядер. (ХТЯ) // Приглашённый доклад на пленарном заседании L Всероссийской конференции по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Министерство образования и науки РФ, РУДН, Москва (13-16).05.2014.

5. Ю. С. Копысов / Нуклеохимия холодной трансмутации атомных ядер (ХТЯ) // L Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Тезисы докладов. Москва, РУДН, (13-16).05.2014, стр. 128.

6. Ю. С. Копысов / Кумулятивный процесс преодоления кулоновского барьера в реакциях холодной трансмутации атомных ядер // Доклад на международной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». МИФИ, Москва, (17-21).11.2014.

7. Ю. С. Копысов / Расширенная объединённая модель электрослабого взаимодействия с включением нейтринного заряда // Доклад на международной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». МИФИ, Москва, (12-16).11.2012.

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

Руководитель работ д.ф.-м.н. А.В. Буткевич

Исполнители:

ак. Матвеев В.А.

с.н.с. к.ф-м.н. Задорожный С.В.

с.н.с. к.ф-м.н. Кулагин С.А.

лаборант студент 6-го курса МФТИ Родкин Д.М.

лаборант студент 6-го курса МФТИ Лучук С.В.

10.5.1 Введение

Целью эксперимента MINERvA является изучение рассеяния нейтрино на ядрах. Детальное описание программы исследований и детектора опубликовано в arXiv:hep-ex/0405002 и на сайте эксперимента http://minerva.fnal.gov

Программа эксперимента включает измерение сечений взаимодействия нейтрино с различными ядерными мишенями в области энергий квази-упругого рассеяния, рождения резонансов и глубоко-неупругого рассеяния. Эксперимент находится в стадии набора данных и их анализа. Актуальность этих исследований обусловлена, в первую очередь, тем что неопределенности в сечениях квази-упругого и резонансного взаимодействий нейтрино с ядрами являются основными источниками систематических ошибок в ускорительных экспериментах с дальними нейтрино, в которых определяется вероятность выживания мюонных нейтрино и параметры нейтринных осцилляций после прохождения (анти)нейтрино больших расстояний.

Целью эксперимента NOvA является изучение $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций нейтрино. Программа эксперимента включает измерение числа событий, обусловленных взаимодействием электронных (анти)нейтрино, которые могут появиться в пучках мюонных (анти)нейтрино, в результате $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций. Это дает возможность измерить вероятность таких переходов, а следовательно, и угол смешивания θ_{13}, фазу нарушения CP инвариантности в лептонном секторе, а также определить иерархию масс нейтринных состояний. Наблюдение нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе, которое само по себе является открытием, явилось бы экспериментальным базисом для фундаментальной идеи лептогенезиса, которая объясняет барионную асимметрию Вселенной. Этот эксперимент, также, определит с высокой точностью и другие параметры осцилляций, что позволит понять

различие между смешиванием кварков и лептоннов. Описание программы исследований и детекторов можно найти на сайте www-nova.fnal.gov

10.5.2 Результаты, полученные в 2012-2014 гг.

В 2014 году закончилось строительство ближнего и дальнего детекторов NOvA и был осуществлен их физический запуск. Сейчас эксперимент находится в стадии набора и анализа данных в нейтринной моде пучка NuMI, мощность которого составляет 350 кВт. Теперь эксперимент NOvA использует самым мощным в мире пучком нейтрино и занимает лидирующие позиции в исследовании нейтринных осцилляций.

В эксперименте MINERvA, также был получен ряд важных результатов. Измерены отношения полных и дифференциальных сечений рассеяния нейтрино заряженным током на ядрах углерода, железа и свинца к сечениям, измеренным на ядрах сцинтиллятора (CH). Дифференциальные сечения усреднены по спектру нейтрино в пучке NuMI со средней энергией <E>=8 ГэВ. Это первые прямые измерения ядерных эффектов во взаимодействии нейтрино с разными мишенями с использованием одного и того же пучка нейтрино. Измеренные отношения как функции x (переменная Бьёркена) плохо согласуются с ожидаемыми распределениями, полученными в рамках современных моделей, описывающих ядерные эффекты в процессах неупругого рассеяния нейтрино.

Измерено, также, сечение когерентного рассеяния нейтрино заряженным током мюонных нейтрино и антинейтрино на ядрах углерода $\nu_\mu + {}^{12}C \rightarrow \mu + \pi + {}^{12}C$.

Этот процесс доминирует при малых значениях квадрата переданного 4-х импульса Q^2 и интересен тем, что в этом взаимодействии участвует только асиальный векторный ток. Измерены полные сечения этого процесса в области энергий нейтрино $1.5 < E < 20$ ГэВ, а также дифференциальные сечения по углу рассеяния пиона и по кинетической энергии пиона. Дифференциальные сечения усреднены по спектру нейтрино в пучке NuMI. Сечения для нейтрино и антинейтрино оказались, примерно, одинаковы, что обусловлено обменом только аксиальным током. Результаты таких измерений необходимы для нейтринных ускорительных экспериментов, в которых измеряются параметры нейтринных осцилляций. Одним из основных источников систематических неопределенностей в этих экспериментах являются неопределенности в сечениях взаимодействия нейтрино с ядрами.

На ряду с измерениями проводились и расчеты сечений квази-упругого рассеяния (анти)нейтрино на ядрах хлора в рамках современных моделей рассеяния частиц на ядрах, поскольку в материалах детектора NOvA содержится, примерно, 20% хлора.

10.5.3 Публикации в реферируемых журналах в 2014 г.

1. L. Aliaga et al. (MINERvA Collaboration), «Design, calibration, and performace of the MINERvA detector», Nucl. Instrum. Meth. A743,130-159 (2014)

2. A. Butkevich et al. «Determination of the axial nucleon form factor from the MiniBooNE data», Phys. Rev. D89,053014 (2014)

3. B.G. Tice et al. (MINERvA Collaboration), «Measurement of ratios of ν_μ charged-current cross sections on C, Fe, and Pb to CH at neutrino energies 2-20 GeV», Phys. Rev. Lett. 112,(2014)23, 231801

4 A. Higuera et al. (MINERvA Collaboration), «Measurement of coherent production of $\pi^\pm$ in neutrino and antineutrino beams on carbon from E_ν of 1.5 to 20 GeV», Phys. Rev. Lett. 113, (2014), 261802

Препринты электронные

B. G. Tice et al. (MINERvA Collaboration) / Measurement of ratios of ν_μ charged-current cross sections on C, Fe, and Pb to CH at neutrino energies 2-20 GeV // arXiv:1403.2103 [hep-ex]

A. Higuera et al. (MINERvA Collaboration) / Measurement of coherent production of $\pi^\pm$ in neutrino and anti-neutrino beams ob carbon from E_ν of 1.5 to 20 GeV // arXiv:1409.3835 [hep-ex]

B. Eberly et al. (MINERvA Collaboration) / Charged pion production in ν_μ interactions on hydrocarbon at $<E_\nu>$ =4 GeV // arXiv:1406.6415 [hep-ex]

T. Walton et al. (MINERvA Collaboration) / Measurement of muon plus final states in ν_μ interactions on hydrocarbon at $<E_\nu>$ =4.2 GeV // arXiv:1409.4497 [hep-ex]

Результаты были представлены на коллаборационных совещаниях, семинарах в Нейтринном Отделе Фермилаба. Сделано два доклада на 57 научной конференции МФТИ. Тезисы докладов опубликованы в электронном виде.

Адрес web-страницы эксперимента MINERvA http://minerva.fnal.gov и эксперимента NOvA http://www-nova.fnal.gov

10.6 Разработка сцинтиллятора с низким содержанием изотопа ^{14}C для регистрации нейтрино низких энергий

Руководитель работ д.ф.-м.н. Л.Б.Безруков.

Ответственный исполнитель: к.ф.-м.н. И.Р.Барабанов.

Исполнители: Ю. М. Гаврилюк, А. М. Гангапшев, В. И. Гуренцов, В. В. Кузьминов, Б. К. Лубсандоржиев, Г. Я. Новикова, В. В. Синёв, Е. А. Янович.

10.6.1 Реферат

В подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН, расположенной на глубине 4900 м.в.э., на базе сцинтилляционного детектора объёмом 1.5 л создана низкофоновая установка для измерения ультранизких концентраций изотопа ^{14}C в образцах жидкого органического сцинтиллятора. Проведена калибровка детектора с использованием гамма-источников Am-241, Ba-133, Cs-137. Измерен фон детектора. Из сравнения формы измеренного спектра с формой модельного спектра получено значение величины относительного содержания радиоуглерода $^{14}C/^{12}C$ в сцинтилляторе равное $(5.4 \pm 1.7)\cdot 10^{-17}$.

10.6.2 Введение

В последнее время широко рассматриваются проекты создания больших сцинтилляционных жидких детекторов, SNO+, LENA, JUNO, БНО ИЯИ РАН для регистрации крайне редких событий, в частности нейтринных потоков от различных природных источников. Фундаментальной задачей является измерение потоков антинейтрино от распадов U-238, Th-232 и K-40, содержащихся в земных недрах. Надёжная регистрация этих антинейтрино (геонейтрино) позволит установить вклад энерговыделения от радиоактивного распада этих элементов в общий тепловой поток Земли.

Регистрация редких событий сцинтилляционным детектором предъявляет исключительно высокие требования, как к внешнему, так и к внутреннему фону установки. Внутренний фон детектора, главным образом, определяется содержанием примесей радиоактивных элементов в жидком органическом сцинтилляторе (ЖОС). Так, в эксперименте Borexino (лаборатория Гран-Сассо, Италия), благодаря достигнутому очень низкому радиоактивному фону, удалось впервые зарегистрировать потоки солнечных ^{7}Be, pep нейтрино, а в последнее время из детального анализа спектра фона также был рассчитан поток солнечных pp-нейтрино. Трудность в измерении потока pp-нейтрино и его спектра с помощью детектора на основе жидкого органического сцинтиллятора во многом связана с

радиоактивностью изотопа ^{14}C, входящего в состав любых молекул углеводородов. Максимальная энергия электрона отдачи от рассеяния pp-нейтрино (E_{max}= 420 кэВ) в сцинтилляторе составляет 264 кэВ. Максимальная энергия β- распада ^{14}C – 156.48 кэВ. С учётом конечного энергетического разрешения (~ 10% в области 200 кэВ) и эффекта наложения импульсов от распада ^{14}C возможны события с энергией > 200 кэВ. При этом следует отметить, что сцинтиллятор детектора Borexino имеет минимальное содержание изотопа ^{14}C по сравнению с результатами измерений в других сцинтилляторах. Эта величина составляет $(2.7 \pm 0.1) \cdot 10^{-18}$ г/г ($^{14}C/^{12}C$). Расчёты, основанные на возрасте нефти, из которой был приготовлен сцинтиллятор (псевдокумол), с учётом глубины залегания и содержания радиоактивных элементов в окружающих породах дают для основных ядерных реакций, приводящих к образованию ^{14}C, предел на уровне $^{14}C/^{12}C < 10^{-21}$. Наблюдаемое расхождение измеренных концентраций изотопа ^{14}C в сцинтилляторах (Borexino, KamLAND) и расчётных значений может быть вызвано как технологическими факторами переработки нефти, так и более фундаментальной проблемой, связанной с условиями образования нефтяных месторождений.

10.6.3 Основная часть

В подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900 м.в.э. (3700 м от входа в туннель) установлен жидкий сцинтилляционный детектор для проведения систематических измерений ультранизких концентраций изотопа С-14, на уровне ~ 10^{-18} (С-14/С-12) в различных образцах жидкого органического сцинтиллятора. На этой глубине поток мюонов составляет ~ 0.1 $м^{-2}$ $час^{-1}$, что позволяет практически полностью подавить фон от космических лучей. Сцинтилляционный детектор размещён в специальной низкофоновой камере, стены которой выложены последовательно из слоёв полиэтилена (25 см), кадмия (1 мм) и свинца (15 см). Сам детектор размещён в коробе из орг. стекла (14.5*14.5 *120) $см^3$ и окружён со всех сторон защитой из особо чистой меди толщиной 15 см. Внутри медной защиты помещён сцинтилляционный модуль, представляющий собой сборку из кварцевой ячейки (Ф100х200 $мм^2$), заполненной жидким органическим сцинтиллятором ЛАБ (ВРО-2 г/л), двух световодов (100х100х300 $мм^3$) из акрила и двух фэу (3”). Первоначально установленные 3” фэу 110 были заменены на 3” ET9306. Для лучшего светосбора ячейка и световоды обёрнуты зеркальной отражающей плёнкой VM2000. На рис.1 изображена принципиальная конструкция, а на рис.2 показан открытый сцинтилляционный модуль в защите.

Рис.1. Принципиальная конструкция модуля.

Рис.2. Сцинтилляционный модуль внутри медной защиты.

Силиконовая смазка используется для лучшего оптического контакта между кварцевой ячейкой, световодом и ф.э.у. Герметичный чехол из полиэтилена, окружающий детектор снаружи, служит для защиты от радона. Из внутреннего объёма радон удаляется продувкой газообразным азотом. В качестве источника азота используется дьюар с жидким азотом.

Условия измерения ультранизких концентраций радиоуглерода делают необходимым использование в конструкции детектора элементов с низким содержанием радиоактивных примесей. С этой целью с помощью низкофонового полупроводникового детектора HPGe были проведены измерения интенсивности гамма-квантов от кварцевой ячейки с образцом

жидкого сцинтиллятора и ф.э.у. ET9306. По данным измерений были выполнены расчёты содержания радиоактивных примесей (Бк/кг) в ячейке с ЖОС и в фотоумножителе, табл.1.

Изотоп	***Кварцевая ячейка с ЖОС Активность в Бк/кг***	***ET9306 Активность в Бк/кг [Бк/ФЭУ]***
^{40}K	$\leq 1.0 \cdot 10^{-2}$	1.71 ± 0.09 [0.26 ± 0.01]
^{208}Tl	$\leq 9.4 \cdot 10^{-4}$	$(3.6 \pm 0.6) \cdot 10^{-2}$ [$(5.4 \pm 0.8) \cdot 10^{-3}$]
^{214}Bi	$(3.5 \pm 1.7) \cdot 10^{-3}$	1.21 ± 0.03 [0.180 ± 0.004]
^{228}Ac	$\leq 2.3 \cdot 10^{-3}$	0.10 ± 0.01 [$(1.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}$]

Измеренные для жидкого сцинтиллятора (ЛАБ+ВРО) характеристики световыхода и прозрачности дали соответственно значения ~ 8000 фотон/МэВ и 15 м (420 нм). Эти результаты позволяют в образцах большой массы проводить измерения в низкоэнергетической (< 50 кэВ) области спектра, где лежит большая доля событий от распада радиоуглерода.

Для энергетической калибровки детектора использовались три источника гамма-квантов: Am-241, Cs-137 и Ba-133.Энергии гамма квантов и энергия в пике наблюдаемого спектра представлены в таблице 2.

Источник	Энергия излучаемых гамма-квантов, кэВ	Энергия электрона отдачи при рассеянии назад, кэВ	Энергия в наблюдаемом пике, кэВ	Пик распре-деления, канал
^{137}Cs	661.657	477.334	440	3862
^{133}Ba	356.017 (45%) 302.853 (13.4%) 80.997 (25%) 79.614 (1.9%)	197.3	170 80	1308
^{241}Am	59.54 (93%) 26.34 (6%)		59.54	413.9

На рисунках 3,4,5 приведены измеренные и расчётные калибровочные спектры от Am-241, Ba-133, Cs-137. Спектры получены в результате суммирования сигналов с двух каналов осциллографа.

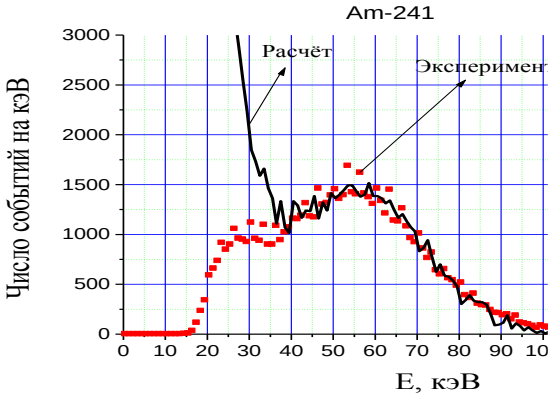


Рис.3 Спектр Am-241

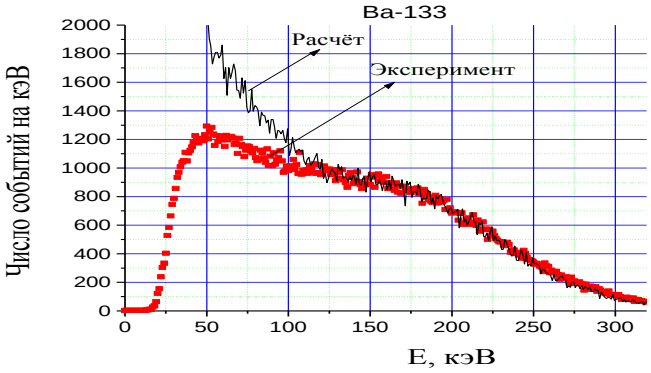


Рис.4. Спектр Ba-133

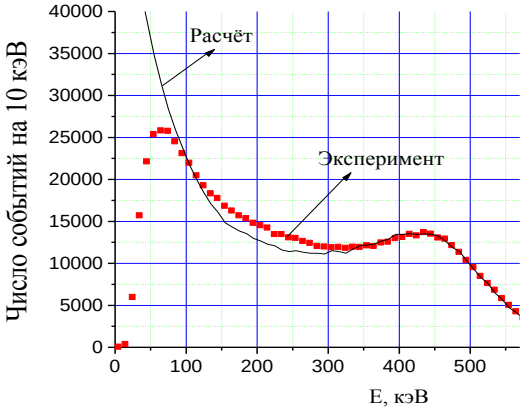


Рис. 5. Спектр Cs-137.

По полученным трём точкам (Am-241, Cs-137 и Ba-133) построена калибровочная кривая, которая с хорошей точностью описывается полиномом второй степени:

$$\mathbf{E=7.367+0.123*N - 2.455*10^{-6}N^2},$$

где E – энергия события в кэВ, а N – номер канала.

Энергетическое разрешение сцинтилляционной ячейки, пересчитанное на энергию 662 кэВ, равно 18 %.

Для вычисления содержания С-14 в сцинтилляторе на основе ЛАБа были использованы две методики расчёта. В первой методики для определения вклада изотопа ^{14}C в измеренный фон использовался метод минимизации функционала :

$$\mathbf{\{F_{exp}(E)- [A1+A2*EXP(A3/E)+A4*F_{beta}(E)]\},}$$

где $F_{exp}(E)$ – измеренный фон, $A4*F_{beta}(E)$ – бета-спектр изотопа ^{14}C с учётом энергетического разрешения детектора A1+A2*EXP(-A3/E) – аппроксимация фона, который в области малых энергий (20-200) кэВ хорошо описывается экспонентой.

Измеренный фон соответствует времени набора событий за 400.2 часа при скорости счёта 70 импульсов в час, при пороге регистрации 50 кэВ (Рис.6).

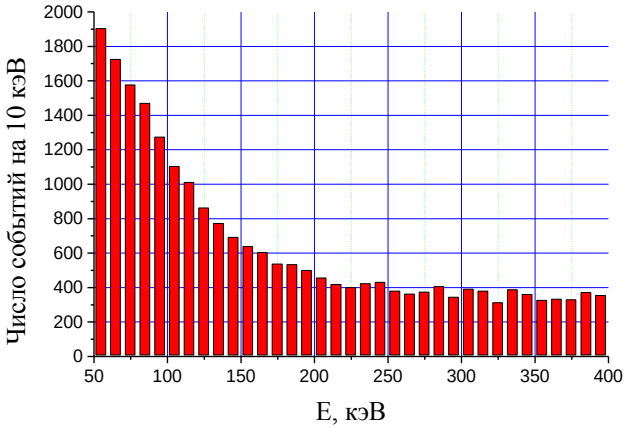


Рис.6 Измеренный фон сцинтилляционной ячейки за 400.2 часов.

Результатом аппроксимации фона, выполненной по этой методики, является верхняя граница содержания С-14 в сцинтилляторе $^{14}C/^{12}C < 3.7*10^{-17}$.

Второй метод определения содержания С-14 использовал стандартный пакет для обработки экспериментальных данных ROOTверсия 5.30/02 . Для вычисления концентрации ^{14}C в сцинтилляторе использовался экспериментальный спектр, полученный за 537.78 часов измерения. Скорость счета за время измерения составляла в среднем 92.5 импульсов в час. По результатам анализа получено значение $^{14}C/^{12}C$ равное $(5.4 \pm 1.7)\times10^{-17}$.

10.6.4 Заключение

Создана установка по измерению содержания радиоуглерода ^{14}C в образцах жидкого сцинтиллятора. Проведены первые измерения со сцинтиллятором на основе отечественного ЛАБа. По результатам одной из двух обработок формы спектра содержание ^{14}C оказывается на порядок больше, чем получено для сцинтиллятора Borexino. Наше измерение по одному методу дает верхний предел отношения $^{14}C/^{12}C < 3.7\times10^{-17}$, а по другому – значение $^{14}C/^{12}C = (5.4 \pm 1.7)\times10^{-17}$.

Предполагается исследовать образцы сцинтиллятора с основой из растворителя, полученного из нефти, добываемой из нескольких месторождений, чтобы определить влияние расположения месторождения на содержание ^{14}C (чтобы определить, нет ли зависимости содержания ^{14}C от места добычи нефти). Также будут проверены растворители, полученные из каменного угля.

Проводится анализ фонов детектора с целью их дальнейшего подавления и снижения порога детектора для более уверенной регистрации бета-спектра ^{14}C.

По измеренным характеристикам детектора и определению содержания С-14 в сцинтилляторе опубликован препринт: Барабанов И.Р., Безруков Л.Б., Гаврилюк Ю.М. и др. “Определение содержания 14С в жидких сцинтилляторах” Препринт ИЯИ №1393/2014.

10.7 Разработка методики регистрации когерентного рассеяния антинейтрино от реактора с помощью газового детектора ионизирующего излучения с порогом ниже 1 кэВ

10.7 Реферат

Разработан и изготовлен прототип газового детектора с низким порогом для регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Выполнены расчеты в обоснование разрабатываемой методики регистрации антинейтрино от реактора. Получены предварительные результаты измерений рабочих характеристик детектора. На основе полученных данных выполнена доработка конструкции детектора.

10.7 Основные результаты

Разработан и изготовлен трёх секционный газовый детектор с низким порогом в качестве прототипа детектора для регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Центральная секция с диаметром катода 40 мм позволяет получить коэффициент газового усиления 10^5. Для увеличения рабочего объема детектора центральная секция окружена дрейфовым промежутком, откуда электроны от произведенной ионизации газа транспортируются в центральную секцию. Проведена калибровка детектора источником рентгеновского излучения 55Fe при давлении 0.1 МПа и 0.3 МПа. Показано, что происходит достаточно полный сбор на аноде детектора электронов от произведенной ионизации как в центральной, так и в дрейфовой секции. В настоящее время проводится детальное изучение характеристик детектора с целью дальнейшей оптимизации конструкции детектора. Выполнены расчеты скорости счета от когерентного рассеяния нейтрино на ядрах как функция энергии отдачи ядра для разных газов.

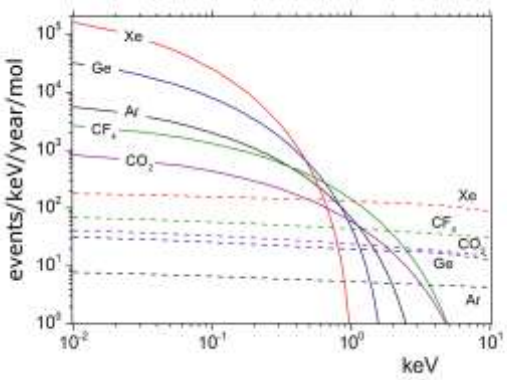


Рисунок 1. Интегральная эффективность счёта как функция порога детектора.

Рассчитана интегральная эффективность счёта как функция порога детектора, см. рис. 1.

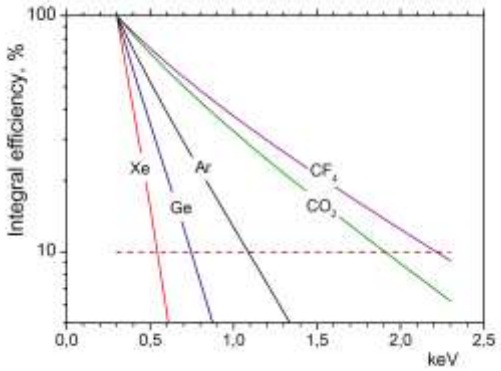


Рисунок 2. Времена измерения эффекта.

Рассчитаны времена измерения эффекта от реактора для различных величин относительных погрешностей измерений при двух разных величинах фона B: когда B=R и B=10R, здесь R – ожидаемая величина эффекта. Показано, что допустимая величина фона в таком эксперименте находится между этими двумя величинами

По результатам работы опубликованы два препринта и две статьи в реферируемых журналах. Список публикаций прилагается.

11 Лаборатория лептонов высоких энергий

Руководитель работ к.ф.-м.н. А.С.Лидванский.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Исследование анизотропии и вариаций космических лучей 10^{11} – 10^{20} эВ.

Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO. Руководитель работ д.ф.-м.н. Ю.В.Стенькин.

Изучение адронной коипоненты ШАЛ. Руководитель работ д.ф.-м.н. Ю.В.Стенькин.

11 Реферат

Представлен отчет по исследованиям, выполненным в Лаборатории Лептонов высоких энергий в рамках двух тем, отчеты по которым составлены отдельно. Отчет содержит 14 страниц и 7 рисунков. Списки публикаций за 2014 г представлены отдельно после отчетов для каждой из этих двух тем.

11 Введение

В Лаборатории Лептонов высоких энергий в последний год исследования проводились по двум темам: «Исследование анизотропии и вариаций космических лучей 10^{11} – 10^{20} эВ», научный руководитель темы А.С. Лидванский, и «Тепловые нейтроны в широких атмосферных ливнях и окружающей среде», научный руководитель темы Ю.В. Стенькин.

В 2014 году в рамках первой из этих тем проводились дальнейшие исследования вариаций космических лучей во время гроз и сопутствующих эффектов, ранее обнаруженных во время этих исследований на Баксанской нейтринной обсерватории.

Исполнители: А.В. Лапа (аспирант ЛЛВЭ),
Н.С. Хаердинов (БНО),
В.А. Козяривский (ЛЛВЭ),
Т.И. Тулупова (ЛЛВЭ),
М.Н. Хаердинов (ЛЛВЭ),
К.Х. Канониди (ИЗМИРАН)
В.И. Бубенникова (ЛЛВЭ).

Исследования по второй из этих тем включали, с одной стороны, исследования на установках в Москве и на Баксане, и с другой стороны, работы по созданию и развертыванию

высокогорного прототипа установки PRISMA в Тибете (Янгбаджинг, КНР) совместно с китайскими коллегами в рамках Договора о научном сотрудничестве между ИЯИ РАН и Институтом физики высоких энергий Китайской академии наук (Пекин).

Исполнители: Алексеенко В.В. (БНО)

Волченко В.И. (БНО)

Громушкин Д.М. (совместитель, аспирант МИФИ)

Джаппуев Д.Д. (БНО)

Куджаев А.У. (БНО)

Михайлова О.И. (БНО)

Степанов В.И. (ЛЛВЭ)

Лахонин А.А. (студент МИФИ)

Щеголев О.Б. (аспирант ИЯИ, ЛЛВЭ)

Рулев В.В.(ЛЛВЭ)

11.1 Исследование анизотропии и вариаций космических лучей $10^{11} – 10^{20}$ эВ

а) За период 2014 проводилась работа по обеспечению регулярного функционирования внешних удалённых наблюдательных пунктов. Вёлся непрерывный визуальный просмотр видеоматериала в сжатом режиме.

б) С целью получения возможности количественного анализа отснятого материала была произведена калибровка используемой в эксперименте видеокамеры.

в) Исследовались эффекты во время гроз, связанные с аномальными возмущениями вторичных частиц космических лучей. По результатам работ проведено 5 докладов на российской и Международной конференциях. Подготовлено и сдано в редакцию 4 статьи.

11.1.1 Исследований вариаций космических лучей во время гроз. Видеонабюдение удалёнными камерами

В течении периода 2014 г. методом, освоенным в 2013 г., регулярно осуществлялось обслуживание процесса непрерывной записи видеоматериала отснятого двумя удалёнными видеокамерами. Визуально, в сжатом режиме, просматривался записанный материал. Ниже приводятся результаты такого годового просмотра. В таблице 1 представлен материал по видео регистрации грозовых событий камерами в разных пунктах. Из данных следует, что

половина всех гроз, видимая в Нейтрино, не видна в Хасанье. Ночные грозы, непосредственно над БНО – редкость. Только одно грозовое событие (близкое к Нейтрино), удовлетворяет условиям эксперимента по комплексному исследованию взаимосвязи космических лучей и грозового электричества. Сам анализ вариаций космических лучей во время гроз 2014г. ещё не проводился.

Таблица 1.

	Хасанья (75км)	Нейтрино (1км)
Всего зарегистрировано ночных гроз	20	13
Близкие (молниевые разряды над камерой)	1	2
Видимые одновременно в двух пунктах	7	
Близкие к Нейтрино, видимые в Хасанье.	1	

Выводы по результатам визуального просмотра. В пункте, размещённым в с. Хасанья (75 км), в ясную погоду, можно уверенно вести удалённое наблюдение области стратосферы над БНО. Исключением является период поздней осени и начала зимы, когда регулярно в небе висит плотный низкий туман. В течении грозового сезона, ожидается 1-2 ночных грозы над БНО, которые можно исследовать в оптическом диапазоне удалённым наблюдением (из с. Хасанья).

11.1.2 Калибровка видеокамер

Для осуществления количественного анализа видеоинформации, в лабораторных условиях была произведена калибровка видеосигнала используемой камеры. В качестве экспериментальной оценки видеосигнала анализировалось среднее значение распределения яркости пикселей по номерам оттенков серого цвета (256 каналов) в области свечения на снимке J. Калибровка производилась в тёмном помещении в режиме максимальной чувствительности. При этом цветовые фильтры, дневного наблюдения отключаются, изображение чёрно - белое, а автоматическое регулирование усиления сигнала с матрицы видеокамеры и время экспозиции принимают максимальное значение. Пример фонового темнового распределения яркости пикселей приведён на рис. 1, соответствующая ему средняя яркость (в каналах) Jф = 7 к. Отметим, освещённости матрицы Ем отвечает превышение яркости пикселей над фоном Ja =J-Jф ~ Ем, которая связана с освещённостью камеры Ек посредством объектива: Ем = m·Ек. Коэффициент m пропорционален фокусному расстоянию F. В текущем эксперименте фокусное расстояние объектива установлено в максимальное

положение Fmax, что соответствует максимальному обзору (угловому размеру снимка). Условие калибровки определяет коэффициент связи η^L между освещённостью камеры эталонным источником Ек и превышением яркости его изображения Ja, при заданных настройках объектива, из уравнения:

$$Ек = \eta^L \cdot Ja. \quad (1)$$

Как эталонный источник света использовались светодиоды разных цветов, с известной (по паспорту) силой света I ~ 1 кд. Для минимизации влияния отражённого света, световой поток от источников был ограничен шириной в 1°. Ограничение осуществлялось путём помещения источника в закрытый ящик с малым отверстием. Коллимированный луч направлялся в камеру, находящуюся на удалении 7.5 м. Освещённость на объективе камеры:

$$Ек\ [л] = I/r^2\ [кд/м^2]. \quad (2)$$

Энергетическая облучённость $Wк[Вт/м^2]=Ек/(k \cdot n)$, где k = 683 [лм/Вт], $n(\lambda) \leq 1$ – относительная восприимчивость глаза. При заданной удалённости камеры яркость пикселей в изображении калибровочного источника превышает максимальное значение 255. Необходимо дополнительное ослабление освещённости матрицы экспериментальным методом. Для этих целей мы использовали оптику, установленную на камере. Увеличивая с помощью объектива изображение источника (уменьшая фокусное расстояние и «размывая» изображение регулировкой резкости) энергия распределяется на большее число пикселей, соответственно яркость свечения каждого падает. Уменьшая освещённость матрицы настройками объектива, для среднего значения яркости изображения, получаем эффект эквивалентный уменьшению освещённости камеры если бы настройки не менялись. Тогда калибровку для средней яркости изображения можно продолжить в область малых значений освещённости камеры Ен, меняя настройки объектива.

$$Ен = \eta^L \cdot Ja, \quad где\ Ен = m \cdot Ек \quad (3)$$

Отметим, результат такой калибровки применим лишь для режима прежних настроек. На рисунках 2 - 5 приведены фотографии источника красного цвета (λ=630 нм, J = 0.5 кд) при минимальном фокусном расстоянии и разной настройке резкости. Из фотографий видно, как последовательно расширяется изображение с понижением яркости пикселей. Среднее значение превышения этой яркости над фоном Ja соответствует значению ослабленной эталонной освещённости камеры. Коэффициент ослабления:

$$m = (So/S) \cdot (Fmin/Fmax). \quad (4)$$

Где Fmin– минимальное фокусное расстояние, So – площадь изображения источника на фотографии при его максимальном оптическом увеличении и максимальной резкости, а S, соответственно, площадь изображения с «размытой» резкостью. То есть, экспериментально, для средней яркости изображения получаем «новую ослабленную освещённость камеры» Ен

= m·Ек. Например, среднее превышение над фоном яркости пикселей изображения источника Ja и соответствующие коэффициенты ослабления m для рис. 2: (>248к) и 0.22; для рис. 3: 32к и $7.5\cdot10^{-4}$; для рис. 4: 14 и $2.9\cdot10^{-4}$; для рис. 5: 9 и $1.5\cdot10^{-4}$. Таким образом, приведённый метод позволяет провести калибровку видеосигнала близко к порогу чувствительности матрицы используя стандартный эталонный источник света. Учитывая (2) и (4), из (3) следует

$$\eta^L = (So/S)\cdot(Fmin/Fmax)(I/r^2)/Ja. \qquad (5)$$

Здесь So/S и Ja измеряемые величины, остальные параметры – паспортные данные. Фотометрический коэффициент калибровки η^L численно равен освещённости в люксах отвечающей превышению яркости пиксель над фоновым значением в 1 канал, в условиях близких к порогу чувствительности. Энергетический коэффициент калибровки: $\eta^W = \eta^L/(k\cdot n)$, где k = 683 [лм/Вт], n(λ) – относительная восприимчивость глаза. Его численное значение соответствует энергетической облучённости камеры, отвечающей превышению яркости пиксель над фоновым значением в 1 канал. Калибровочные коэффициенты зависят от длины волны источника излучения. В таблице 2 приведены результаты калибровки для 5 эталонных излучателей. Для каждого излучателя выполнялось несколько измерений при разных настройках объектива. Приведённые в таблице ошибки отвечают их экспериментальному разбросу.

Таблица 2

	λ [нм]	405 фиолетовый	430 синий	525 зелёный	630 красный	940 ИК
Фото-метрич. единицы	$\eta^L(\lambda)\cdot10^7$ [л/к]	0.42(1±.11)	0.55(1±.15)	1.33(1±.13)	1.80(1±.13)	
	$\mu^L(\lambda)$	3.2	2.4	1	.74	∞
Энерге-тич. единицы	$\eta^W(\lambda)\cdot10^9$ [(Вт/м^2)/к]	76(1±.11)	6.9(1±.15)	0.25(1±.13)	1.0(1±.13)	5.1(1±.14)
	$\mu^W(\lambda)$	0.003	0.036	1	0.247	0.048

В таблице 2, $\mu^L(\lambda)$ - относительная энергетическая восприимчивость (восприимчивость камеры относительно глаза), $\mu^W(\lambda)$ – относительная энергетическая восприимчивость. Из значений $\mu^L(\lambda)$ следует, что камера регистрирует инфракрасное излучение, невидимое глазом, кроме того она и в области коротких волн чувствительнее в 2 – 3 раза. Из значений $\mu^W(\lambda)$ следует, что в ночное время наиболее эффективно регистрируется энергия зелёного цвета. Имея, при ночном наблюдении черно белое изображение источника неизвестного цвета, в качестве характерных калибровочных коэффициентов можно принять значения близкие для

зелёного $\eta^L = 10^{-7}$ л/к, $\eta^W = 2 \cdot 10^{-10}$ (Вт/м^2)/к. Ошибка измерения для большой части видимого спектра будет в пределах одного порядка.

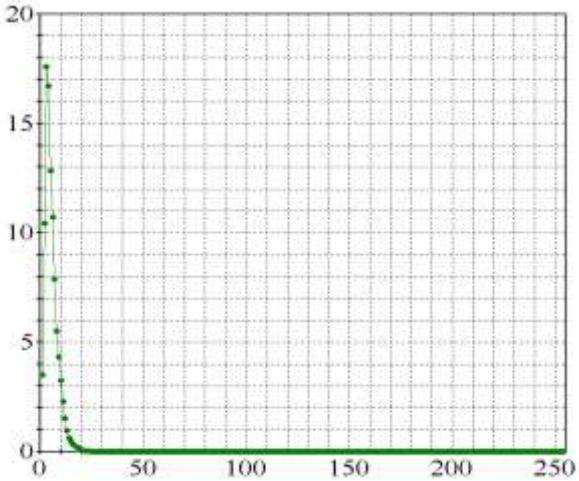


Рис. 1. Фоновое распределение пикселей по 256 оттенкам серого цвета. По вертикали – проценты. По горизонтали – номера каналов.

Рис. 2. Фотография источника красного цвета (λ = 630 нм, I = 0.5 кд). Фокусное расстояние минимальное. Резкость максимальна. Относительные размеры изображения: (5, 5)

Рис. 3. Источник красного цвета (λ = 630 нм, I = 0.5 кд). Фокусное расстояние минимальное. Резкость расстроена. Относительные размеры изображения: (84, 90).

Рис. 4. Источник красного цвета (λ = 630 нм, I = 0.5 кд). Фокусное расстояние минимальное. Резкость расстроена. Относительные размеры изображения: (134, 147).

Рис. 5. Источник красного цвета (λ = 630 нм, I = 0.5 кд). Фокусное расстояние минимальное. Резкость расстроена. Относительные размеры изображения: (186, 197).

11.1.3 Наблюдение корреляций событий в космических лучах с геомагнитными пульсациями и сечением стратосферы

В процессе обработки информации 2013 г. были выявлены случаи, свидетельствующие о наличии корреляции аномальных возмущений интенсивности вторичных частиц космических лучей во время гроз, с непрерывным оптическим свечением областей атмосферы и пульсациями геомагнитного поля. Зарегистрирован факт взаимного влияния глобальных

возмущений геомагнитного поля и грозового электричества. Магнитные пульсации провоцируют атмосферные электрические разряды, а те, в свою очередь, стабилизируют их.

Так на рис. 6, на примере события 31.08.2013 демонстрируется поведение различных параметров, измеряемых в комплексном эксперименте, характеризующих грозовой процесс. Около 5 ч утра отмечаются значительные вариации вторичных частиц космических лучей. По данным полученным ближней камерой (удаление от установки 1 км), можно предположить существование корреляции освещённости камеры в период грозы, на уровне $\sim 0.5 \cdot 10^{-7}$ л, с дождём и вариациями мягкой компоненты. В период позже 5 ч – утренняя засветка. В удалённом пункте, в Хасанье (удаление 75 км), для выделения динамики свечения области атмосферы над установкой в предутренний период, анализировалось отношение средней яркости области снимка соответствующее тропосфере над ней, к средней яркости по всему снимку. На рис. 6, панель 7 приведён график отношения. Из него следует, что центральная часть неба, просматриваемая камерой в удалённом пункте, соответствующая области атмосферы над установкой, в период с 4.5 – 5 ч испытала рост и спад свечения с максимумом в 4ч 41м. Именно в этот период и с максимумом в это время установка регистрировала избыток гамма – квантов над фоном.

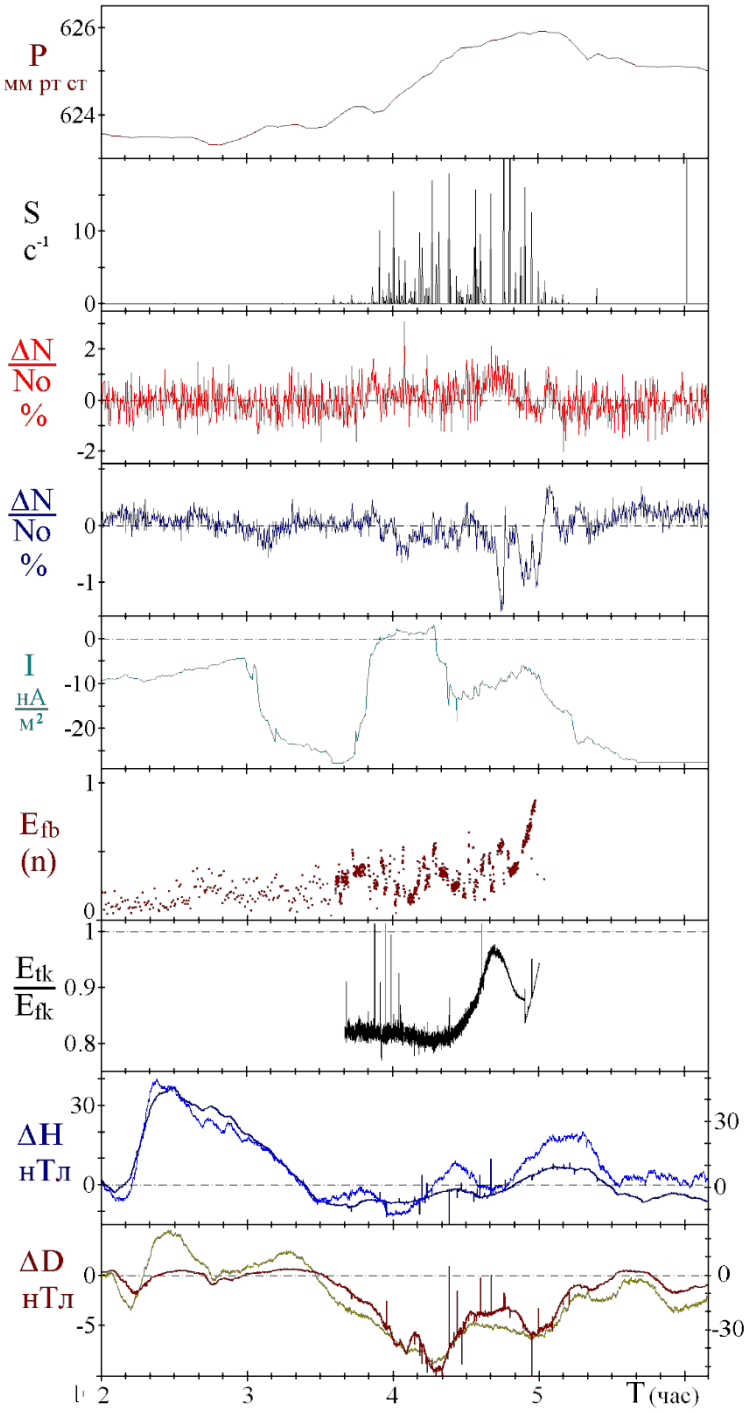


Рис. 6. Грозовое событие 31.08.2013. На графиках время приведено местное истинное, опережающее мировое на 3 часа. На пяти верхних панелях приведены данные усреднённые по 15 секунд. Сверху вниз: 1 Атмосферное давление. 2 Молниеотметчик (относительные единицы пропорциональные амплитуде электромагнитного сигнала от молнии). 3 Вариации интенсивности мягкой компоненты. 4 Вариации интенсивности жёсткой компоненты. 5 Электрический ток дождя. 6 Ближняя камера. Средняя яркость пикселей по всему снимку (относительные единицы: 1 ~ 10^{-7}л освещённости). До момента 3ч. 41 м. 24 с., приводится 1 измерение за каждые 30 сек. Далее, данные посекундные, усредненные по 4 кадрам (4

секунды). 7 Дальняя камера. Отношение яркости области тропосферы к средней яркости по всему снимку. Приведены секундные значения. 8 Вариации H-компоненты индукции геомагнитного поля, секундные значения. Толстая линия – данные БНО, шкала слева. Тонкая – данные Москвы (ИЗМИРАН), шкала справа. 9 Вариации D-компоненты индукции геомагнитного поля, секундные значения. Толстая линия – данные БНО, шкала слева. Тонкая – данные Москвы (ИЗМИРАН), шкала справа.

Характерная амплитуда возмущения освещённости камеры в удалённом пункте этим локальным источником в момент максимума ~$2\cdot10^{-7}$ л. ($4\cdot10^{-10}$ Вт/м^2). Снимок этого момента, с усиленной яркостью в 8 раз, приведен на рис. 7. Видна подсветка облаков источником в стратосфере, на высоте выше 14 км над уровнем моря, порядка 25 км в поперечине. Из анализа вариаций магнитного поля следует, что измерения, выполненные в БНО, демонстрируют уменьшение амплитуды возмущений «глобального» поля в период грозы. Наиболее просто это заметить по графику для H-компоненты, где амплитуда первого возмущения измеренного в БНО в период до грозовой активности, почти такая, как и в Москве, последующие же пульсации, измеренные во время грозы, существенно подавлены. На графиках, нулевой уровень соответствует фоновому значению, посчитанному за период соседних 12 часов. Наиболее активный грозовой период (4ч 35-50мин), сопровождаемый аномальным возмущением в космических лучах и максимумом свечения в стратосфере над областью грозы, проявляется в D-компоненте в наличие «локального» возмущения магнитного поля направленного на уменьшение амплитуды общего «глобального» возмущения.

Рис. 7. Грозовое событие 31.08.2013. Снимок, сделанный удалённой камерой в момент 4ч 41м (местного истинного времени), соответствующий максимальному свечению локального участка атмосферы над установкой. Яркость снимка усилена в 8 раз. Вверху снимка декретное время. Вверху справа козырёк крыши дома.

11.1 Заключение

В пункте, размещённым в с. Хасанья (75 км), в ясную погоду, можно уверенно вести удалённое наблюдение области стратосферы над БНО. В течении грозового сезона, ожидается 1-2 ночных грозы над БНО, которые можно исследовать в оптическом диапазоне удалённым наблюдением из с. Хасанья.

Проведена калибровка видеосигнала с камеры ведущей наблюдение в ночное время в условиях близких к порогу чувствительности. Данная процедура позволяет проводить количественный анализ отснятого видеоматериала.

Зарегистрировано непрерывное свечение атмосферы над грозовыми облаками, коррелирующее с аномальными возмущениями вторичных частиц космических лучей.

11.1 Публикации

По результатам работ подготовлено 5 докладов. Доклады представлены на Всероссийской и международной конференциях по космическим лучам, опубликованы в их материалах. Сдано в печать 5 статей.

1. А.С. Лидванский, Эффекты, вызываемые космическими лучами в грозовой атмосфере, Международная конференция «XVI Харитоновские тематические научные чтения «Мощная импульсная электрофизика»», Саров, 21-25 апреля 2014 г. (Приглашенный доклад).

2. А.С.Лидванский, М.Н.Хаердинов, Н.С.Хаердинов, Характерное электрическое состояние грозовой атмосферы из данных по вариациям космических лучей, 33 Всероссийская конференция по космическим лучам (Дубна, 11-15 августа 2014 г).

3. К.Х. Канониди, А.С.Лидванский, М.Н.Хаердинов, Н.С.Хаердинов, Вариации космических лучей во время гроз и новые геофизические эффекты, 33 Всероссийская конференция по космическим лучам (Дубна, 11-15 августа 2014 г).

4. К.Х. Канониди, А.Н.Куреня, А.С.Лидванский, М.Н.Хаердинов, Н.С. Хаердинов, Комплексное исследование энергичных процессов в грозовых облаках, 33 Всероссийская конференция по космическим лучам (Дубна, 11-15 августа 2014 г).

5. M.N. Khaerdinov, N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky, Data on cosmic ray variations during thunderstorms: Indication to existence of a slow large-scale atmospheric discharge, European Cosmic ray Symposium (ECRS) 2014, September 1-5, 2014, Kiel, Germany.

6. K. Kh. Kanonidi, M.N. Khaerdinov, N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky, Correlations of cosmic ray particle events during thunderstorms with geomagnetic pulsations, European Cosmic ray Symposium (ECRS) 2014, September 1-5, 2014, Kiel, Germany.

11.2 Тепловые нейтроны в широких атмосферных ливнях и окружающей среде

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

В 2014 г. проводился набор и обработка экспериментальных данных, полученных с помощью разработанных нами нейтронных детекторов (эн-детекторов) по теме «**Тепловые нейтроны в широких атмосферных ливнях и окружающей среде**» на вариационных установках: «Нейтрон» в МИФИ, в Обнинске (Геофизическая служба РАН), в НИИЯФ МГУ, в БНО и в Лаборатории Гран Сассо (Италия), в Янгбаджинге (Тибет, КНР, 4300 м над уровнем моря) как на земной поверхности на разных уровнях наблюдения, так и под землей а также на 2-х прототипах PRISMA-YBJ и PRISMA-32 – установки нового типа для изучения ШАЛ (проект PRISMA). В декабре 2014 г. была модернизирована подземная вариационная установка в МГУ.

По вариационной программе с помощью нашей глобальной сети из эн-детекторов были получены следующие новые данные:

- О потоках тепловых нейтронов во время Форбуш-понижений интенсивности космических лучей, путем измерений с помощью глобальной сети эн-детекторов, как над земной поверхностью, так и под ней. Обнаружено новое явление: отклик подземных эн-детекторов на Форбуш-эффект.

- По измерению нейтронных потоков во время гроз с целью проверки сообщений о возможной генерации нейтронов молниями. Был получен отрицательный результат: ни в одной из гроз как в Москве, так и в горах, за 2011-2014 гг. не было зафиксировано превышения потока тепловых нейтронов над фоновым потоком. Более того, во время самой мощной грозы 20.07.2012 в Москве, когда молния попала в здание, где проводятся измерения, было зафиксировано понижение потока тепловых нейтронов на несколько часов, связанное, как мы полагаем, с большим количеством выпавших осадков. Такое же понижение наблюдалось и на других наших установках, если гроза сопровождалась обильными осадками после продолжительного сухого периода. Следует отметить, что только в нашем эксперименте проводится полная оцифровка всех импульсов с детекторов и отбор нейтронных событий по форме импульса, что позволяет нам быть абсолютно уверенными в отсутствии ложных срабатываний, связанных электромагнитными наводками, производимых молниевыми

разрядами. По этим результатам подготовлена статья, принятая в конце 2014 г. в журнал Phys. Rev. Letters.

- Было получено, что в вариациях нейтронных потоков присутствуют периоды (вероятность случайной реализации < 10^{-3}) в диапазоне десятков минут, характерные для собственных колебаний Земли (12, 15, 35, 43, 54 мин.). В настоящее время идет набор статистики и поиск корреляций амплитуды этих колебаний с мощными землетрясениями и другими геофизическими явлениями. Готовится публикация.

По программе изучения ШАЛ методом регистрации генерируемых в них нейтронов в 2014 г. совместно со студентами и сотрудниками МИФИ была проведена большая работа по обеспечению непрерывной работы установки PRISMA-32 на базе эксперимента НЕВОД в МИФИ). Непрерывно работала также небольшая высокогорная установка PRISMA-YBJ в Тибете. К настоящему времени для двух уровней наблюдения получены и проанализированы экспериментальные данные по временному и пространственному распределению регистрируемых нейтронов в ШАЛ, по корреляции между энерговыделением в установке и числом зарегистрированных в ней тепловых нейтронов, а также по спектру ШАЛ по числу тепловых нейтронов. Показано, что спектр ШАЛ по числу нейтронов имеет степенной вид в ПэВ-ной области первичных энергий. Эти результаты были доложены на 33-й Всероссийской конференции по космическим лучам в Дубне и на Международном симпозиуме ISVHECRI’2014 в ЦЕРНе. Готовятся журнальные публикации.

В декабре 2014 г. была модернизирована подземная вариационная установка в МГУ: добавлен детектор гамма-квантов на кристалле CsI. Основная цель установки – изучение фоновых условий в подземных лабораториях и вариаций фоновых потоков нейтронов и гамма-квантов, связанных с различными геофизическими явлениями. В 2014 г. по данным этой установки продемонстрировано наличие задержанных на ~2 суток антикорреляций фонового потока тепловых нейтронов глубоко под землей с атмосферным давлением.

11.2 Публикации

В 2014 г. было опубликовано 2 статьи в журналах, 4 подготовлены и приняты в печать, подготовлено 5 докладов на 33-ю Всероссийскую конференцию по космическим лучам в Дубне и 1 доклад на Международный симпозиум ISVHECRI’2014 в ЦЕРНе.

1. Д.Д. ДЖАППУЕВ, В.И. ВОЛЧЕНКО, А.У. КУДЖАЕВ, О.И. МИХАЙЛОВА, В.Б. ПЕТКОВ, Ю.В. СТЕНЬКИН. Исследование адронных стволов ШАЛ на установке Ковер – 2. // Известия РАН, серия физическая, 78(3), (2014), с. 330-332.

2. D. Gromushkin, V. Alekseenko, A. Petrukhin, O. Shchegolev, Yu. Stenkin, V. Stepanov, I.Yashin and E. Zadeba. The array for EAS neutron component detection. JINST, 9, (2014), C08028.

Статьи, подготовленные к печати в 2014 г.:

1. V. Alekseenko, F. Arneodo, G. Bruno, et al. Do thunderstorms produce neutrons? // Phys. Rev. Lett. (2015) (принята в печать)

2. Д. М. Громушкин, В. И. Волченко, А. А. Петрухин, Ю. В. Стенькин, В. И. Степанов, О. Б. Щеголев, И. И. Яшин. Новый метод регистрации адронной компоненты ШАЛ. ЯФ, том 78, (2015), №3-4, с. 1– 4, в печати

3. Д.М. Громушкин, В.И.Волченко и др. Спектр энерговыделений в установке ПРИЗМА-32. Извести РАН, серия Физическая, (2015), в печати

4. В.В. Алексеенко, Д.М. Громушкин и др. Вариации нейтронного потока во время гроз. Извести РАН, серия Физическая, (2015), в печати

Доклады на конференциях:

1. В.В. Алексеенко, Д.М. Громушкин и др. Вариации нейтронного потока во время гроз. // 33 ВККЛ, Дубна, (2014), ID 45

15) 2. Ю.В. Стенькин, В.В. Алексеенко, Дж. Жао и др. Спектр ШАЛ по числу тепловых нейтронов по данным установки PRISMA-YBJ. // 33 ВККЛ, Дубна, (2014), ID 97.

16) 3. Ю.В. Стенькин, В.В. Алексеенко и др. Спектр кратностей тепловых нейтронов в ШАЛ по данным установки ПРИЗМА-32. // 33 ВККЛ, Дубна, (2014), ID 95.

4. О. Щеголев, В. Алексеенко и др. ФПР адронов и электронов в ШАЛ на различных высотах. // 33 ВККЛ, Дубна, (2014), ID 96.

5. Д.М. Громушкин, В.И.Волченко и др. Спектр энерговыделений в установке ПРИЗМА-32. // 33 ВККЛ, Дубна, (2014), ID 145.

6. O. Shchegolev, V. Alekseenko, et al. EAS electron and hadron lateral distributions at different altitudes. // ISVHECRI’2014, CERN, (2014), ID 7

11 Заключение

В 2014 г. в лаборатории ЛВЭ проводились исследования согласно утвержденным планам. Получены важные результаты представляющие большой интерес, особенно для геофизики.

12 Лаборатория электронных методов детектирования нейтрино

Руководитель работ чл.-корр. РАН О.Г.Ряжская.

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Разработка и создание нейтринных телескопов в низкофоновых подземных лабораториях и глубоко под водой для исследования природных потоков нейтрино и других элементарных частиц.

Нейтронная физика, технология интенсивных источников нейтронов, исследование конденсированных сред, радиационное материаловедение.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Поиски нейтринного излучения от коллапсов звёзд в Галактике на детекторах АСД и LVD.

Изучение свойств нейтрино на установках LVD и OPERA в подземном комплексе Гран-Сассо.

Коллапс и физика нейтрино на больших подземных сцинтилляционных установках.

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

Основные исполнители темы:

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

12 Реферат

13 рис., **2** табл.

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

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

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

По данным работы нейтринных телескопов в течение 37 лет (с 1977 г по 2014 г) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.07 года на 90% уровне достоверности.

Целью эксперимента OPERA является поиск осцилляций ν_μ в ν_τ в пучке ν_μ от ускорителя ЦЕРН'а посредством прямой регистрации τ-лептонов в ядерной эмульсии. К концу 2014 в детекторе зарегистрировано 4 события-кандидата.

Сотрудники подразделения принимали участие в работах по выполнению Государственного задания на 2014 год, включающего проекты по целевым программам РАН («Фундаментальные свойства материи и астрофизика» и «Экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных взаимодействий, связанные с работами на ускорителях ЦЕРН»), по выполнению гранта РФФИ 12-02-00213_а «Поиск разных типов нейтринного излучения от коллапсирующих звезд и проведение исследований в области нейтринной физики, астрофизики и физики космических лучей на подземных детекторах Лаборатории ЭМДН РАН и Лаборатории Гран Сассо» 2012-2014, по выполнению проекта по международному соглашению о Научно-исследовательской работе российских научных групп в Национальной лаборатории Гран Сассо (Италия). Направление - «Физика космических лучей и редких распадов».

12 Введение

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

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

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

12.1 Поиски нейтринного излучения от коллапсов звёзд в Галактике на детекторе КОЛЛАПС АНС и на детекторе LVD

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

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

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

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

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

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

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

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e + n,\ E_{e^+} = E_{\tilde{\nu}_e} - 1.3 \text{ МэВ} \quad (1)$$

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

$$n + p \rightarrow d + \gamma,\ E_\gamma = 2.2 \text{ МэВ}. \quad (2)$$

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

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

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

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

$$\nu_i + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}C^* + \nu_i, \quad (4)$$

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

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

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

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

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

$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow \nu_e\text{‘} + (A, Z)^*$$

Для углерода это реакции:

$$\nu_e + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}N + e^-,\ \Delta M = 16.83 \text{ МэВ}$$

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

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

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

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

$\nu_e + Na^{23} \rightarrow e^- + Mg^{23}$, порог примерно 4 МэВ

$\nu_e + Cl^{35,37} \rightarrow e^- + Ar$, порог ~ 800 кэВ для Cl^{37}(24.5%) и ~ 5 МэВ для Cl^{35} (75.5%).

При взаимодействии электронов с солью высока вероятность рождения ядра Mg^{23} в возбужденном состоянии с излучением γ-кванта с энергией примерно7.5 МэВ.

12.1.1 АСД - стотонный сцинтилляционный детектор Артёмовской Научной станции

Детектор АСД (Рис.1.1) расположен в соляной шахте на глубине 570 м.в.э. (г. Артемовск, Донбасс), где фон естественной радиоактивности примерно в 300 раз меньше чем в обычном грунте. Детектор имеет цилиндрическую форму, диаметр (556±3) см, высота 547 см; содержит 105 тонн жидкого сцинтиллятора на основе уайт-спирита. Высота столба сцинтиллятора 540 см, плотность – 0.78 г/см3. 144 фотоумножителя расположены на боковой поверхности детектора.

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

Методом поиска нейтрино в детекторе является регистрация всех событий, имеющих энерговыделение E > 5 МэВ, этот триггер открывает временные ворота Δt = 1 μсек с энергетическим порогом 0.7 МэВ для детектирования нейтронов в реакции (1, 2)

За период наблюдения за Галактикой по данным установки с 1977г. по 2014г. кандидатов на вспышки Сверхновых обнаружено не было. За 37 лет работы получено ограничение на частоту гравитационных коллапсов менее, чем одно событие за 16.07 года на 90% доверительном уровне ($f_{col} < 0.062$ года$^{-1}$).

Рис.1.1 Установка АСД АНС

12.1.2 Детектор Большого Объема LVD

Основная цель LVD – поиск нейтринного излучения от коллапсов звезд. По этой программе LVD работает с 1992 года. Детектор LVD (Large Volume Detector), расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине <H> = 3650 м.в.э., состоит из 840 сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой контейнеры из нержавеющей стали размерами 100 × 100 × 150 см^3, заполненные жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Они размещены по 8 штук в стальных несущих модулях (портатанко), которые сгруппированы в 7 горизонтальных слоёв и образуют вертикальные колонны.

LVD состоит из 3-х башен. Первая башня LVD начала работать в 1992 году, 3 башни – в 2002 года. На рисунке 1.3 приведено значение активной массы установки с 1992 по 2014 год. Полная масса жидкого сцинтиллятора равна 970 тонн. Масса железа, образующего несущую структуру установки, – около 1000 тонн.

Рис. 1.2 Установка LVD

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

Каналы взаимодействия нейтрино в детекторе LVD (МСК):

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

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

В случае осуществления модели стандартного коллапса (МСК) полная энергия, идущая в нейтринное излучение, составляет примерно 10% от массы сколлапсировавшей звезды и делится между шестью типами нейтрино приблизительно поровну. На установке LVD основной реакцией (для МСК) является реакция взаимодействия электронного антинейтрино с водородом: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e + n$, $E_{e^+} = E_{\tilde{\nu}_e}$ -1.3 МэВ. Она сопровождается захватом нейтрона водородом с излучением γ-кванта 2.2 МэВ: $n + p \rightarrow d + \gamma$, $E_\gamma = 2.2$ МэВ.

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

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

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

$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow \nu_e\text{‘} + (A, Z)^*$$

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

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

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

причем возбуждение ядра кобальта, получающегося в реакции с железом, снимается путем испускания гамма-квантов с энергией от 1.7 до 10.7 МэВ (наиболее вероятная энергия составляет ~7 МэВ). В реакции с углеродом могут участвовать все типы нейтрино и

антинейтрино, а переход ядра углерода в основное состояние сопровождается испусканием гамма-кванта с энергией 15.1 МэВ.

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

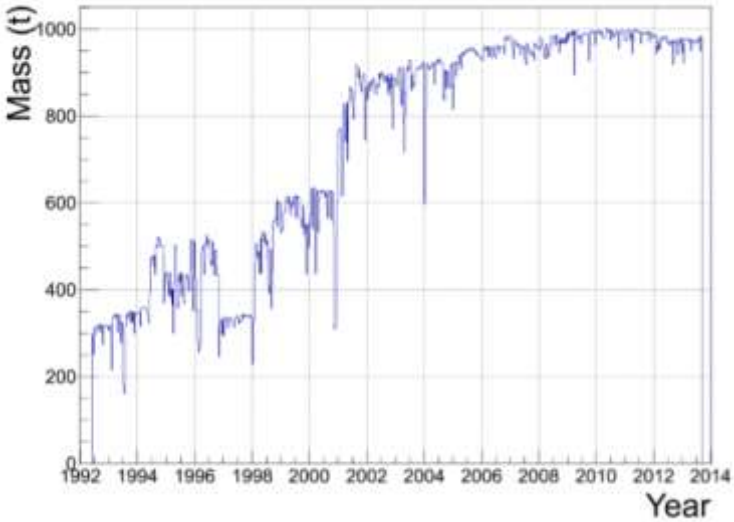


Рис.1.3 Активная масса M(t) установки LVD. 1992 год – запуск первой башни T1, 1996 г – запуск T2, 2002 г. – работа всех трех башен установки.

В течение 22 лет наблюдений гравитационных коллапсов в Галактике и Магеллановых облаках, в том числе скрытых (без сброса оболочки), не обнаружено.

По данным работы установки LVD с 1992 года по 2014 предел на частоту вспышек сверхновых составляет 1/ 9.55 года$^{-1}$.

12.2 Подземный комплекс Гран Сассо

Для широкого круга низкофоновых подземных экспериментов по поиску редких событий, таких как регистрация нейтринного излучения от коллапсов звезд, поиск частиц темной материи, детектирования нейтрино низких энергий и пр., одной из важнейших задач является исследование источников фона, связанных с естественной радиоактивностью материалов и мюонами космических лучей. Высокоэнергичные мюоны космических лучей легко проникают через толщу грунта и достигают места размещения подземных экспериментальных установок, генерируя нейтроны при непосредственном взаимодействии с

ядрами, а начиная с глубин ~100м в основном в адронных, а также в электромагнитных ливнях внутри конструкций детектора, элементах защиты и окружающего грунта. Эти нейтроны представляют собой самую нежелательную компоненту фона, поскольку они способны полностью имитировать искомые редкие процессы.

Детектор LVD в подземной низкофоновой Лаборатории Гран Сассо позволяет изучать нейтроны генерированные мюонами космических лучей и мюонами искусственного происхождения. Средняя энергия мюонов космических лучей на глубине 3650 м в.э. в подземном зале равна 280 ГэВ. Мюоны искусственного происхождения – это мюоны от взаимодействия пучка нейтрино из ЦЕРНа с грунтом. Средняя энергия таких мюонов, регистрируемых детектором, около 17 ГэВ.

Методика определения числа нейтронов, генерированных мюонами в веществе детектора, различается условиями измерения. Для каждого эксперимента проводилось Монте-Карло моделирование с помощью универсального пакета Geant4.

12.2.1 Характеристики потоков нейтронов, генерируемых мюонами, образованных при взаимодействии нейтринного пучка из ЦЕРНа в грунте

Одной из задач, решаемых в 2014 году на установке LVD, было исследование генерации нейтронов, образованных горизонтальными мюонами со средней энергией 16.5 ГэВ. Произведено моделирование генерации нейтронов горизонтальными мюонами методом Монте-Карло с помощью программного пакета Geant4. Вычислены эффективности регистрации нейтронов от мюонов в установке LVD.

Проект CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso: нейтрино из ЦЕРНа в Гран Сассо) – создан для изучения свойств нейтрино с помощью установок подземной Лаборатории Гран Сассо. Расстояние между ЦЕРНом и Гран Сассо составляет около 732 км. Направление пучка составляет -3.265º от уровня горизонта. Пучок протонов запускался в 2007-2011 гг. двумя экстракциями, каждая длительностью порядка 10.5 мкс. Протоны взаимодействуют с графитовой мишенью, образуя пионы и каоны, которые распадаются в вакуумном туннеле, рождая в основном мюонные нейтрино и μ^+ (последние полностью поглощаются в грунте). Пучок CNGS в Гран Сассо помимо мюонных нейтрино состоит из малой доли мюонных антинейтрино, а также электронных нейтрино и антинейтрино. Энергетические спектры частиц получены методом Монте-Карло. Средняя энергия нейтрино в пучке равна 17 ГэВ. Методом Монте-Карло был рассчитан и энергетический спектр отрицательных мюонов, генерированных мюонными нейтрино в грунте и приходящих к установкам Лаборатории Гран Сассо.

Нейтроны, рожденные мюонами, генерированными нейтрино от пучка из ЦЕРНА, регистрировались в детекторе LVD. При анализе экспериментальных данных установки использовались события, в которых сработало более двух счётчиков с энерговыделением более 50 МэВ в каждом. При запуске пучка протонов в ЦЕРНе ведется запись о времени его запуска, а также о текущей форме экстракции. Информация о времени запусков передается в Гран Сассо. Отбор событий проводился на основании имеющегося банка данных. Нейтрино проходят расстояние в 732 км в течение около 2.44 мс. На этом основании искались события от пучка в LVD во временном диапазоне $t_{LVD} - t_{CERN} = 2.44 \pm 0.1$ (мс). За 2008 – 2011 гг. было зарегистрировано 98560 событий.

Направление прихода мюонов в основном совпадает с направлением нейтринного пучка. Средняя энергия спектра мюонов равна ~ 16.5 ГэВ. Полученные распределения показали, что LVD регистрирует события с высокой точностью (рис. 2.1).

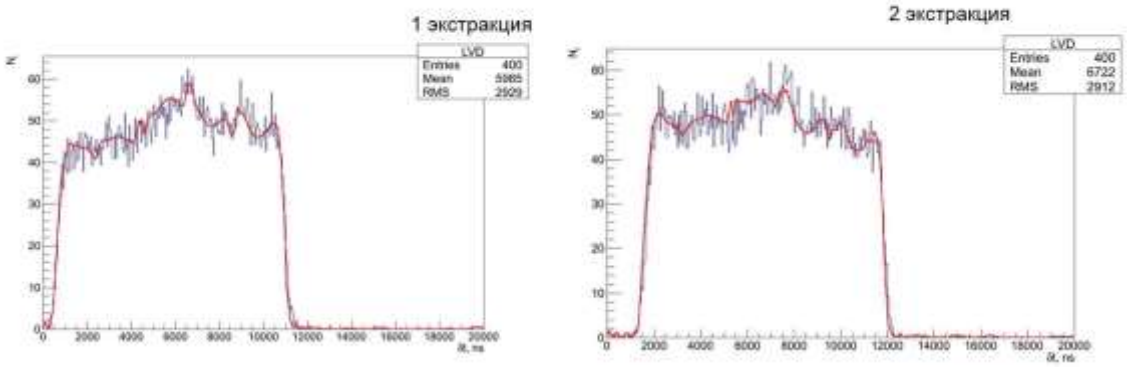


Рис.2.1 Временные распределения мюонных событий в детекторе LVD. Красная линия – усредненная протонная форма пучка в ЦЕРНе, синяя – мюоны, зарегистрированные установкой.

Величина генерации нейтронов мюонами Y_n определяется как число нейтронов, образуемых одним мюоном в 1г/см^2 вещества: $Y_i = N_n/(N_\mu \cdot l_i)$, где N_n – общее число нейтронов, генерированных мюонами, N_μ – общее число мюонов, l_i – средняя длина трека (в г/см^2), которую проходит мюон в i-ом веществе. Число нейтронов N_n определяется по регистрации γ – квантов, испускаемых после захвата тепловых нейтронов, в основном, протонами сцинтиллятора $np \rightarrow D^* \rightarrow D\gamma$, $E_\gamma = 2.2$ МэВ, $\tau \approx 180$ мкс, а также ядрами железа в структуре LVD $nFe \rightarrow Fe^* \rightarrow Fe(k\gamma)$, $\langle E_\gamma \rangle = 7$ МэВ, $\tau \approx 100$ мкс. Число нейтронов (N_{ni}) в сложном веществе определяется с учетом доли нейтронов, рожденных в i-ом веществе и эффективности регистрации нейтронов в установке: $N_{ni} = N_\gamma \cdot f_i / \varepsilon$. Таким образом, число генерированных нейтронов в сложном веществе: $Y_i = N_\gamma \cdot f_i / (N_\mu \cdot l_i \cdot \varepsilon_i)$.

Сигналы от γ-квантов должны удовлетворять следующим условиям: энерговыделение в счетчике в диапазоне от 1.5 до 10 МэВ, время от начала события от 50 до 1000 мкс. Используя временное распределение гамма-квантов в LVD и подгонку программным пакетом ROOT

(функцией вида $dN_\gamma/dt = N_0 + A\exp(-t/\tau)$) получены величины параметров: уровень фона N_0 = 343 ± 18, число гамма-квантов в начальный момент времени $N_\gamma(t=0)$ A=1084±59, показатель экспоненты τ = 140 ± 13 мкс.

Для определения эффективности регистрации нейтронов и доли генерированных нейтронов в железе и сцинтилляторе использовалось Монте-Карло моделирование с помощью Geant4. Получено, что доля нейтронов, рожденных в сцинтилляторе равна $f_{сц}$ = 16%, рожденных в железе – f_{Fe} = 84%. Эффективность регистрации нейтронов ближайшими 8 счетчиками вокруг трека мюона равна ε = 68%.

Средняя длина трека мюона в регистрирующем веществе детектора равна $<l_{сц}>$=406±10 (г/см^2). Величина определялась по ионизационным потерям мюона в сцинтилляторе. Из розыгрыша методом Монте-Карло была получена средняя длина, пройденная мюоном в железе $<l_{Fe}>$ = 327±8 (г/см^2).

Таким образом, величина генерации нейтронов в расчете на один мюон с энергией $<E>$ ≈ 15 ГэВ на г/см^2 равна $Y_{сц} = (3.6\pm0.7)\cdot10^{-5}$ n/μ·(г$^{-1}$·см^2) для сцинтиллятора и $Y_{Fe} = (23.2 \pm 4.6)\cdot10^{-5}$ n/μ·(г$^{-1}$·см^2) для железа. Ошибка полученных величин $Y_{сц,Fe}$ связана с методом определения числа нейтронов, неопределенностями расчета длины треков мюона и ошибкой расчета эффективности регистрации в Монте-Карло моделировании.

12.2.2 Определение величины генерации нейтронов мюонами космических лучей в железе с помощью детектора LVD

Мюоны, проходя через грунт и вещество детекторов, теряют свою энергию на ионизацию атомов среды, на излучение тормозных γ-квантов, образование электрон-позитронных пар и глубоко-неупругое взаимодействие. Среди продуктов взаимодействия мюонов с веществом (электроны, гамма-кванты, пионы, протоны, радиоактивные изотопы, нейтроны), которые могут создавать фоновые события в детекторах, нейтроны занимают особое место. Нейтроны могут имитировать редкие события в подземных детекторах.

Основными характеристиками нейтронов, производимых мюонами в веществе, является величина генерации нейтронов мюоном в 1 г/см^2 (выход нейтронов Y_n).

14 мая 2013 года между счетчиками установки было установлено железо, масса которого 470 кг. Пластины железа с общей толщиной 4 см придвинуты ко дну верхнего счетчика вплотную. Мюон, пересекая пару счетчиков с введенным веществом между ними, образует дополнительное количество нейтронов. Увеличение числа нейтронов в расчете на один мюон относится к нейтронам, рожденным в железе на длине пробега мюона в г/см^2.

В эксперименте отбирались мюоны, прошедшие через выбранную пару счетчиков с суммарным энерговыделением больше 200 МэВ и в каждом из них энерговыделение должно

быть > 10 МэВ. Для уменьшения фона выбирались внутренние счетчики детектора. Были отобраны 3 пары счетчиков, из которых пока включена в эксперимент одна. Экспериментальные данные образуют две временные группы: а) до установки дополнительного железа в период с 1/1/2009 до 31/12/2012 и б) после установки железа 14/05/2013 – 14/05/2014.

Регистрация нейтронов производится по измерению γ – квантов, испускаемых в результате радиационного захвата тепловых нейтронов протонами сцинтиллятора и ядрами железа в структуре LVD. Число нейтронов определяется по временному распределению низкоэнергетичных импульсов (1 – 12 МэВ) во временном окне 50 – 550 мкс после прохождения мюона. Для аппроксимации временного распределения использовался закон: $N_n(t) = N_0 \cdot \exp(-t/\tau) + B$, где τ = 145 мкс – экспонента захвата теплового нейтрона в сцинтилляторе и железе, B – const, зависящая от фоновых условий счетчика (рис.2.2).

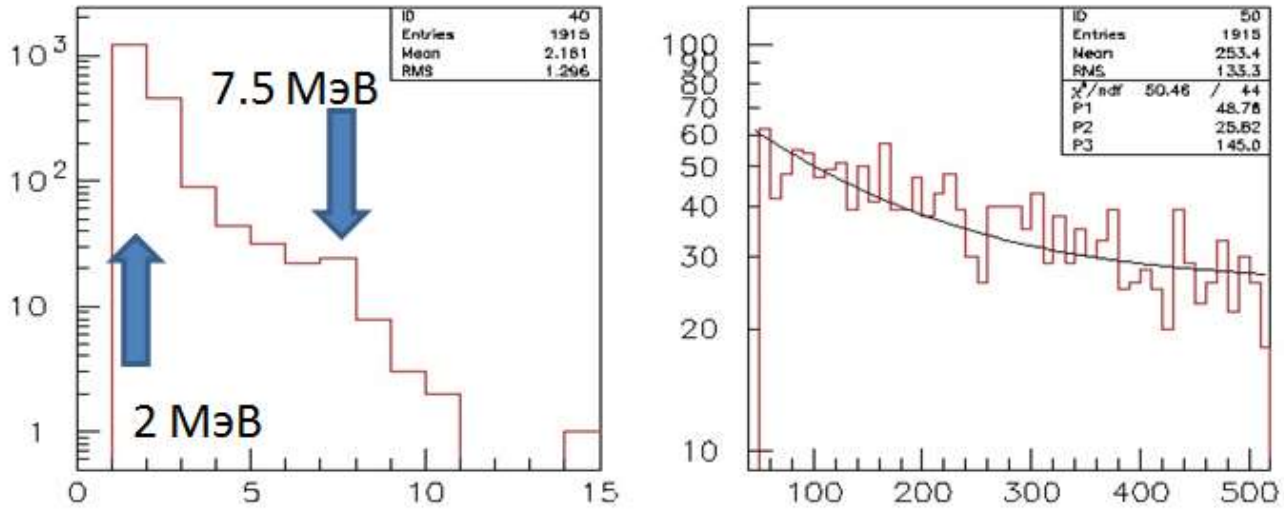


Рис.2.2. Энергетическое и временное распределение импульсов от np – и nFe – захватов для периода а). Кривая на правом рисунке – аппроксимация с использованием выражения ($N_n(t) = N_0 \cdot \exp(-t/\tau) + B$, где τ = 145 мкс).

До установки железа было отобрано $N_\mu^а$ = 20379 мюонов, прошедших через выбранную пару счетчиков. Этому числу мюонов соответствовало $N_n^а$ = 598 нейтронов.
В период б) зарегистрировано $N_\mu^б$ = 4037 мюонов. В этих событиях было найдено $N_n^б$ = 170 нейтронов.

В период а) набора данных (до установки железа) получено относительное число нейтронов N_n/N_μ = 0.030 n/μ. В это число входят нейтроны, образованные как в сцинтилляторе, так и в железе счетчиков, окружающих выбранную пару. Рассчитанная эффективность

регистрации нейтронов при такой конфигурации составляет η_{Fe} = 0.22 и η_{sc} = 0.69 для нейтронов, рожденных в железе и сцинтилляторе, соответственно.

После помещения дополнительного слоя железа величина N_n/N_μ составила 0.042 n/μ (Рис. 2.3). В это количество входят также и нейтроны, рожденные в дополнительном слое железа. Эффективность регистрации нейтронов в такой конфигурации составляет η_{Fe} = 0.21 и η_{sc} = 0.68, т.е. практически не изменилась. Это говорит о том, что установка железа не изменяет эффективности регистрации нейтронов, образованных мюоном в веществе детектора, окружающем дополнительное железо. Расчет также показал, что спектры энерговыделений γ-квантов до и после установки дополнительного железа практически не отличаются друг от друга.

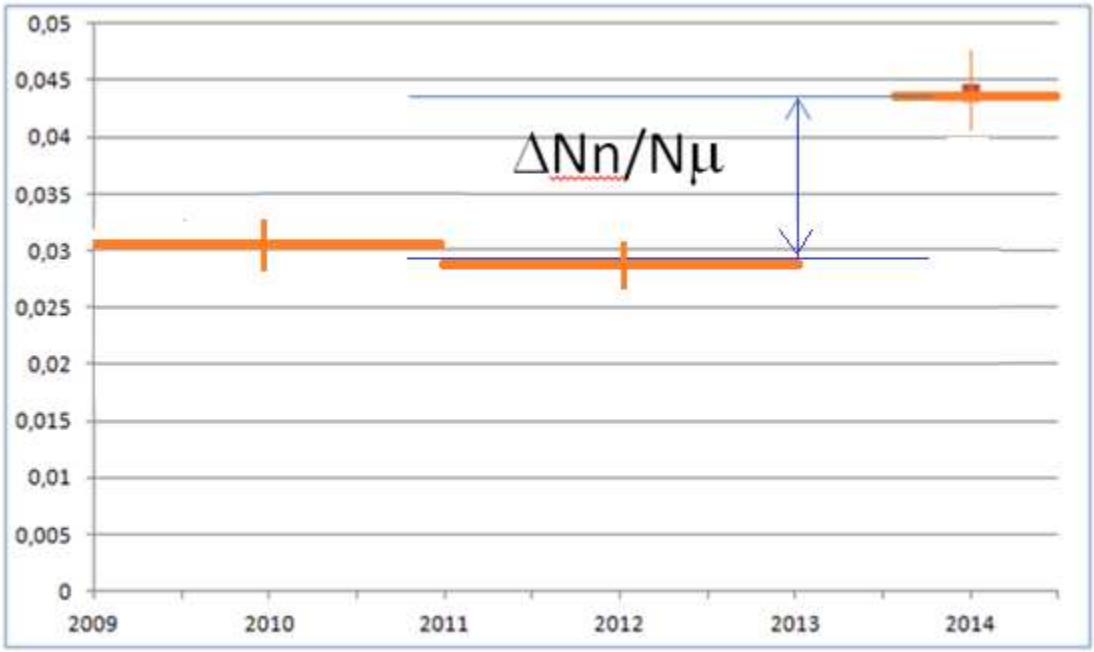


Рис.2.3. Относительное число нейтронов N_n/N_μ за год набора статистики.

Для определения выхода нейтронов в железе увеличение относительного числа нейтронов $\Delta N_n/N_\mu$ делим на среднюю длину пробега мюона в слое железа с учетом углового распределения мюонов ρl = 35.6 г/см^2 и на эффективность регистрации нейтронов η = 0.21: $Y_n = (\Delta N_n/N_\mu)/\eta\rho l = 16\times10^{-4}$ n/μ/(г/см^2). Абсолютная статистическая ошибка измерения равна $\pm 4\cdot10^{-4}$ n/μ/(г/см^2). Относительная систематическая ошибка составляет 6 %.

12.3 Эксперимент OPERA

Целью эксперимента OPERA (Рис.3.1) является наблюдение осцилляций ν_μ в ν_τ в пучке ν_μ от ускорителя ЦЕРН посредством прямой регистрации τ-лептонов в ядерной эмульсии в

подземной национальной лаборатории Гран Сассо национального института Ядерной физики (Италия). Пучок мюонных нейтрино от ускорителя SPS в ЦЕРНе направляется на детектор, находящийся в 732 км, который он достигает за $2.7 \cdot 10^{-3}$ секунды. Главный элемент детектора - эмульсионные пластины, в которых будут исследоваться события взаимодействия нейтрино, в том числе ν_τ, появление которых связано с эффектом осцилляции.

Рис.3.1 Эксперимент ОПЕРА в зале С подземной лаборатории Гран Сассо.

Для набора статистики необходима большая масса детектора, а для наблюдения короткоживущего тау-лептона требуется высокое пространственное разрешение. Детектор массой 1.25 кт состоит из двух независимых супермодулей, включающих в себя блоки мишени, трековую систему целеуказания (ТСЦ) и мюонные спектрометры. Основной элемент детектора – эмульсионный кирпич, состоящий из 56 свинцовых пластин толщиной в 1 мм и 57 эмульсионных пластин. Поперечные размеры эмульсионного кирпича 12.8×10.2 см^2, толщина 7.9 см (около 10 радиационных длин) За каждой стенкой из мишенных блоков находятся ТСЦ, указывающие на эмульсионный кирпич, в котором имело место взаимодействие.

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

В 2012 году набор данных был закончен, детектор зарегистрировал около 17 000 взаимодействий нейтрино, для них были определены блоки мишени, содержащие вершину

события, в процессе набора данных специальный робот извлекал блоки из детектора, они разбирались, ядерная фотоэмульсия была проявлена и отправлена в институты-участники эксперимента для анализа. В ближайшие два года анализ данных будет полностью завершен, детектор разобран. Однако накопленный за годы проведения эксперимента опыт будет использован в новых проектах по нейтринной физике. Части детектора OPERA уже ждут в экспериментах JUNO (Китай) и SHIP (ЦЕРН). В последнем проекте ожидается беспрецедентно интенсивный поток тау-нейтрино, и опыт эксперимента OPERA будет чрезвычайно полезен для исследования взаимодействий этой частицы.

На рис. 3.2 представлено современное состояние обработки экспериментального материала. Как видно из рисунка, из 17 тысяч событий, найденных в эмульсионном мишенном блоке, лишь в ≈ 6 тысячах событий найдена вершина взаимодействия. Ещё меньше событий полностью опубликовано в базе данных коллаборации OPERA.

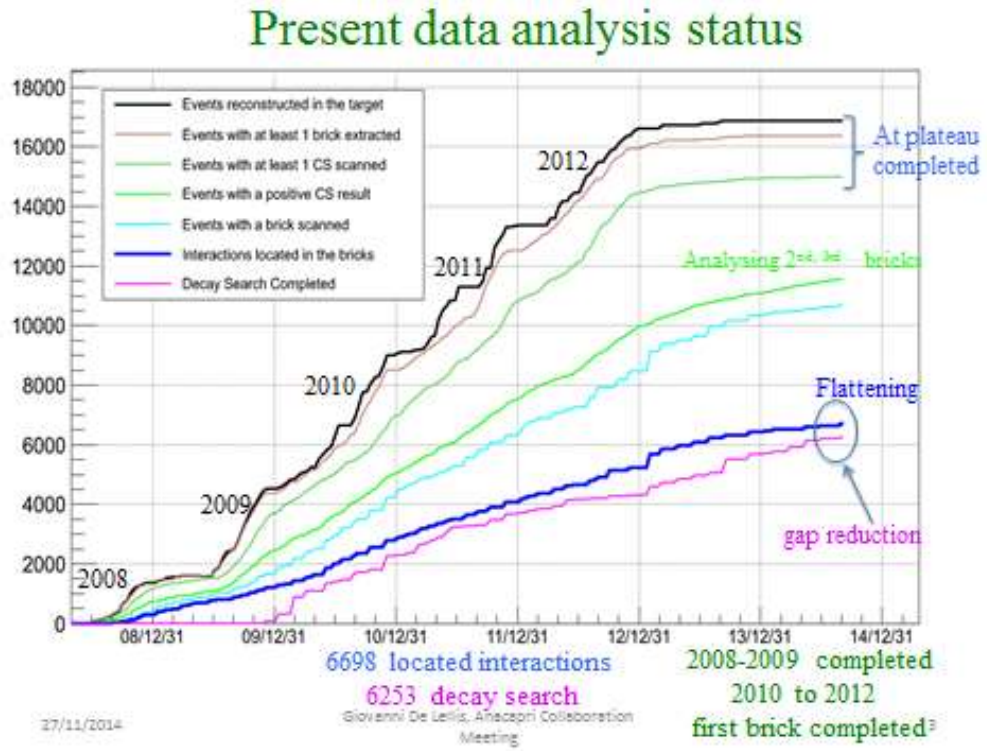


Рис. 3.2. Современный статус анализа экспериментальных данных эксперимента OPERA по данным доклада De Lellis, сентябрь 2014 г.

Российские участники эксперимента OPERA внесли существенный вклад в проведение и анализ эксперимента, в том числе, принимали участие в сборке детектора в лаборатории Гран-Сассо, в обработке экспериментальных данных на различных этапах, начиная с уровня процедур проявки эмульсий и до физического анализа данных. В 2014 году была продолжена обработка эмульсионного материала эксперимента OPERA на сканирующих комплексах ФИАН и НИИЯФ МГУ (всего на сканирование было передано 98 эмульсионных кирпича). В

центральной базе данных коллаборации OPERA в 2014 г. опубликовано 28 событий. В обработанном материале не обнаружено чармированных событий.

Выполнен многомерный анализ четырех событий-кандидатов на взаимодействие nu_tau в эмульсионном детекторе эксперимента OPERA. Показано, что гипотеза об отсутствии осцилляций может быть отвергнута на уровне значимости ~5.1 σ.

12.3.1 Регистрация четвёртого события-кандидата в эксперименте OPERA

Обработаны данные эксперимента OPERA с 2008 по 2012 год. Первое событие-кандидат было найдено и опубликовано в 2010 году. Событие с участием тау-нейтрино отмечено по характерной топологии распада тау-лептона, который родился при взаимодействии таонного нейтрино с ядром свинца ($\tau^- \to h$). В 2013 году была опубликована работа о втором событии-кандидате с распадом тау лептона на три адрона ($\tau^- \to 3h$). В 2014 году опубликована статья о третьем событии в канале $\tau^- \to \mu$.

К настоящему времени обнаружены 4 события-кандидата на взаимодействие ν_τ в эмульсионном детекторе в каналах распада $\tau \to h$, $\tau \to 3h$ и $\tau \to \mu$ (в канале распада $\tau \to e$ к настоящему моменту не обнаружено ни одного события-кандидата). Вид четвертого события представлен на Рис. 3.3. Рисунок слева – проекция z-y продольная к направлению нейтрино, справа – поперечная проекция. Гипотеза только фона – 0.23 события – отвергнута на уровне статистической значимости 4.2σ.

Получены ограничения на модели смешивания активных нейтрино со стерильными. Этот очень важный результат доказывает существование переходов двух типов нейтрино - мюонных и тау, объясняет дефицит атмосферных мюонных нейтрино.

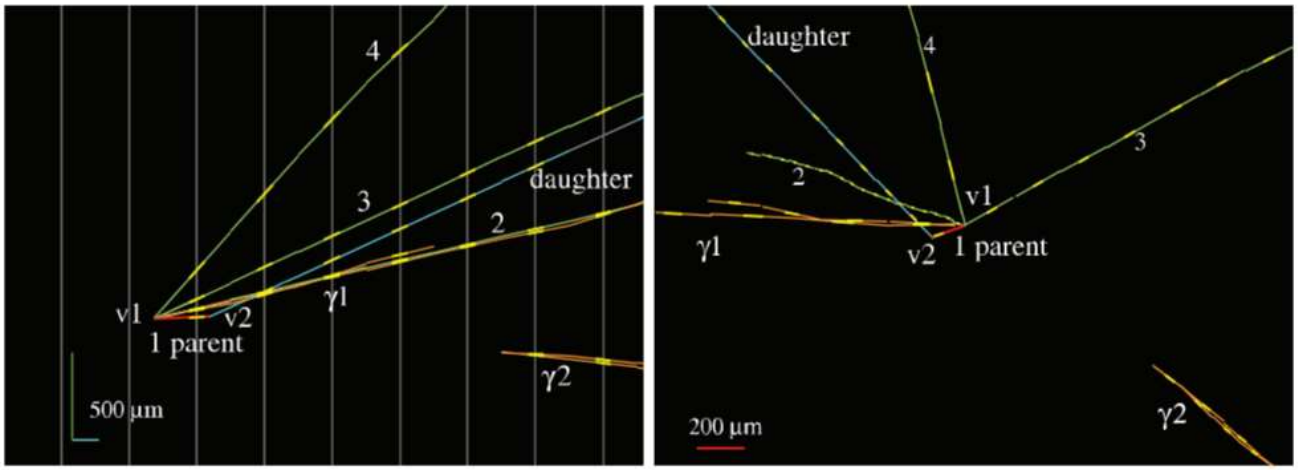


Рис.3.3 Четвертое событие-кандидат на тау –взаимодействие в детекторе OPERA.

12.3.2 Зарядовое отношение мюонов космических лучей в диапазоне от 1 до 20 ТэВ

OPERA является гибридным детектором; он включает в себя мишенную часть, состоящую из эмульсионных блоков и электронные детекторы, которые служат для регистрации времени прихода событий. Кроме событий от пучка CNGS, детектор OPERA регистрирует также космические мюоны, которые являются фоном для поиска осцилляций. Примеры нескольких событий, зарегистрированных электронными детекторами эксперимента OPERA, приведены на рис. 3.4. Каждому событию соответствуют два рисунка – вид сверху и вид сбоку. Каждый супермодуль детектора OPERA имеет магнитный спектрометр, служащий для измерения импульса мюона. Спектрометры состоят из магнита, в железо которого вставлены камеры RPC и системы координатных детекторов на основе дрейфовых трубок (HPT). Система камер RPC снабжена добавочными наклонными модулями, расположенными под углом 42.6 гр к горизонтали, которые помогают точнее восстанавливать треки частиц. Каждый спектрометр имеет по 6 модулей HPT, позволяющих восстанавливать параметры треков с разрешением ~ 0.3 мм, что обеспечивает возможность измерения импульса и знака заряда мюонов.

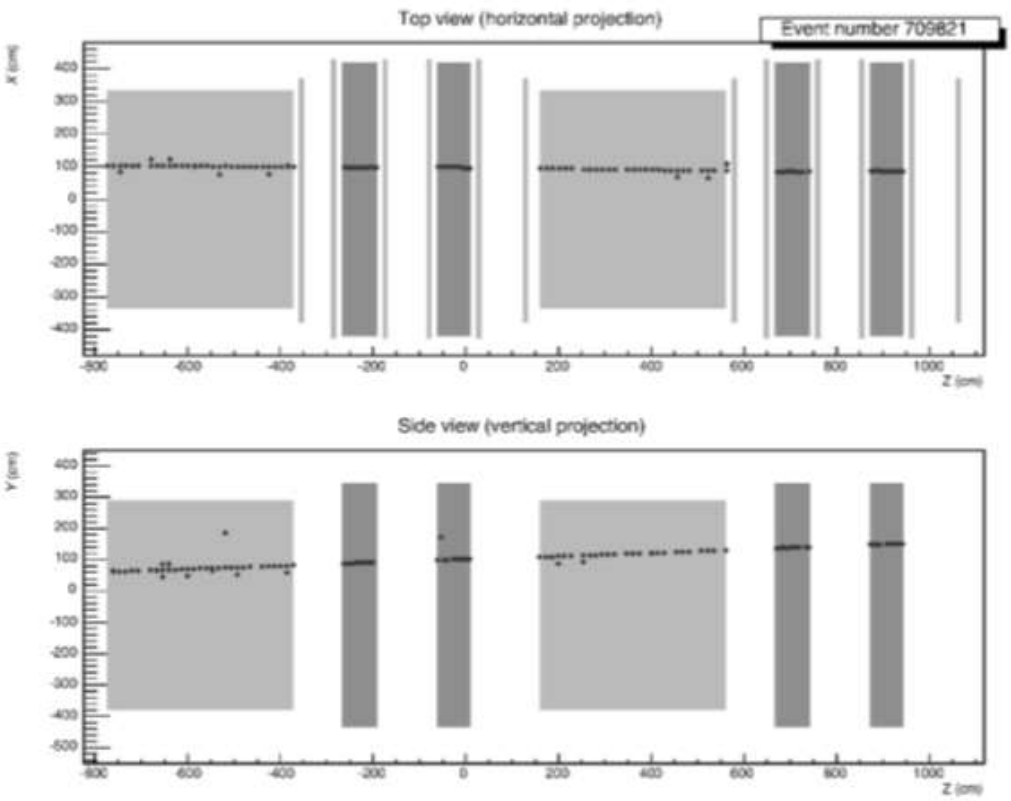


Рис.3.4. Пример прохождения мюона через детектор OPERA.

В эксперименте OPERA по данным 2008-2012 получено зарядовое отношение атмосферных мюонов. Данные эксперимента были разделены на 4 диапазона энергий. Для каждого диапазона определялось среднее значение энергии, угол, отношение *R* (μ+/μ-) и статистические и систематические ошибки (Табл.3.1).

Bin	$\mathcal{E}_\mu \cos\theta^*$ (GeV)	$(\mathcal{E}_\mu \cos\theta^*)_{MPV}$ (GeV)	$\langle\theta\rangle(deg)$	R_μ	$\delta R_\mu(stat.)$	$\delta R_\mu(syst.)$ %
1	562–1122	1091	47.5	1.357	0.009	1.8
2	1122–2239	1563	42.8	1.388	0.008	0.1
3	2239–4467	2972	46.9	1.389	0.028	2.1
4	4467–8913	7586	60.0	1.40	0.16	7.1

Таблица 3.1. Величины зарядового отношения мюонов R (μ+/μ-) для четырех диапазонов энергии.

Наблюдаемое поведение R (μ+/μ-) как функция энергии от 1 до 20 ТэВ не показывает отклонения от модели включающей только вклад пионов и каонов в быструю компоненту мюонного потока (Рис.3.5).

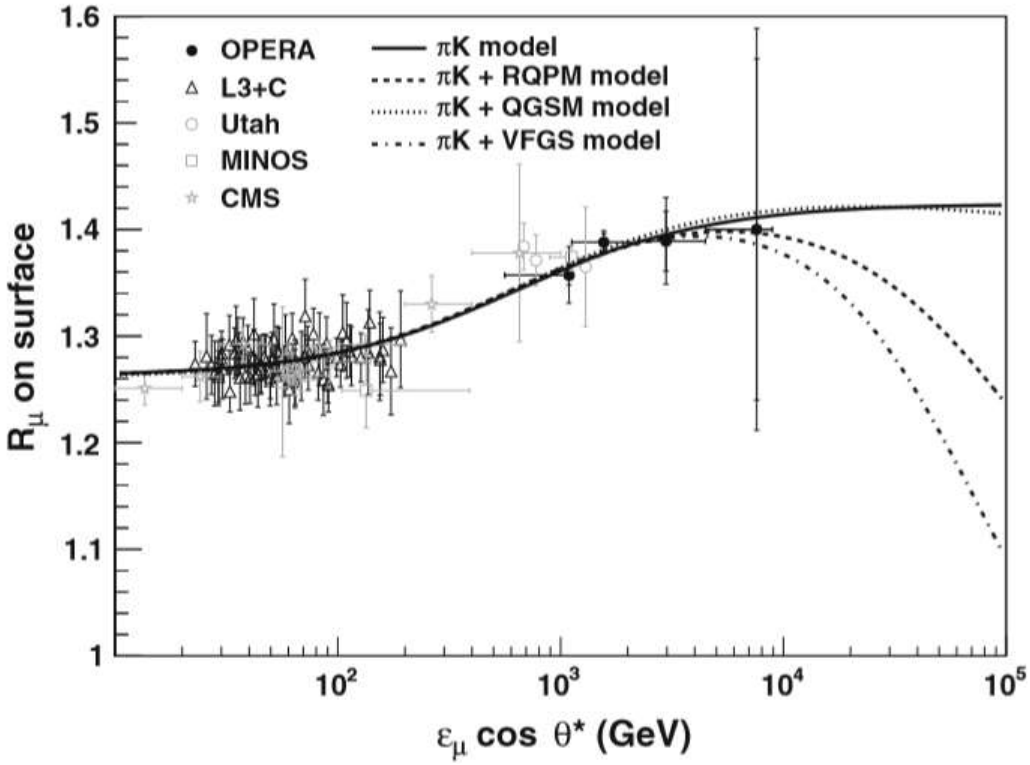


Рис.3.5. Измерение зарядового отношения мюонов как функция энергии на поверхности. Серые точки – эксперименты L3+C, Utah, MINOS, CMS.

12.4 Поиск разных типов нейтринного излучения от коллапсирующих звезд и проведение исследований в области нейтринной физики, астрофизики и физики космических лучей на подземных детекторах Лаборатории ЭМДН РАН и Лаборатории Гран Сассо

За три года получены следующие важнейшие результаты:

- По данным работы нейтринного телескопа АСД (Артемовской Научной станции) в течение 37 лет (1977 – 2014) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.07 года на 90% уровне достоверности.
- По данным работы установки LVD 1992 г. по 2014г. (22 года) предел на частоту вспышек сверхновых составляет 1/9.55 $г^{-1}$ на 90% уровне достоверности.
- С использованием нейтринного пучка ЦЕРН - Гран Сассо, с короткими банчами шириной 3 нс и интервалом между ними 100 нс, на установке LVD измерена величина относительного отклонения скорости нейтрино (v) от скорости света: $-3.3\times10^{-6} < (v - c)/c < 3.5\times10^{-6}$ (на 99% уровне достоверности).
- По результатам обработки данных 2009-2011 эксперимента LVD получены первые результаты по поиску осцилляций мюонных нейтрино в электронные в CNGS пучке мюонных нейтрино. Модульная структура установки позволяет определить топологию событий и разделить события от электронного и мюонного нейтрино. Доля кандидатов на регистрацию электронных нейтрино в CNGS мюоном пучке составляет d = 504/60776 = 0.8 %, величину близкую к их доле в пучке.
- На основе экспериментальных данных, полученных с 2010 по 2013 г, определено число нейтронов, генерированных мюонами в 5 см толщине соли NaCl, расположенной между двумя счетчиками в детекторе LVD. Количество нейтронов, генерированных мюоном в 1 $г/см^2$ NaCl равна: $Y_n(NaCl) = (9 \pm 2) \times10^{-4}$ ($n/мюон/(г/см^2)$).
- Проведено моделирование по методу Монте-Карло эксперимента по изучению генерации нейтронов мюонами, имеющими среднюю энергиею 280 ГэВ в железе, дополнительно установленном в структуру LVD.

В 2014 году изучалась генерация нейтронов в различных веществах. Получены оригинальные результаты в расчетах с помощью программы Geant4. Ниже, более подробно, описана методика расчетов и формулируются основные выводы.

12.4.1 Моделирование генерации нейтронов мюонами космических лучей в различных веществах

На важную роль и необходимость учета процесса генерации ядерно-активных частиц в адронных ливнях впервые было указано в работе Ryazhskaya O., Zatsepin G. (Proc. of ICRC, 1965). Реакция глубоко неупругого взаимодействия $\mu + A \rightarrow \mu + m\pi + \chi$ мюонов с ядрами грунта приводит к множественной генерации пионов с дальнейшим развитием ядерного каскада. Точное определение параметров нейтронного фона, производимого мюонами высоких энергий, оказывается вопросом исключительной важности для проектируемых подземных экспериментов, а также для оптимизации конструкции функционирующих детекторов и их элементов защиты с целью повышения чувствительности регистрации.

Для определения зависимости числа рожденных нейтронов от атомного веса материала мы провели численное моделирование процесса прохождения мюонов с различной энергией через мишень простой формы с однородным распределением плотности и бесконечными размерами в направлении, поперечном по отношению к направлению движения мюона. Полная толщина мишени для каждого вещества выбиралась эквивалентной значению 2000 г см$^{-2}$, что соответствует средней потере энергии мюона около 5%. Результаты расчетов для энергии мюонов равной 280 ГэВ приведены на рисунке 4.1, на котором представлено число нейтронов Y_n, рожденных в веществе мишени, как функция среднего атомного веса $\langle A \rangle$. Следует отметить, что представленные данные получены без всякого отбора событий. Отбор мюонов, скажем, по минимальной энергии, потерянной при прохождении через мишень, не приводит к качественному изменению характера полученной зависимости.

Вычисленные значения числа рожденных нейтронов можно разделить на три заметно отличные группы по химическому составу вещества мишени (см. рисунок 4.1): без α-частичных ядер (например, Fe или NaCl), чистые α-частичные ядра (C, Ca и пр.) и материалы со смешенным составом (например, скальная порода подземной лаборатории Гран Сассо), для которых на рисунке указана доля альфа-частичных ядер. У первой группы веществ темп генерации нейтронов $Y_n(A)$ хорошо аппроксимируется зависимостью вида $Y \sim A^{0.904}$ (черная кривая на рисунке 4.1).

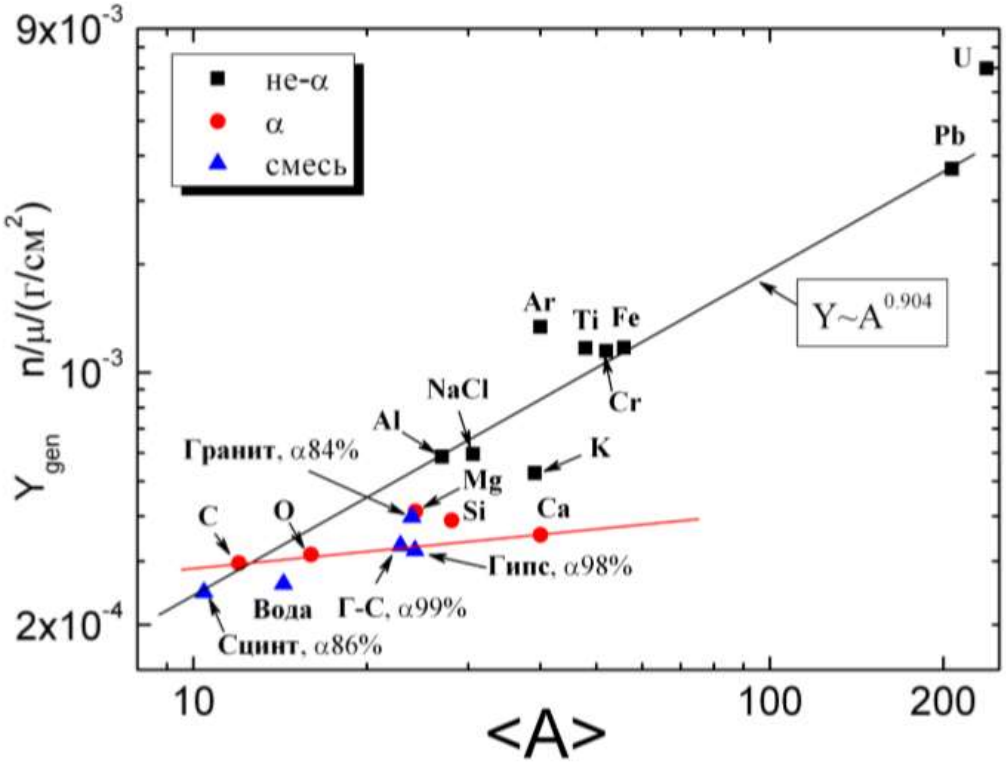


Рис. 4.1 Зависимость генерации нейтронов от атомного веса вещества для мюонов с энергией 280 ГэВ (Г-С – скальная порода подземной лаборатории Гран Сассо).

Для α-частичных ядер зависимость числа рожденных нейтронов от атомного веса оказывается слабой (красная кривая на рисунке 4.1). Наконец, вещества со смешанным составом демонстрируют промежуточное поведение с относительным положением между двумя упомянутыми кривыми, заметно коррелирующим с долей α-частичных ядер в химическом составе вещества мишени. Тем не менее, некоторые химические элементы (такие, например, как K и U) согласуются неудовлетворительно с этим упрощенным представлением.

Особое внимание обращают на себя аргон Ar и кальций Ca, которые, имея очень близкие значения атомного веса, существенно отличаются по числу рожденных нейтронов (в несколько раз). Для исследования этого эффекта был выполнен следующий расчёт с использованием транспортного кода SHIELD: цилиндрическая мишень (R=1.5 м, H=3 м) облучалась вдоль оси пучком π−мезонов с энергиями 1, 10 и 100 ГэВ. Материалом мишени служили или жидкий аргон (ρ=1.65 г/см^3) или кальций (ρ=1.55 г/см^3). Были вычислены генерация нейтронов и выход нейтронов из мишени. Генерация нейтронов – это число нейтронов с энергией ниже 14.5 МэВ, образовавшихся внутри мишени в ядерных реакциях под действием адронов (включая каскадные нейтроны с энергией выше 14.5 МэВ). Выход нейтронов – это число нейтронов с энергией ниже 14.5 МэВ, вылетевших за границу мишени. Результаты представлены в таблице 4.1. Большое различие между Ar и Ca объясняется, во-

первых, более высокой множественностью нейтронов в адрон-ядерных реакциях на аргоне. Вторая причина – значительное (в несколько раз) различие в нейтронных сечениях при энергиях ниже 14.5 МэВ.

Энергия пионов (ГэВ)	Ar		Ca	
	генерация	Выход из мишени	генерация	Выход из мишени
1	16.7	17.1	7.47	4.69
10	77.0	78.8	33.6	20.7
100	381	390	161	99.1

Таблица 4.1. Сравнение генерации и выхода нейтронов для цилиндрической мишени, облучаемой пи-мезонами разных энергий. Приведены числа рожденных в мишени и вышедших нейтронов из мишени в расчете на 1 пи-мезон. Материал мишени – жидкий аргон или кальций.

12.4.2 Расчеты генерации нейтронов мюонами в железе

Ведется эксперимент, на базе детектора LVD, по измерению числа нейтронов генерированных мюонами в веществе с различными атомными номерами (Fe, Pb). Прямой метод измерения выхода нейтронов предложен впервые. Полная Монте-Карло симуляция эксперимента выполнена для A=57 (Fe). Получены первые результаты измерений.

Рис. 4.2. Конструкция с дополнительным железом между двумя счетчиками LVD.

14 мая 2013 года между счетчиками LVD 3446 и 3436 было установлено железо, масса которого 470 кг (Рис. 4.2). Мюон, пересекая пару счетчиков с введенным веществом между

ними, образует дополнительное количество нейтронов. Увеличение числа нейтронов в расчете на один мюон относится к нейтронам, рожденным в железе на длине пробега мюона в г/см^2.

Monte-Carlo моделирование		
	Расчет с доп.железом	**Расчет без доп. железа**
Число мюонов	30000	30000
Длина пробега мюона в сцинтилляторе г/см^2	441.5	441.3
Длина пробега мюона в железе структуры , г/см^2	361.2	361.2
Длина пробега мюона в доп. железной пластине г/см^2	35.6	0
Вещество детектора	**Число рожденных нейтронов**	
доп. железо	1041	0
сцинтиллятор	3125	3336
Железо структуры	10475	10284
Вещество детектора	**Число захваченных нейтронов**	
доп. железо	106	0
сцинтиллятор	10049	9508
железо структуры	4197	3891
Порог, МэВ	**Эффективность регистрации**	
0.7	0.23	
1	0.21	
1.5	0.20	

Таблица 4.2. Результаты Монте-Карло моделирования эксперимента для двух случаев: правая колонка – моделирование без дополнительно установленного железа; центральная – с доп. железом.

Полное Монте-Карло моделирование эксперимента проводилось с помощью универсального программного пакета Geant4. Мюоны, с энергией, разыгранной по известному спектру и угловому распределению, запускали через выбранные счетчики. Моделировался процесс рождения и распространения нейтронов от мюонов в веществе установке LVD. Фиксация нейтронов производилась по гамма-квантам, испускаемым в результате радиационного захвата тепловых нейтронов протонами сцинтиллятора и ядрами железа в

структуре LVD. Рассматривалось два варианта розыгрыша мюонов и геометрии: а) с дополнительным 4-х см слоем железа и б) без дополнительного железа. В каждой группе разыгрывалось 30000 мюонов. Результаты моделирования представлены в таблице 4.2. Было получено, что в дополнительном железе было рождено 1041 нейтрон. Средняя длина пробега мюона в 4-х сантиметровом слое железа с учетом углового распределения мюонов составила 35.6 г/см^2. В результате моделирования были получены эффективности регистрации нейтронов, рожденных мюонами, в доп. железной пластине с различными порогами регистрации. Для порога Eth=1 МэВ, используемом в эксперименте, эффективность регистрации нейтронов составила 0.21.

12.5 Международное соглашение о Научно-исследовательской работе российских научных групп в Национальной лаборатории Гран Сассо (Италия) направление: «Физика космических лучей и редких распадов»

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

Лаборатория Гран Сассо Национально института ядерной физики Италии расположена под горным массивом в 10-километровом туннеле между городами Терамо и Л'Аквила в 120 км от Рима. Ее подземная структура включает в себя три больших экспериментальных зала 100 м в длину, 20 м в ширину и 18 м в высоту каждый, общим объемом 180 тыс. м^3.

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

Работы по международному сотрудничеству на эксперименте LVD предусматривают: проведение экспериментов по генерации нейтронов мюонами в железе и свинце (подготовка пластин, резка, установки, монтаж конструкции), замена фотоэлектронных умножителей, круглосуточные дежурства на установке. С 1 января по 31 декабря 2014 года сотрудники ИЯИ дежурили в течение 17 недель (17 × 7 дней × 1 человек) = 119 человекодней.

В течение 2014 года с 15 января по 20 декабря сотрудники ИЯИ РАН дежурили на установке OPERA 49 недель, в том числе 33 недели работали 1 человекодень и 16 недель – 2 человекодня. Полная активность группы OPERA ИЯИ РАН составляет 165 день × 1 + 80 день × 2 = 325 человекодней.

Super-K, LVD, IceCube, Borexino, KamLAND образуют глобальную сеть SNEWS (SuperNova Early Warning System) для поиска нейтринных всплесков от Сверхновых, которая работает уже в течение 14 лет (с Borexino – 4 года). С детекторов посылается информация о кандидатах на нейтринное событие на сервер SNEWS в Брукхэйвенскую Национальную лабораторию, США. Цель SNEWS – предоставить астрономическому сообществу раннее предупреждение о вспышке Сверхновой в нашей Галактике с тем, чтобы эксперименты, которые не могут самостоятельно зарегистрировать сигнал от Сверхновой, могли бы наблюдать явление сверхновой. Более того, SNEWS увеличивает достоверность событий, детектируемых одновременно несколькими детекторами на пороге их чувствительности.

По данным работы нейтринных телескопов LVD и АСД в течение 37 лет (с 1977 г по 2014 г) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.07 года на 90% уровне достоверности.

В 2014 году на установке LVD проводится эксперимент по измерению числа нейтронов, генерируемых мюонами в железе (Fe) и свинце (Pb). Получены первые результаты измерений. Получены результаты по исследованию генерации нейтронов, образованных горизонтальными мюонами, рождёнными от нейтринного пучка из ЦЕРНа в детекторе LVD.

В эмульсионном эксперименте OPERA в 2014 году обнаружено четвертое событие-кандидат на распад тау лептона. К настоящему времени обнаружены события-кандидаты на взаимодействие ν_τ в эмульсионном детекторе в каналах распада $\tau \to h$, $\tau \to 3h$ и $\tau \to \mu$. “Гипотеза только фона” отвергнута на уровне статистической значимости 4.2σ. Получены ограничения на модели смешивания активных нейтрино со стерильными.

12 Публикации и доклады в 2014 году

Опубликованные статьи

1). N. Agafonova et al., OPERA Collaboration, Evidence for $\nu\mu \to \nu\tau$ appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment, arXiv:1401.2079, Phys. Rev. D 89, 051102 (2014)

2). N. Agafonova et al., OPERA Collaboration, Measurement of TeV atmospheric muon charge ratio with the full OPERA data, arXiv:1403.0244, Eur. Phys. J. C (2014) 74:2933

3). N. Agafonova et al., OPERA Collaboration, Procedure for short-lived particle detection in the OPERA experiment and its application to charm decays, arXiv:1404.4357, The European Physical Journal C, Volume 74, Issue 8, (2014)

4). N. Agafonova et al., OPERA Collaboration, The Angular Matching Method for the Muon Charge Sign Measurement in the OPERA Experiment, arXiv:1404.5933, Preprint submitted to Nuclear Instruments & Methods A

5). N. Agafonova et al., OPERA Collaboration, Observation of $\nu\tau$ appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 101C01 (10 pages), arXiv:1407.3513

6). LVD Collaboration N.Y. Agafonova et al. «Implication on the core collapse supernova rate from 21 years of data of the Large Volume Detector» arXiv:1411.1709, Submitted to The Astrophysical Journal

Принятые к печати статьи

1). Н.Ю. Агафонова и др. (Коллаборация LVD) "Измерение числа нейтронов, генерированных мюонами космических лучей, с помощью детектора LVD", Известия РАН, Сер. физ. Т.78, 2015 (в печати)

2). Н.Ю. Агафонова и др. (Коллаборация LVD) "Генерация нейтронов горизонтальными мюонами от нейтринного пучка из ЦЕРНа", Известия РАН, Сер. физ. Т.78, 2015 (в печати)

3). Н.Ю. Агафонова и др. "Совместный анализ экспериментальных данных по поиску нейтрино от звездных коллапсов на детекторах LVD и БПСТ", Известия РАН, Сер. физ. Т.78, 2015 (в печати)

4). К.В. Мануковский, О.Г. Ряжская, Н.М. Соболевский, А.В. Юдин "Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных материалах", Известия РАН, Сер. физ. Т.78, 2015 (в печати)

Опубликованные доклады в трудах конференций

1). Fabio Pupilli, for the OPERA Collaboration, Recent results of the OPERA experiment, Proceedings of the 14th ICATPP Conference, 23-27 September 2013, Villa Olmo - Como (Italy), arXiv:1401.6776

2). O.G. Ryazhskaya, I.R. Shakiryanova, OPERA and LVD Collaboration. "Search for $\nu\mu\rightarrow\nu e$ oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam" Il Nuovo Cimento C, PONTECORVO100, Year 2014, Issue 3, May-June, pp. 185-187

3). O.G. Ryazhskaya, I.R. Shakiryanova LVD Collaboration. "Measurements of neutrino velocity with LVD" Il Nuovo Cimento C, PONTECORVO100, Year 2014, Issue 3, May-June, pp. 181-183

4). Serhan Tufanlia on behalf of the OPERA Collaboration "The OPERA Experiment and Recent Results" EPJ Web of Conferences 71, (2014) 00133, (2nd International Conference on New Frontiers in Physics, from 28 August 2013 to 5 September 2013, Kolymbari, Crete,Greece)

5). G. De Lellis on behalf of the OPERA Collaboration "Evidence for $\nu\mu\rightarrow\nu\tau$ oscillations in the OPERA experiment" Nuovo Cim. C037 (2014) 124-128, (25th Conference on High Energy Physics (IFAE 2013), 3-5 Apr 2013. Monserrato, Italy)

6). OPERA Collaboration (N. Mauri (Frascati) for the collaboration) "Highlights from the OPERA experiment", EPJ Web Conf. 70, (2014) 00045, (1st International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2012), 10-16 Jun 2012. Kolymbari, Crete, Greece)

7). OPERA Collaboration (Antonia Di Crescenzo (INFN, Naples & U. Naples (main)) for the collaboration) "OPERA: Status and prospects", Mod.Phys.Lett. A29 (2014) 1430008, DOI: 10.1142/S0217732314300080

8). OPERA Collaboration (T.A. Dzhatdoev on behalf of the OPERA Collaboration) "Search for Neutrino Oscillations in Appearance Mode with the OPERA Experiment", arXiv:1402.3861 ,29th International Workshop on High Energy Physics : New Results and Actual Problems in Particle Physics, Astrophysics and Cosmology. (IHEP 2013), 26-28 Jun 2013. Protvino, Russia

Выступление на конференциях и семинарах

1). C.Vigorito, W. Fulgione & A. Molinario for LVD Collaboration, "Search for Supernova Neutrino Bursts at LVD", XXVI Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO 2014), June 2-7, Boston (USA)

2). S. Dusini on behaf OPERA Collaboration "Results from OPERA: Observation of $\nu\mu\rightarrow\nu\tau$ oscillation with OPERA", XXVI Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO 2014), June 2-7, Boston (USA)

3). 33-Russian conference of Cosmic Rays, ВККЛ 2014, Dubna, 11-15 August, 2014, (приглашенный доклад) O. Ryazhskaya " Подземная физика и эксперименты на детекторе LVD"

4). 33-Russian conference of Cosmic Rays, ВККЛ 2014, Dubna, 11-15 August, 2014, Н. Ю. Агафонова и др. (LVD Коллаборация) "Изучение генерации нейтронов, мюонами космических лучей в железе, с помощью детектора LVD"

5). 33-Russian conference of Cosmic Rays, ВККЛ 2014, Dubna, 11-15 August, 2014, В.В. Ашихмин и др. (LVD Коллаборация) "Анализ частоты фоновых совпадений для экспериментов БПСТ и LVD"

6). 33-Russian conference of Cosmic Rays, ВККЛ 2014, Dubna, 11-15 August, 2014, И.Р. Шакирьянова и др. (LVD Коллаборация) " Генерация нейтронов горизонтальными мюонами от нейтринного пучка из ЦЕРНа"

7). 33-Russian conference of Cosmic Rays, ВККЛ 2014, Dubna, 11-15 August, 2014, А.В. Юдин и др. "Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных материалах"

8). 33-Russian conference of Cosmic Rays, ВККЛ 2014, Dubna, 11-15 August, 2014, (poster) Р. Новосельцева и др."Первые результаты поиска нейтринных всплесков по совместным данным БПСТ и LVD"

9). 1094 Семинар "Нейтринная и ядерная астрофизика" имени Г.Т. Зацепина, 7 ноября, 2014, Агафонова Н.Ю. "Изучение мюонов космических лучей и нейтронов, генерированных ими под землей в детекторе LVD" (по материалам диссертации)

10).1095 Семинар "Нейтринная и ядерная астрофизика" имени Г.Т. Зацепина,21 ноября, 2014, Ашихмин В.В. "Поиск нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд с помощью установок LVD и БПСТ"

12 Заключение

Сотрудники подразделения принимали участие в работах по выполнению Государственного задания на 2014 год, включающего проекты по целевым программам РАН («Фундаментальные свойства материи и астрофизика» и «Экспериментальные и

теоретические исследования фундаментальных взаимодействий, связанные с работами на ускорителях ЦЕРН»), по выполнению гранта РФФИ 12-02-00213_а «Поиск разных типов нейтринного излучения от коллапсирующих звезд и проведение исследований в области нейтринной физики, астрофизики и физики космических лучей на подземных детекторах Лаборатории ЭМДН РАН и Лаборатории Гран Сассо» 2012-2014, по выполнению проекта по международному соглашению о Научно-исследовательской работе российских научных групп в Национальной лаборатории Гран Сассо (Италия) направление: «Физика космических лучей и редких распадов».

В рамках Госзадания на 2015 год планируются работы по поддержанию установок LVD и АСД в работоспособном состоянии для обеспечения научных программ экспериментов; обработка информации по поиску всех типов нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд на детекторах АСД и LVD. Изучение потоков всех типов нейтрино при условии вспышки Сверхновой в Галактике, либо установление предела на частоту коллапсов. Совместный анализ данных нейтринных телескопов ИЯИ РАН. Определение коэффициента корреляции для одиночных импульсов и для кластеров фоновых событий, измеренных большими сцинтилляционными детекторами LVD, АСД, БПСТ.

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

Эксперимент OPERA подходит к своей финальной стадии. В 2015 году планируется разбор детектора, сканирование оставшейся накопленной статистики и обнаружение еще 1-2 событий-кандидатов.

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

Сотрудники подразделения выиграли *грант РФФИ на 2015-2017 года*. В план на 2015 включены работы по установлению свинца в специальные конструкции между счетчиками установки LVD. Проведение измерений генерации нейтронов мюонами в железе (набор дополнительной статистики – 1 год) и в свинце (получение предварительных результатов).

13 Лаборатория радиохимических методов детектирования нейтрино и Лаборатория галлий-германиевого нейтринного телескопа БНО

Руководитель работ чл.-корр. РАН В.Н.Гаврин.

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Разработка и создание нейтринных телескопов в низкофоновых подземных лабораториях и глубоко под водой для исследования природных потоков нейтрино и других элементарных частиц.

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

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

Руководители работ: Е.П. Веретёнкин, к.ф.-м.н. В.В. Горбачёв

Мониторинг нейтринного излучения Солнца.

Калибровочный эксперимент на двухзонной галлиевой мишени.

Исследование спектров быстрых нейтронов в подземных лабораториях.

Обозначения и сокращения

SNU – (Solar Neutrino Unit) Солнечная Нейтринная Единица, соответствует одному взаимодействию в секунду в мишени, содержащей 10^{36} атомов взаимодействующего с нейтрино изотопа.

SAGE – Российско-Американский галлиевый эксперимент.

BEST – Баксанский эксперимент по поиску стерильных нейтрино.

ГИП - газоизостатическое прессование

ППД – полупроводниковый детектор

ВТИ - внутреннее тормозное излучение

ЭИ – электрод-инструмент

13 Реферат

2 рис., 9 источников

СТАНДАРТНАЯ СОЛНЕЧНАЯ МОДЕЛЬ, СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО, ГАЛЛИЕВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, ИСКУССТВЕННЫЙ ИСТОЧНИК, РАДИОАКТИВНЫЙ ИЗОТОП, КАЛОРИМЕТР, ГЕРМАНИЕВЫЙ ДЕТЕКТОР

Объектом исследования являются нейтринное излучение Солнца и свойства нейтрино, коротко базовые осцилляционные переходы нейтрино в стерильные состояния, в рамках которых можно интерпретировать результаты, получившие название «галлиевая аномалия», полученные в галлиевых экспериментах SAGE и GALLEX при калибровках солнечных детекторов искусственными источниками нейтрино.

Цель работы — исследование физики Солнца и физики нейтрино, подготовка условий для выполнения экспериментов с искусственными источниками по исследованию свойств нейтрино и возможных коротко базовых осцилляционных переходов электронных нейтрино от 3 МКи искусственного ^{51}Cr источника в стерильные состояния.

Исследования нейтринного излучения Солнца и свойств нейтрино проводятся по ежемесячным измерениям величины скорости захвата солнечных нейтрино с энергией выше 233 кэВ на металлическом галлии в Галлий-германиевом нейтринном телескопе Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (ГГНТ), особенность которого состоит в его чувствительности к электронным нейтрино от протон-протонной реакции, в которой генерируется подавляющая часть солнечной энергии. Поиск коротко базовых переходов электронных нейтрино в стерильные состояния основан на исследовании взаимодействия потока нейтрино от мощного компактного искусственного источника ^{51}Cr с ядрами галлиевой мишени размещенной в специально созданной облучательной установке. В центр жидкометаллической 50 тонной галлиевой мишени, разделенной на две независимые зоны, внутреннюю и внешнюю, обеспечивающими равные средние длины пробега нейтрино, помещается источник электронных нейтрино ^{51}Cr активностью 3 МКи и измеряются скорости захвата нейтрино одновременно в каждой зоне. В случае статистически обеспеченного различия между величинами скорости захвата нейтрино в зонах, либо статистически обеспеченного отличия между средней скоростью захвата в обеих зонах и ожидаемой величиной, будет получено прямое указание на нестандартные свойства нейтрино. Полученные отношения измеренных в зонах скоростей к ожидаемым позволяют определить области разрешенных параметров осцилляций нейтрино в стерильные состояния.

В процессе выполнения НИР были получены следующие основные результаты:

1) получена величина скорости захвата нейтрино с энергией выше 233 кэВ на ядрах ^{71}Ga в ГГНТ за период измерений с 1990 по 2014 год, которая составляет $64.4^{+3.6}_{-3.7}$ SNU, что с учетом MSW эффекта соответствует полному современному потоку приходящих на Землю *pp*-нейтрино $(6.1\pm 0.84)\times 10^{10}$ ν_e/(см^2 сек);

2) в рамках подготовки условий для выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино создана специальная облучательная установка с каналом для ввода источника и размещением галлиевой мишени в двух независимых зонах;

3) создана методика изготовления стартовой мишени из 3500 г хрома-50 97% обогащения для наработки в реакторе СМ-3 радионуклида ^{51}Cr активностью 3МКи, выполнены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по исследованию возможности изготовления мишеней из компактного металлического хрома и изготовлены прототипы хромовых мишеней методом электроискровой резки заготовок.

4) созданы калориметрический и гамма-спектрометрический методы для измерения активности высокоинтенсивных нейтринных источников на основе радионуклида ^{51}Cr с точностью порядка 1%;

13 Введение

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

ГГНТ [1] был создан для измерения величины скорости захвата солнечных нейтрино в реакции $^{71}Ga + \nu_e \rightarrow {}^{71}Ge + e^-$, порог которой составляет 233 кэВ, с целью получения информации для решения проблемы дефицита нейтрино, наблюденного в ^{37}Cl эксперименте [2]. Низкий порог захвата нейтрино на ^{71}Ga делает галлиевый эксперимент чувствительным к реакции протон-протонного синтеза $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$, в которой генерируется подавляющая часть солнечной энергии. Приблизительно до середины 2014 года эксперимент на ГГНТ был единственным экспериментом, в котором измерялась скорости этой реакции [3].

В середине текущего года эксперимент Borexino [4] представил результаты независимого измерения величины потока *pp*-нейтрино, приходящего на Землю, используя реакцию рассеяния солнечных нейтрино на электронах жидкого сцинтиллятора, который блестяще подтверждает полученный в измерениях на ГГНТ результат. Таким образом, в настоящее время появилась возможность вести мониторинг потока приходящего на Землю *pp*-

нейтрино двумя независимыми группами различающимися методами, что значительно повышает достоверность получаемых результатов.

Использование высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино в настоящее время рассматривается как одно из основных направлений в исследованиях нестандартных свойств нейтрино [5,6]. Это связано с тем, что такие источники дают потоки чисто электронных нейтрино с известными спектрами и интенсивностями, которые могут быть измерены с высокой точностью, и позволяют выполнять исследования на очень коротких настояниях от источника. Начало этому направлению было положено четырьмя галлиевыми экспериментами SAGE [7,8] и GALLEX [9], в которых для калибровки детекторов использовались искусственные источники нейтрино. Неожиданно низкий результат, полученный в этих экспериментах, получил название «галлиевой аномалии». Дефицит нейтрино, обнаруженный в этих калибровочных экспериментах, также как и дефицит нейтрино в реакторных экспериментах на коротких расстояниях, может быть объяснен существованием осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния.

ГГНТ с использованием высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино предоставляет уникальные возможности для исследования осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях.

13 Основные результаты

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

Измерения потока солнечных нейтрино в эксперименте SAGE на ГГНТ проводятся радиохимическим методом. Солнечные электронные нейтрино с энергией выше 233 кэВ захватываются ядрами мишени ^{71}Ga. Количество нейтринных взаимодействий определяется по числу распадов образующихся атомов ^{71}Ge, которые по окончании примерно месячной экспозиции извлекаются из 50 тонной галлиевой металлической мишени и помещаются в миниатюрный пропорциональный счетчик, где регистрируются их распады. Процесс извлечения занимает около полутора суток, регистрация распадов – около шести месяцев.

Разработанные в эксперименте критерии отбора и временной анализ зарегистрированных событий позволяют определять величину потока нейтрино, приходящего на Землю от Солнца. Метод ГГНТ дает уникальную возможность детектирования низкоэнергетической части спектра солнечного нейтринного потока.

В 2014 году на ГГНТ в соответствии с программой ежемесячных измерений потока солнечных нейтрино выполнено 12 извлечений. Получена величина скорости захвата солнечных нейтрино на галлии в 2014 году. С января 1990 по декабрь 2014 года выполнено 245 измерений. В энергетических диапазонах *L*- и *K*-пиков распада ^{71}Ge отобрано 4864 события, из которых 1308 отнесено временным анализом к ^{71}Ge. Получена величина скорости захвата нейтрино с энергий выше 233 кэВ за весь период наблюдений 64.4 +3.7/-3.7 SNU.

На основе результатов галлиевых экспериментов с использованием результатов Cl эксперимент Дэвиса, SNO и Borexino в SAGE получена величина потока солнечных pp-нейтрино, достигающих Земли без изменения аромата, $3.38(1 \pm 0.14)\times10^{10}$ ν_e/(см^{2}с). С учетом MSW эффекта этот результат соответствует величине полного потока *pp*-нейтрино, приходящих на Землю, $6.0(1 \pm 0.14)\times10^{10}$ (см^{2}с)$^{-1}$, что хорошо согласуется с величинами, ожидаемыми на основе Стандартной солнечной модели (ССМ): 5.97 ± 0.04 (для high metallicity) и 6.04 ± 0.03 (для low metallicity), обе величины в единицах 10^{10} (см^2 с)$^{-1}$. Генерация энергии в ССМ строго ограничена измеренной светимостью Солнца и, принимая во внимание, что время выхода света, рождаемого в центральных областях Солнца, занимает порядка 10^{15} лет, расчетный поток *pp*-нейтрино представляет собой поток, выработанный Солнцем около 40000-100000 лет назад. Хорошее согласие между современной величиной *pp*-потока, измеряемой в галлиевых экспериментах, и потоком, полученным из солнечной модели с ограничением по светимости, означает, что поток *pp*-нейтрино от Солнца не изменился в пределах 14% неопределенности в течение последних 40000-100000 лет.

13.1.1 Модернизация химико-технологического комплекса ГГНТ и создание специальной облучательной установки для исследования осцилляционных свойств нейтрино на очень коротких расстояниях.

Особый интерес в настоящее время представляет исследование осцилляционных свойств нейтрино с использованием высокоинтенсивных бета-распадных нейтринных источников, так как они дают возможность наблюдать осцилляции нейтрино на очень коротких расстояниях, на которых в основном обнаружены аномальные результаты, не поддающиеся объяснению в рамках “стандартной теории” нейтринных осцилляций. Галлий-германиевый нейтринный телескоп БНО ИЯИ РАН предоставляет возможность осуществлять поиск нестандартных свойств нейтрино с использованием различных источников нейтрино и антинейтрино.

В рамках подготовки условий для выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино в 2014 году продолжались работы по модернизации химико-технологического комплекса ГГНТ и завершены работы по сооружению специальной

облучательной установки для исследования осцилляционных свойств нейтрино на очень коротких расстояниях.

Облучательная установка состоит из двух концентрических емкостей с цилиндрическим каналом для размещения источника в центре мишеней. Внутренняя зона представляет собой сферическую емкость радиусом 660 мм, которая вмещает 7,5 тонн галлия. Внешняя зона выполнена в виде цилиндра с выпуклым эллиптическим дном, диаметр и высота которой составляют 2192 мм. Внешняя зона вмещает 42,5 тонны галлия. Геометрические размеры емкостей обеспечивают одинаковую среднюю длину пробега нейтрино в галлиевых мишенях обеих зон, $\langle L \rangle$ 550 мм. На рисунке 1 представлена схема и фото установки в реакторном зале ГГНТ.

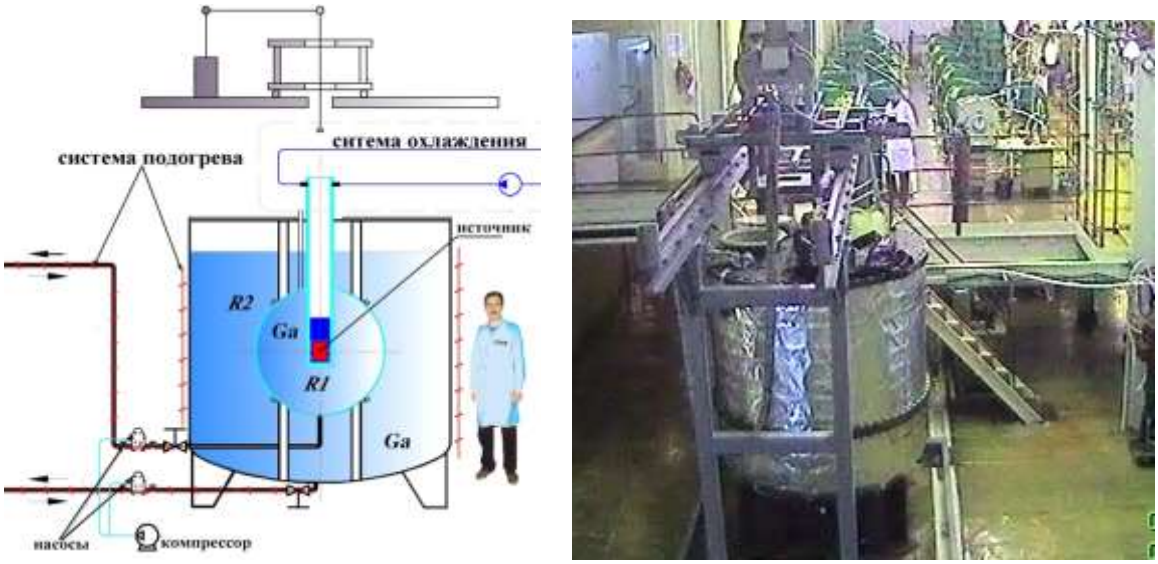


Рисунок 1 – Облучательная установка: слева - схема, справа – фото установки.

Внутренняя поверхность емкостей футерована полипропиленом для исключения контакта галлия и соляной кислоты с материалом стенок и дна емкости. Во внешней емкости предусмотрена система для крепления и фиксации внутренней шарообразной емкости. В обеих емкостях предусмотрен патрубок для закачки/откачки жидкого галлия с необходимой запорной арматурой. Поверхности всех элементов емкостей, контактирующие с галлием, также выполнены с футеровкой полипропиленом. Для поддержания температуры жидкого галлия не ниже 35°С предусмотрен электрический обогрев емкостей. Транспортировку галлия в установку обеспечивает система трубопроводов. Заполнение емкостей производится синхронно для предотвращения возникновения выталкивающей нагрузки на сферическую емкость, что обеспечивается регулировкой подачи насосов и установленными в обеих емкостях уровнемерами

В рамках развития научной программы исследований на ГГНТ планируется детальная разработка существующего предложения эксперимента BEST [6] с источником ^{51}Cr активностью 3 МКи и нового предложения эксперимента BEST-2 с источником ^{65}Zn на галлиевой мишени. Также планируется разработка предложения экспериментов с источниками антинейтрино для поиска майорановой природы нейтрино.

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

13.2.1 Создание методики изготовления стартовой мишени из обогащенного хрома

Исследованы возможности и созданы методики для изготовления мишеней из компактного металлического хрома, обогащенного до 97% по изотопу Cr-50. Обогащение хрома до 97% содержания изотопа Cr-50 проводится методом газового центрифугирования летучего соединения хрома – фтористого хромила CrO_2F_2. После обогащения фтористый хромил гидролизуется с получением хромового ангидрида, из которого путем электролитического восстановления нарабатывается порошок металлического обогащенного хрома. Из порошка методом горячего изостатического прессования в специально изготовленных капсулах получают компактные заготовки из металлического хрома. Капсула должна обеспечивать устойчивое формоизменение в процессе горячей изостатической деформации, сохранять герметичность при высоких температурах и давлениях, гарантировать достижения 100%-ной плотности прессуемого материала и сохранение заданных геометрических размеров заготовки. Для получения хромовых стержней длиной 95 мм с сечением в виде правильного шестиугольника (диаметр описанной окружности 9.3 – 0.02 мм) и шероховатостью поверхности Ra = 0,4 мкм полученные хромовые заготовки подвергают электроэрозионной резке с минимальными отходами от исходной заготовки (потери хрома-50). Для обеспечения минимальных потерь исходного материала разработана специальная траектория движения проволоки при помощи программы Creo Parametric 2.0, позволяющая программировать оптимальную траекторию движения ЭИ. Описанным методом было изготовлено несколько пробных деталей (см. рисунок 2) и выбран оптимальный межэлектродный зазор между ЭИ и заготовкой для обеспечения заявленной точности.

Рисунок 2 – Пробные детали.

В процессе выполнения работ соблюдается требование минимизирования загрязнения исходного материала посторонними примесями. По результатам выполненных НИР оформлен итоговый отчет «Разработка технологии безотходной электроэрозионной вырезки металлических хромовых заготовок».

13.2.2 Создание независимых инструментов измерения активности высокоинтенсивных нейтринных источников на основе радионуклида 51Cr с точностью порядка 1%.

В экспериментах по исследованию нестандартных свойств нейтрино с использованием высокоинтенсивных искусственных нейтринных источников требуется высокая точность определения их активности. В рамках НИР создана калориметрическая система для измерения активности высокоинтенсивных (несколько МКи) источников нейтрино на основе ^{51}Cr с точностью порядка 0.5-1%. Поскольку требуется измерять тепловыделение интенсивностью в сотни ватт, была выбрана схема проточного лабиринтного калориметра, обеспечивающая отвод всего выделяемого тепла теплоносителем. При этом при постоянном расходе разность температуры теплоносителя на выходе и на входе в калориметр прямо пропорциональна тепловыделению. В качестве теплоносителя используется деионизованная вода. Для измерения входной и выходной температуры теплоносителя использовались платиновые термометры сопротивления с погрешностью ≤ 0.002°К. Постоянный расход теплоносителя через теплообменник обеспечивается прецизионным шестеренчатым насосом и измеряется кориолисовым массовым расходомером с ошибкой измерения ±0.05%. Стабилизация входной температуры теплоносителя осуществлялась охлаждающим термостатом с точностью поддержания температуры теплоносителя ±0.01°К.

С использованием электроподогреваемого теплового имитатора с размерами предполагаемого источника нейтрино была выполнена калибровка калориметрической системы. Результаты калибровки калориметрической системы показали, что в диапазоне тепловой мощности источника 150 - 700 Вт ошибка измерений тепловыделения составляет менее 0.5%, а при значениях 270 - 700 Вт менее 0.25%.

По результатам работы подготовлена статья в журнал «Ядерная физика и инжиниринг».

Для измерения интенсивности источника по его γ излучению были вычислены функций отклика для германиевого ППД в диапазоне внутреннего тормозного излучения ^{51}Cr и ожидаемых примесей и подготовлен к измерениям коаксиальный ППД GEM20P4-70. Функции отклика были вычислены методом Монте-Карло для виртуального германиевого детектора с цилиндрическим кристаллом диаметром 8 см с осевым отверстием диаметром 6 см в диапазоне энергий фотонов от 150 до 2750 кэВ. Результаты проверки ППД GEM20P4-70 показали, что его характеристики достаточны для проведения необходимых измерений с точностью не хуже 1%: эффективность по линии ^{60}Co составляет 24%, для фотонов, проходящих через коллиматор; кристалл оказался более чем в два раза эффективнее кристалла виртуального детектора, геометрия которого была использована для оценок функций отклика методами Монте-Карло; разрешение γ-линий в измеряемом диапазоне энергий (от 0.3 до 3 МэВ) составляет менее 2 кэВ при том, что для решения нашей задачи достаточным является разрешение не превышающее 5 кэВ во всём диапазоне энергий, позволяющее пренебречь перекрытиями выделяемых энергетических интервалов.

По результатам работы подготовлена статья в журнал «Ядерная физика и инжиниринг».

13 Заключение

Поставленные задачи в рамках НИР 2014 выполнены в полном объеме.

13 Публикации

1. В. Гаврин, Баксанский эксперимент по поиску стерильных нейтрино (проект BEST), устный доклад на XII Марковских чтениях 14 мая 2014, Москва.
2. В.Н. Гаврин, Солнечные нейтрино в экспериментах SAGE и Borexino, доклад Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий". М.: НИЯУ МИФИ, 2014. с.77.
3. Е.П. Веретенкин, В.Н. Гаврин, Ю.П. Козлова, И.Н. Мирмов, Измерение активности высокоинтенсивных источников нейтрино калориметрическим методом, доклад на

Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий". М.: НИЯУ МИФИ, 2014. с.77.

4. В.В. Горбачев, В.Н. Гаврин, Т.В. Ибрагимова, А.В. Калихов, Ю.М. Малышкин, А.А. Шихин, Измерение активности нейтринного источника ^{51}Cr по спектру гамма-излучения, доклад на Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий". М.: НИЯУ МИФИ, 2014. с.78.
5. V. Gavrin, B. Cleveland, S. Danshin, S. Elliott, V. Gorbachev, T. Ibragimova, A. Kalikhov, T. Knodel, Yu. Kozlova, Yu. Malyshkin, V. Matveev, I. Mirmov, J. Nico, R.G.H. Robertson, A. Shikhin, D. Sinclair, E. Veretenkin, and J. Wilkerson, Current status of SAGE new project with ^{51}Cr neutrino source Physics of Particles and Nuclei 2015 Vol. 46 No. 2 pp.131-13
6. Внутренний итоговый отчет «Разработка технологии безотходной электроэрозионной вырезки металлических хромовых заготовок».

13 Список использованных источников

1. J.N. Abdurashitov (SAGE Collaboration) et al., Phys. Rev. C **60** (1999), 055801 [astro-ph/9907113].
2. Davis R Jr, Harmer D S, Hoffman K C *Phys. Rev. Lett*. **20** N21 1205 (1968)
3. J.N. Abdurashitov (SAGE Collaboration) et al., *Phys. Rev. C* **80** 015807 (2009); arXiv/0901.2200v3
4. Borexino Collaboration, Nature 512 383 (2014)
5. Abazajian K.N., Acero M.A., Agarwalla S.R, et al., Light Sterile Neutrinos: A White Paper, arXiv:1204.5379v1[hep-ph]
6. V. Gavrin, B. Cleveland, S. Danshin, S. Elliott, V. Gorbachev, T. Ibragimova, A. Kalikhov, T. Knodel, Yu. Kozlova, Yu. Malyshkin, V. Matveev, I. Mirmov, J. Nico, R.G.H. Robertson, A. Shikhin, D. Sinclair, E. Veretenkin, and J. Wilkerson, Physics of Particles and Nuclei 2015 Vol. 46 No. 2 pp.131-137
7. J.N. Abdurashitov, V.N. Gavrin, S.V. Girin, V.V. Gorbachev, T.V. Ibragimova, et.al. (SAGE Collaboration), Phys. Rev. C 1999 v. 59 p. 2246
8. Abdurashitov J. N., Gavrin V. N., Girin S. V., et. al. (SAGE Collaboration), Phys. Rev. C 2006 v.73 p. 045805
9. Hampel W., Heusser G., Kiko J., et. al., Phys. Lett. B 1998 v. 420 pp.114-126

14 Лаборатория подземного сцинтилляционного телескопа

Руководитель работ д.ф.-м.н. В.Б.Петков.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Разработка и создание нейтринных телескопов в низкофоновых подземных лабораториях и глубоко под водой для исследования природных потоков нейтрино и других элементарных частиц.

Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ.

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп.

Поддержание работоспособности установок БПСТ, “Ковёр-2” и “Андырчи”, проведение набора информации по всем решаемым на установках физическим задачам

14 Реферат

В отчёте приведены результаты научных исследований по теме “Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ” за 2014 год. В 2014 году по данной теме было запланировано выполнение следующих работ: проведение поиска нейтринных всплесков от коллапсирующих звёзд на БПСТ; разработка проекта, принципиальных схем и печатных плат годоскопа импульсного канала (ГИК) БПСТ; разработка принципиальных схем и печатных плат блока формирования ливневого мастера для мюонного детектора установки “Ковёр-3”. Все запланированные работы выполнены, полученные результаты обсуждаются в отчёте.

14 Введение

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН имеется уникальный комплекс экспериментальных установок (Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, расположенная над ним ливневая установка “Андырчи” и комплексная ливневая установка “Ковер-2”), на которых в течение многих лет проводятся исследования в области фундаментальных исследований, получившей название “космомикрофизика” (в англоязычной литературе – “Astroparticle Physics”). Для выполнения исследований в данной области необходимо обеспечить режим непрерывного набора информации на комплексе установок, для чего, в свою очередь, необходимо постоянно поддерживать работоспособность установок и проводить их модернизацию. В течение 2014 года поддерживался режим непрерывного набора информации на установках комплекса, проводился мониторинг потоков частиц

космического излучения. Продолжались работы по созданию установки “Ковер-3” (разработка принципиальных схем и печатных плат блока формирования ливневого мастера для мюонного детектора установки “Ковёр-3”) и по разработке проекта модернизации БПСТ (разработка проекта, принципиальных схем и печатных плат годоскопа импульсного канала БПСТ).

На БПСТ проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, получено новое ограничение на частоту вспышек с коллапсом ядра в Галактике. Т.к. совместный анализ данных установок, работающих в режиме поиска нейтринных всплесков, позволит с большей чувствительностью проводить поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд и повысить достоверность зарегистрированных нейтринных сигналов, была разработана методика и проведён совместный анализ данных установок БПСТ и LVD по программе поиска нейтринных всплесков.

14.1 Поиск нейтринных всплесков от коллапсирующих звёзд

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. Полное время работы установки в 2014 году составило 94.3% от календарного времени. За отчетный период было отремонтированы делители напряжения и/или формирователи импульсного сигнала на 155 сцинтилляционных счетчиках, произведена подстройка коэффициентов усиления и порогов формирователя импульсного сигнала на 234 счетчиках. В 2014 году были заменены 4 ФЭУ и 1(один) контейнер для сцинтиллятора. Проводились работы по поддержанию работоспособности системы сбора информации БПСТ, в том числе ремонт: счетчика числа срабатываний ГАК (КАМАК), основной кассеты ГАК, адаптера AT/PC – КАМАК, блока выработки начальных интервалов и блока запуска абсолютного времени. Произведен ремонт и контрольная настройка 4-х дискриминаторов с временной привязкой КФ-2.

По информации БПСТ за 2014 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд. БПСТ состоит из 8 плоскостей, на которых расположены 3184 сцинтилляционных счетчика. Каждый счетчик имеет размеры 0.7*0.7*0.3 м^3 и заполнен жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита (C_nH_{2n+2}, $n \approx 9$), порог срабатывания счётчика 8 МэВ. В качестве мишени используются 3 нижние горизонтальные плоскости БПСТ, которые содержат 1200 счетчиков (по 400 на каждой плоскости) общей массой 130 тонн. Фоновый темп счета событий, когда срабатывает только один счетчик на установке ("1 из 3200"), на этих плоскостях равен 0.02 с$^{-1}$. Метод регистрации нейтринного излучения основан на регистрации антинейтрино в реакции обратного бета-распада:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \qquad (1)$$

Т.к. средняя энергия позитрона ≈15 МэВ, то реакция (1), как правило, будет приводить к срабатыванию только одного счетчика на установке. Ожидаемое событие от коллапса звезды должно выглядеть в установке как серия одиночных срабатываний счетчиков (событие "1 из 3200" на БПСТ) в течение времени нейтринной вспышки (предполагаемая длительность которой составляет 10-20 секунд). Поэтому для поиска нейтринной вспышки от коллапсирующей звезды используется метод поиска временного кластера одиночных срабатываний счетчиков в установке.

Чистое время набора по задаче поиска нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд за 2014 год составляет 27492654 секунд (318.2 суток, т.е. 87.2% от календарного времени). Претендентов на кластер нейтринных сигналов от коллапсирующих звёзд не обнаружено. Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2014 года составило 29.76 года. Верхняя граница на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике равна 0.077 в год на 90% доверительном уровне.

По программе поиска нейтринных всплесков проведён совместный анализ данных БПСТ и LVD по информации за 2012 год. Чистое время, когда имелись данные с обеих установок, составляет 7967 часов (330 суток). Анализ полученных распределений по кратности кластера на БПСТ и LVD указывает на то, что зарегистрированные кластеры событий являются фоновыми. Представленный анализ данных двух и более установок может быть особенно полезным в случаях, когда оптическая вспышка Сверхновой по каким-либо причинам не видна.

14.2 Работы по созданию проекта модернизации БПСТ

В 2014 году продолжались работы по созданию проекта модернизации Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа. В рамках выполнения госзадания была проведена разработка проекта, принципиальных схем и печатных плат нового годоскопа импульсного канала (ГИК) БПСТ. Новый годоскоп необходим для замены старого ГИК, который уже выработал свой ресурс. При разработке нового ГИК используется новая элементная база: ПЛИС и LVDS-микросхемы. Конструкция нового ГИК предполагает его размещение в 4-х крейтах КАМАК и использование уже существующей кабельной сети БПСТ. Электрическая функциональная схема нового ГИК приведена на рис.1. Блок, обозначенный как **1_and_2_planes**, предназначенный для сбора информации с первой и второй плоскости телескопа, представлен более подробно.

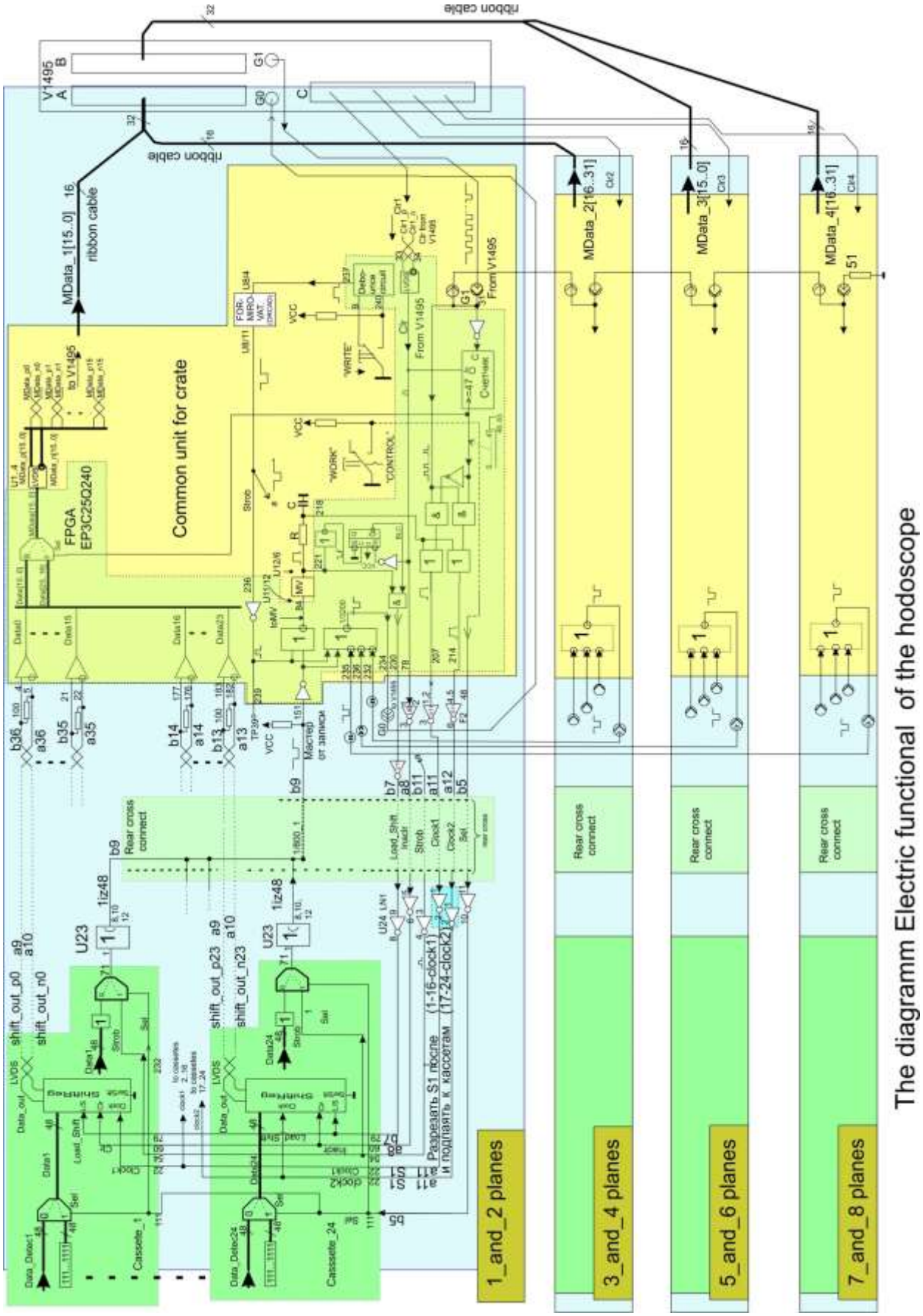


Рис. 1. Схема электрическая функциональная годоскопа импульсных каналов.

Были разработаны принципиальная схема кассеты приема информации с матрицы ГИК и 4-слойная печатная плата для этой кассеты, изготовлена одна кассета приема информации с матрицы ГИК. Для программирования электрической схемы кассеты (содержимое которой хранится в ПЗУ EPCS4 фирмы ALTERA) был изготовлен адаптер на основе программатора BeeProg+ фирмы ELNEC.

Проведена отладка одной входной кассеты ГИК совместно с управляющей кассетой CTRL_UNIT. Для отладки был изготовлен симулятор работы ГИК с входным регистром VME, дающий возможность проверить общую работоспособность кассет. После отладки кассет было подготовлено задание на изготовление в заводских условиях 80 штук входных кассет ГИК и пяти управляющих кассет CTRL_UNIT. Проведён демонтаж семи резервных (неиспользуемых) кассет старого годоскопа, изготовлена лицевая панель кассеты «CTRL_ UNIT», изготовлены 13 лицевых панелей входных кассет.

14.3 Работы по созданию ливневой установки “Ковер-3”

В 2014 году продолжались работы по созданию установки “Ковер-3”, предназначенной для изучения спектра и состава ПКИ в области первичных энергий 50 ТэВ – 10^4 ТэВ. В рамках выполнения госзадания была проведена разработка принципиальных схем и печатных плат блока формирования ливневого мастера для мюонного детектора (МД) установки “Ковёр-3”.

Была закончена настройка основных параметров и доработка логарифмических преобразователей зарядовых импульсов в числоимпульсный код LCN-1. За истекший период настроены 143 преобразователя LCN-1 и 143 дискриминатора с временной привязкой SKF-1, изготовленные для МД в заводских условиях. Общее число необходимых изделий SKF-1 и LCN-1 составляет 420 экземпляров каждого. Принципиальные схемы преобразователя LCN-1 и дискриминатора SKF-1 приведены, соответственно, на рис. 2 и рис. 3.

Разработаны эскизы отдельных конструктивных узлов блока мастеров мюонного детектора на основе стандарта «Вишня». По данным эскизам изготовлена конструкция приемных блоков сигналов дискриминаторов с временной привязкой SKF-1 на базе отдельных крейтов «Вишня», по 205 каналов в каждом. В каждом приемном крейте одна из восьми кассет предназначена для выработки отдельных триггерных импульсов $\geq$ 10 из 205 для каждого тоннеля мюонного детектора по сумме импульсов, формируемых токовыми ключами каждого приемного канала.

Разработана четырехслойная печатная плата приемного блока сигналов SKF-1, откорректирован опытный образец данной платы, изготовленной в промышленных условиях.

Заказано и изготовлено в производственных условиях 14 печатных плат приемного блока сигналов SKF-1 в фирме ООО «ТАБЕРУ».

Разработан и изготовлен 16- канальный имитатор сигналов SKF-2, необходимый для настройки блока формирования триггерных сигналов ≥10 из 205 мюонного детектора. Произведен планарный монтаж и предварительная настройка 7 плат (из 14) приемного блока сигналов SKF-1 на 205 каналов, отдельно от блока выработки триггера. Изготовлено 2 блока выработки триггерных импульсов 10 ≥ 205 для мюонного детектора.

Произведен планарный монтаж и настройка 7 плат (из 14) двух приемных блоков сигналов SKF-1, предназначенных для формирования параллельных сигналов в стандарте ЭСЛ – LVDS и выработки триггерного сигнала ≥ 10 из 205 каналов отдельно для каждого тоннеля мюонного детектора. Функциональная схема одиночного фрагмента приемного блока сигналов SKF-1 приведена на рис.4. Для упрощения на схеме 32-х канального блока изображен только один фрагмент, состоящий из 4х каналов формирования сигналов ЭСЛ – LVDS и токовых ключей, необходимых для суммирования токовых сигналов SKF-1 с целью выработки триггерного импульса по всем 205 каналам, конструктивно сосредоточенных в семи отдельных узлах устройства.

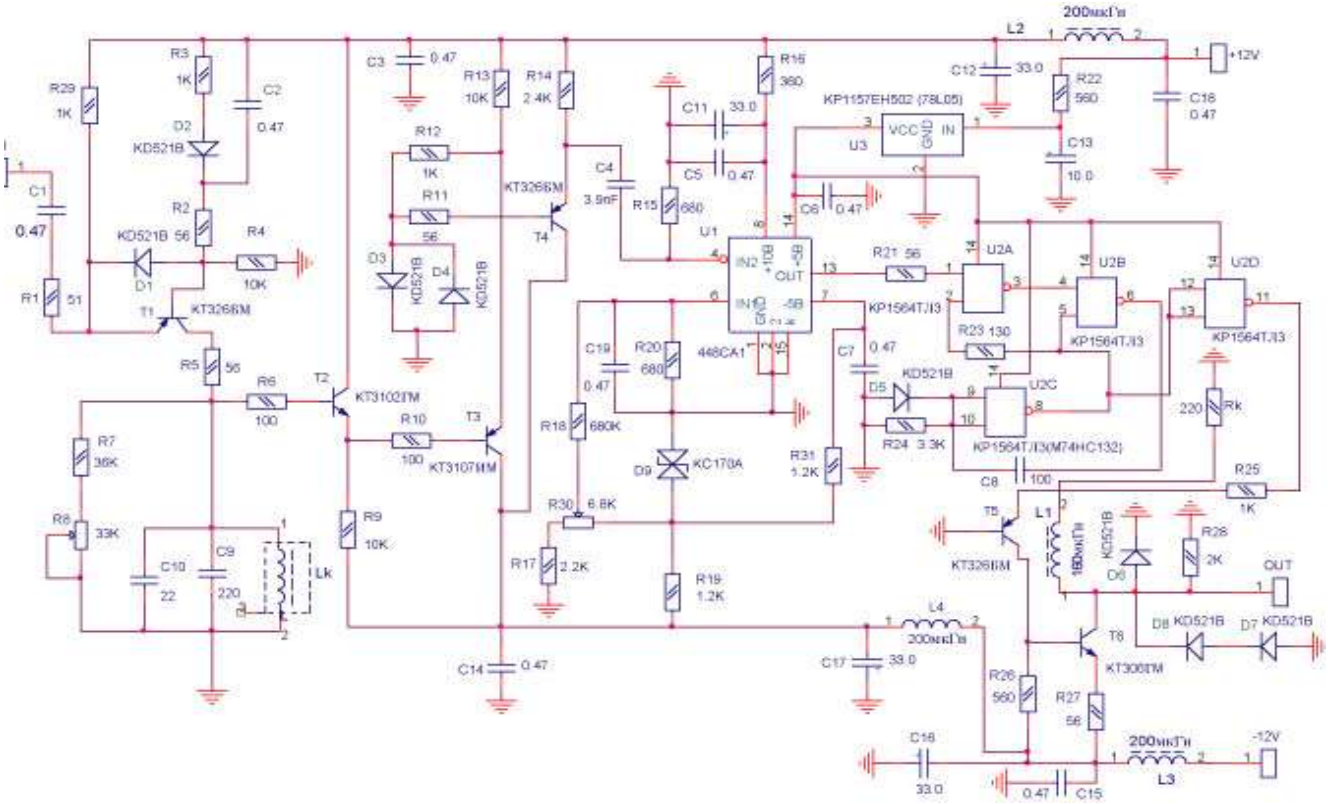


Рис.2. Принципиальная электрическая схема логарифмического преобразователя LCN-1.

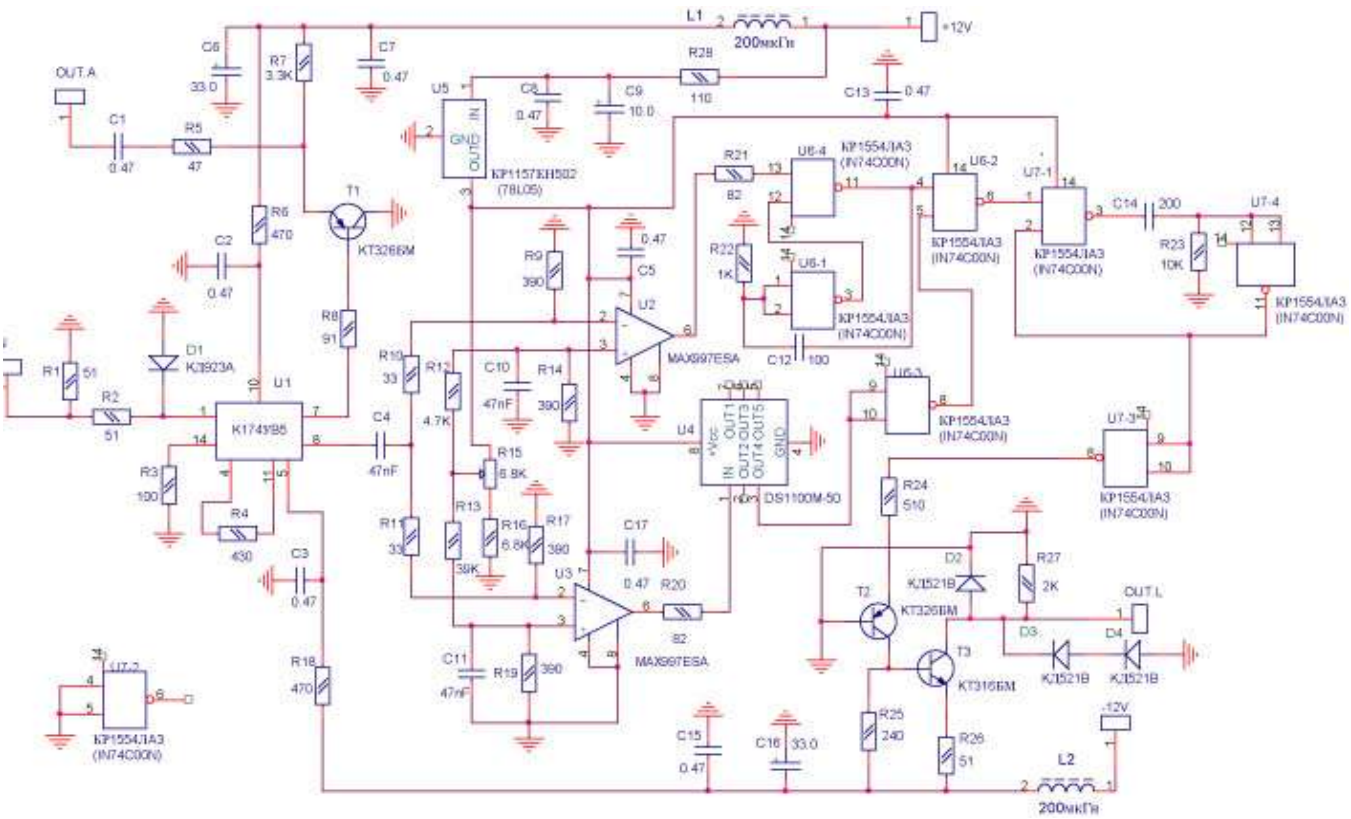


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема дискриминатора SKF-1.

Разработана печатная плата схемы суммирования сигналов формирователей SKF-1 для выработки триггерного импульса ≥ 10 из 205 мюонного детектора. Изготовлено два экземпляра формирователей триггерных импульсов ≥ 10 из 205 для каждого тоннеля мюонного детектора.

Функциональная схема приемного модуля сигналов SKF-1 на 32 канала.

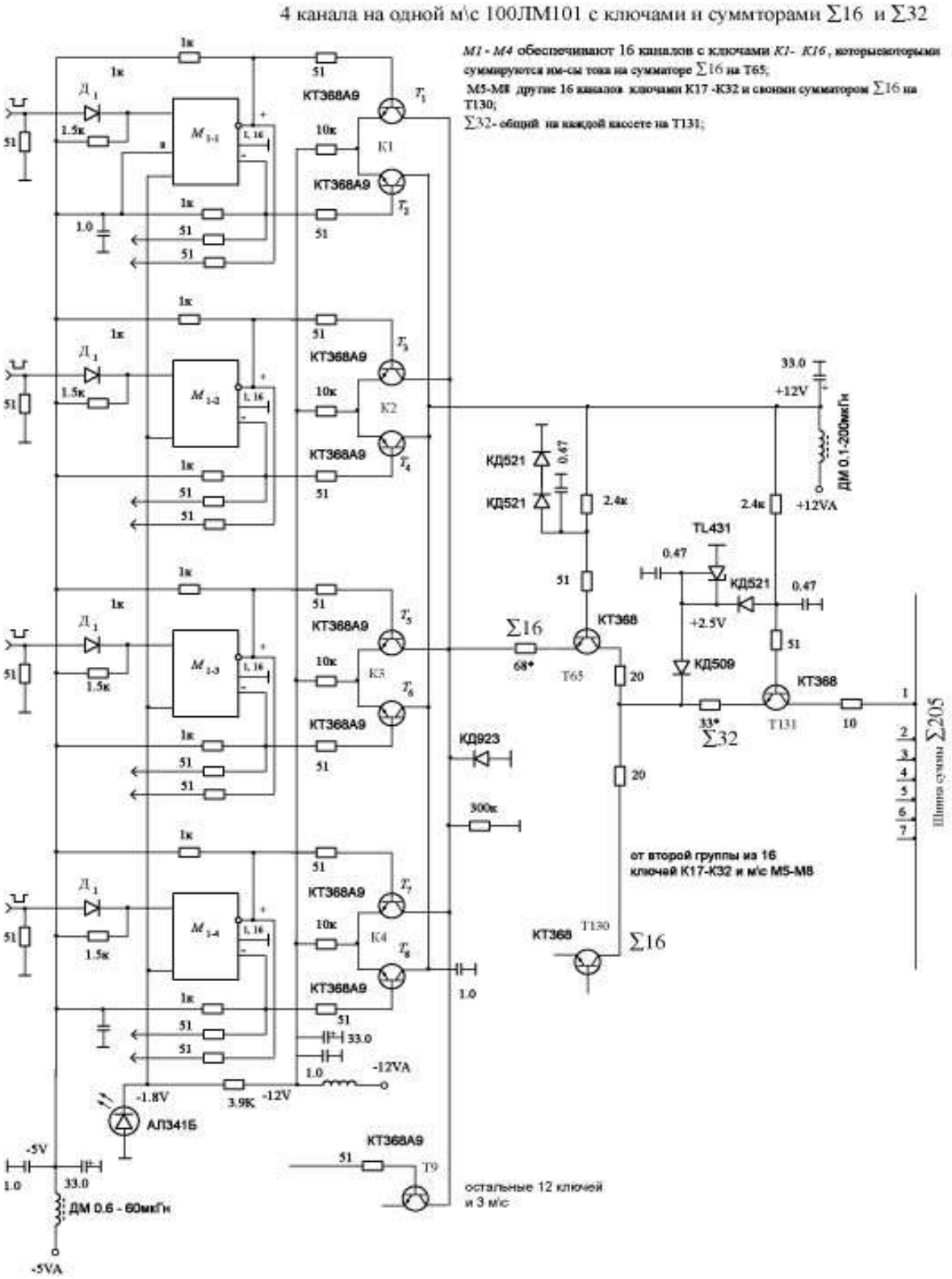


Рис.4. Функциональная схема одиночного фрагмента приемного блока сигналов SKF-1.

14 Заключение

В течение 2014 года на установках комплекса БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации всем физическим задачам и проводился мониторинг потоков частиц космического излучения. Проводились обработка и анализ экспериментальных данных, полученных на установках. Продолжается набор информации по программе регистрации нейтринных всплесков, получено новое ограничение на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике. Разработана методика и проведён совместный анализ данных двух установок ИЯИ РАН – БПСТ и LVD – по программе поиска нейтринных всплесков.

Проводились работы по модернизации установок. Следует заметить, что из средств, выделенных на выполнение госзадания (зарплата и содержание инфраструктуры), проводилась лишь разработка проектов, принципиальных схем и печатных плат, и настройка электронных блоков силами сотрудников лаборатории. На изготовление печатных плат, приобретение приборов и материалов (в т.ч. радиокомпонент) использовались средства из других источников финансирования.

14 Публикации

Статья:

1. Д.Д. Джаппуев, В.И. Волченко, А.У. Куджаев, О.И. Михайлова,В.Б. Петков, Ю.В. Стенькин. Исследование адронных стволов ШАЛ на установке “Ковер-2”. Известия РАН. сер. физ., т. 78, № 3, с. 330–332, 2014.

Доклады на конференциях:

1. V.B. Petkov, M.M. Boliev. The search for high energy muon neutrinos from southern hemisphere Gamma-Ray Bursts with BUST. International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics", Valdai, Russia, January 27 - February 1, 2014

2. V.B. Petkov. Experimental search for evaporating primordial black holes. International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics", Valdai, Russia, January 27 - February 1, 2014.

3. M.M. Kochkarov. Search for low-energy neutrino from the gamma-ray bursts on the Baksan Underground Scintillation Telescope. International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics", Valdai, Russia, January 27 - February 1, 2014.

4. В.Б. Петков. Баксанская нейтринная обсерватория. Современное состояние и перспективы. 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 11 - 15 августа, г. Дубна.

5. М.М. Болиев. Поиск локальных источников нейтрино на БПСТ. 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 11 - 15 августа, г. Дубна.

6. М.М. Кочкаров. Наработка изотопа ^{12}B нейтронами в сцинтилляторе БПСТ и поток нейтронов на глубине 850 г/см^2. 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 11 - 15 августа, г. Дубна.

7. Д.Д. Джаппуев. Установка “Ковер-3” для изучения области излома в спектре ПКИ. 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 11 - 15 августа, г. Дубна.

8. Д.Д. Джаппуев, А.У. Куджаев. Моделирование эксперимента по изучению спектра и состава ПКИ на установке "Ковер-3". 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 11 - 15 августа, г. Дубна.

9. Р.В. Новосельцева. Первые результаты поиска нейтринных всплесков по совместным данным БПСТ и LVD. 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 11 - 15 августа, г. Дубна.

10. М.М. Кочкаров. Измерение потока нейтронов в скальном грунте на глубине 850 гг/см^2 по наработке изотопа ^{12}B в сцинтилляторе БПСТ. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», 17 - 21 ноября 2014 г., Москва.

15 Лаборатория низкофоновых исследований

Руководитель работ к.ф.-м.н. А.М.Гангапшев.

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Изучение вариаций потока тепловых нейтронов природного происхождения в подземной лаборатории с помощью детекторов на основе тонкого сцинтиллятора из ZnS(Ag) с добавками 6LiF.

Поиск солнечных адронных аксионов.

Новый этап эксперимента по поиску 2К-захвата в 124Хе. Руководитель работ д.ф.-м.н. В.В.Кузьминов.

Создание воздушной ионной камеры высокого давления (ИКВД) для измерения содержания 222Rn в подземных условиях.

Участие в международном эксперименте AMORE по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа 100Mo. Руководитель работ к.ф.-м.н. В.В.Казалов.

Экспериментальная проверка стабильности периода полураспада альфа-активного ядра 214Po. Руководитель работ д.ф.-м.н. Е.Н.Алексеев.

Разработка проекта создания большого сцинтилляционного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Руководитель работ д.ф.-м.н. В.В.Синёв.

Низкофоновые эксперименты в БНО. Руководитель работ д.ф.-м.н. В.В.Кузьминов.

ОГРАН – Опто-акустическая ГРавитационная АНтенна для поиска и исследования гравитационных волн и слабых сейсмических процессов. Руководитель работ проф. В.Н.Руденко.

Исследование нейтринных осцилляций в потоках нейтрино от реакторов. Руководитель работ д.ф.-м.н. В.В.Синёв.

15 Основные результаты

15.1 Участие в международном эксперименте GERDA по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа 76Ge

Находясь в командировке сотрудники лаборатории на установке GERDA в Гран-Сассо (Италия) выполнили измерения чистоты аргона в криостате GERDA и скорости эманации газов из высоковольтных и низковольтных кабелей внутри герметичной системы монтажа и манипулирования положением детекторов. Выявлено существенное снижение эманации из кабелей после серии откачивания и заполнения системы чистым аргоном из криостата с подогревом. Участвовали в сборке новой системы фиксации фотоумножителей и оптических волокон для второй фазы эксперимента (LAr-instrumentation), а так же в работах по механическим и температурным тестам системы.

15.1 Публикации

1. M. Agostini, M. Allardt, E. Andreotti et al., «The background in the 0νββ experiment Gerda», European Physical Journal C (2014) 74:2764

2. M. Agostini, M. Allardt, E. Andreotti, et al., “Production, characterization and operation of ^{76}Ge enriched BEGe detectors in GERDA”, arXiv:1410.0853v1 [nucl-det].

15.2 Новый этап эксперимента по поиску 2K-захвата в 78Kr и 124Xe с помощью пропорциональных счётчиков

После окончания измерений при давлении 1.1ат, было произведено объединение имеющегося образца с частью (40 л) нового образца объемом 58 л., содержащим 4,3 л (23,96 гр.) Xe-124 и 15,24 л (85,7 гр.) Xe-126. В результате был получен образец объемом 52 л содержащий: Xe-124 — 10,578 л, Xe-126 — 14,122 л. Данным образцом ксенона был заполнен счетчик установки «Криптон» до давления 4,925 атт. – 51,07 л. Начаты долговременные измерения по поиску 2K-захвата Xe-124. На данный момент набрана статистика за 1800 часов живого времени измерений. В искомом интервале за данное время мы имеем 0 событий, что дает нам предел на период полураспада Xe-124 относительно 2K-захвата на уровне T1/2□3,4□1021 лет (90% У.Д.).

15.2 Публикации

1. Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov et al., «First result of the experimental search for the 2K-capture of Xe-124 with the copper proportional counter», arXiv:1404.5530v1 [nucl-ex].

2. Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, D.A. Tekueva, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, S.P. Yakimenko. “First results of the experimental search for the 2K–

capture of 124Xe with the copper proportional counter". The talk given at the Workshop on Prospects of Particle Physics 2014 "Neutrino Physics and Astrophysics", January 26 - Ferbuary 2, 2014, Valday, Russia. arXiv: 1404.5530v1 [nucle-ex] 22 Apr 2014.

3. Ю.М.Гаврилюк, А.М.Гангапшев, В.В.Казалов, В.В.Кузьминов, С.И.Панасенко, С.С.Раткевич, Д.А. Текуева, С.П.Якименко. «Методика поиска 2К-захвата Хе-124 с помощью медного пропорционального счетчика». Доклад на Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» - 2014. Москва, 17-21 ноября 2014 г.

15.3 Создание воздушной ионной камеры высокого давления (ИКВД) для измерения содержания 222Rn в подземных условиях

Завершены измерения зависимости от напряжения амплитуды выходного сигнала предусилителя и разрешения α-линии 5.49 МэВ от распада 222Rn. При давлении 620 мм рт. ст. при напряжении 2000 В достигнуто разрешение 1.5 %, уникальное для детекторов такого типа.

Подготовлена оснастка и проведены измерения зависимости амплитуды импульсов и разрешения от давления воздуха, используемого в качестве рабочего газа. Проведены измерения при давлении воздуха до ~3 атм. Результаты обрабатываются.

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

Выполнена повторная калибровка детекторов с помощью источника нейтронов, которая показала, что отклик детекторов на нейтроны в течение ~1 года не изменился. Выявлено, что во время выключения вентилляции в штольне, влажность воздуха в лаборатории повышается с ~50% до 90%, в то же время повышается темп счета детекторов на ~70ч$^{-1}$ (~7% с учетом собственного фона детекторов). Второй этап измерений продолжается, набрана статистика за ~10000 часов измерений. Параллельно ведется обработка данных.

15.5 В рамках участия в международном эксперименте AMORE по поиску безнейтринного двойного бета-распада изотопа 100Mo

По программе были произведены измерения радиационной чистоты новой партии образцов от компании ОАО «Фомос-Материалс»:

1. Молибдат кальция измельченный $^{40}Ca^{100}MoO_4$. Масса 500гр. Время измерения 830 часов. Получены следующие значения активности природных радиоактивных изотопов: К-40 - $\leq 4{,}9\cdot 10^{-3}$ Бк/кг, Tl-208 - $(3{,}1 \pm 2{,}0)\cdot 10^{-4}$ Бк/кг, Bi-214 (U-238) - $(1{,}4 \pm 0{,}1)^* 10^{-2}$ Бк/кг, Ac-228 – $\leq 1{,}2\cdot 10^{-3}$ Бк/кг;

2. Шихта молибдата кальция $^{40}Ca^{100}MoO_4$ – порошок белого цвета. Масса 630гр. Время измерения составило 830 часов. Получены следующие значения активности природных радиоактивных изотопов: К-40 - ≤4,9·10^{-3} Бк/кг, Tl-208 - (3,1±2,0)·10^{-4} Бк/кг, Bi-214 (U-238) - (1,4±0,1)·10^{-2} Бк/кг, Ac-228 – ≤1,2·10^{-3} Бк/кг;

3. Отходы молибдата кальция №74Б. Масса 552гр. Время измерения 147 часов. Получены следующие значения активности природных радиоактивных изотопов: К-40 - (4,1 ± 0,5)* 10^{-1} Бк/кг, Tl-208 - (4,1 ± 1,9)* 10^{-3} Бк/кг, Bi-214 (U-238) - (2,6 ± 0,1)* 10^{-1} Бк/кг, Ac-228 – (2,3 ± 0,8)* 10^{-2} Бк/кг;

4. О**тходы молибдата кальция №72Б.** Масса 614гр. Время измерения 334 часов. Получены следующие значения активности природных радиоактивных изотопов: К-40 - ≤0,20 ± 0,01 Бк/кг, Tl-208 - (5,4 ± 3,4)* 10^{-4} Бк/кг, Bi-214 (U-238) - (5,1 ± 0,2)* 10^{-2} Бк/кг, Ac-228 – ≤3,4· 10^{-3} Бк/кг;

5. О**тходы молибдата кальция 81СС.** Масса 667гр. Время измерения 1247 часов. Получены следующие значения активности природных радиоактивных изотопов: К-40 - ≤2,7* 10^{-2} Бк/кг, Tl-208 - ≤2,9* 10^{-3} Бк/кг, Bi-214 (U-238) - ≤5,0* 10^{-3} Бк/кг, Ac-228 – ≤6,2* 10^{-3} Бк/кг;

6. О**тходы молибдата кальция №72Б.** Масса 635гр. Время измерения 236 часов. Получены следующие значения активности природных радиоактивных изотопов: К-40 - ≤0,52 ± 0,03 Бк/кг, Tl-208 - ≤(4,7 ± 1,6)* 10^{-3} Бк/кг, Bi-214 (U-238) - 0,235 ± 0,008 Бк/кг, Ac-228 – ≤(1,6 ± 0,4)* 10^{-2} Бк/кг;

7. Измельченные обрезки из тигельных остатков №79Б. Масса 568гр. Время измерения 724 часов. Получены следующие значения активности природных радиоактивных изотопов: К-40 - ≤(1,0 ± 0,5)* 10^{-2} Бк/кг, Tl-208 - ≤4,1· 10^{-4} Бк/кг, Bi-214 (U-238) - (1,6 ± 0,2)* 10^{-2} Бк/кг, Ac-228 – ≤ (2,4 ± 1,0)* 10^{-3} Бк/кг;

8. Шихта молибдата кальция $^{40}Ca^{100}MoO_4$ – порошок белого цвета. Масса 500гр. Время измерения составило 354,41 часа. Получены следующие значения активности природных радиоактивных изотопов: К-40 - ≤4,9* 10^{-2} Бк/кг, Tl-208 - ≤5,9* 10^{-3} Бк/кг, Bi-214 (U-238) - ≤8,9* 10^{-3} Бк/кг, Ac-228 – ≤1,3* 10^{-2} Бк/кг;

9. Пестик и ступка. Сталь 37Х12Н8Г8МФБ. Предназначение – помол промежуточных кристаллов $^{40}Ca^{100}MoO_4$ и отходов от кристаллов. Масса 2649+1021 гр. Время измерения составило 215 часов. К-40 - ≤5,2· 10^{-3} Бк/кг, Tl-208 - (1,6 ± 0,5)* 10^{-3} Бк/кг, Bi-214 (U-238) - (1,6 ± 1,0)* 10^{-3} Бк/кг, Ac-228 – (2,5 ± 1,1)* 10^{-3} Бк/кг;

От компании «Электрохимприбор» :

1. Карбонат кальция $^{40}CaCO_3$. - порошок белого цвета. Масса 500 гр. Время измерения составило 600 часов. К-40 - ≤3,9·10^{-2} Бк/кг, Tl-208 - ≤4,8·10^{-3} Бк/кг, Bi-214 (U-238) - (4,4±0,6)·10^{-2} Бк/кг, Ac-228 – ≤1,0·10^{-2} Бк/кг;

2. Карбонат кальция $^{40}CaCO_3$. - порошок белого цвета. Масса 626 гр. Время измерения составило 745,11часов. К-40 - ≤4,8· 10^{-3} Бк/кг, Tl-208 - (5,1 ± 3,1)* 10^{-4} Бк/кг, Bi-214 (U-238) - (7,3 ± 1,0)* 10^{-3} Бк/кг, Ac-228 – (1,9 ± 0,7)* 10^{-3} Бк/кг;

15.5 Публикации

O.A. Busanov, R.A. Etezov, Yu.M. Gavriljuk et al., "**Background radioactivity of construction materials, raw substance and ready-made CaMoO4 crystals**", EPJ Web of Conferences, Volume 65, 2014, RPSCINT 2013 – International Workshop on Radiopure Scintillators.

15.6 Экспериментальная проверка стабильности периода полураспада альфа-активного ядра 214Po

Обработаны результаты непрерывных измерений периода полураспада ^{214}Po (τ) на установках ТАУ-1 и ТАУ-2 за 480 дней. По данным установки ТАУ-1 проведён анализ вклада различных источников систематических ошибок, влияющих на величину τ. В ряду значений τ с установки ТАУ-2 обнаружены годовая вариация с амплитудой A= (6.9±2.3)·10^{-4} и солнечно-суточная вариация с амплитудой A_1= (9.8±0.8)·10^{-4} неизвестного происхождения. Усреднённое за 480 дней новое высокоточное справочное значение периода полураспада ^{214}Po составило величину τ = 163.42±0.06 мкс.

В установке ТАУ-1 проведена замена центрального полупроводникового детектора на сцинтилляционный, аналогичный детектору в установке ТАУ-2. Продолжается набор статистики.

15.6 Публикации

1. E.N. Alexeyev, Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev et al., «Sources of the systematic errors in measurements of Po-214 decay half-life time variations at the Baksan deep underground experiments», arXiv:1404.5769v1 [nucl-ex].

2. E.N.Alexeev, Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich. "Sources of the systematic errors of 214Po half-life measurements."

3. The talk given at the Workshop on Prospects of Particle Physics 2014 "Neutrino Physics and Astrophysics", January 26 - Ferbuary 2, 2014, Valday, Russia. arXiv: 1404.5769v1 [nucle-ex] 23 Apr 2014.

4. Е.Н.Алексеев, Ю.М.Гаврилюк, А.М.Гангапшев, В.В.Казалов, В.В.Кузьминов, С.И.Панасенко, С.С.Раткевич. «Предварительные результаты поиска суточных и годовых вариаций периода полураспада 214Po». Доклад на Международной сессии-конференции

Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» - 2014. Москва, 17-21 ноября 2014 г.

15.7 Исследование содержания изотопа 14С в жидких органических сцинтилляторах

Собрана установка, с новыми низкофоновыми ФЭУ. Уровень фона в области ~20-~1000кэВ составил ~10 $час^{-1}кг^{-1}$. Измерения продолжаются.

15.8 Поиск солнечных адронных аксионов

Продолжены измерения с естественным криптоном с обогащением по изотопу Kr-83 на уровне 58%. По результатам измерений за 188.3 дней получен предел на массу адронного аксиона на уровне m_a<100эВ.

Приобретено ~7л криптона, обогащенного по изотопу Kr-83 до 99,9%, с оплатой из средств гранта РФФИ №14-02-00258. Дополнительно приобретено еще ~13л такого же криптона, с оплатой из буджетных средств. Готовится публикация в реферируемом журнале.

15.8 Публикации

1. Yu.M. Gavrilyuka, A.M. Gangapsheva, A.V. Derbinb et al., «First result of the experimental search for the 9.4 keV solar axion reactions with Kr-83 in the copper proportional counter1», arXiv:1404.1271v1 [nucl-ex].

2. Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, D.A. Tekueva, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich. “First results of the experimental search for the 9.4 keV solar axions reactions with 83Kr in the copper proportional counter”. The talk given at the Workshop on Prospects of Particle Physics 2014 "Neutrino Physics and Astrophysics", January 26 - Ferbuary 2, 2014, Valday, Russia arXiv: 1405.1271 [nucl-ex] 6 May, 2014.

3. A.V. Derbin, A.M. Gangapshev, Yu.M. Gavrilyuk, V.V. Kazalov, H.J. Kim, Y.D. Kim, V.V. Kobychev, V.V. Kuzminov, Luqman Ali, V.N. Muratova, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, D.A. Semenov, D.A. Tekueva, S.P. Yakimenko, E.V. Unzhakov. “New limit on the mass of 9.4-keV solar axions emitted in an M1 transition in 83Kr nuclei” Proceeding of the 10th Patras Axion-WIMPs 2014

15.9 Двойной К-захват

Разработана методика проведения измерений сечений реакций $^{126}Xe(n,\gamma)^{127}Xe$ и $^{128}Xe(\mu,n)^{127}Xe$ под действием вторичных частиц космических лучей на поверхности Земли. Предварительно имеющийся образец ксенона с высоким содержанием изотопов ^{126}Xe и ^{128}Xe

выдерживается в подземных низкофоновых условиях в течение 4 месяцев для распада ^{127}Xe ($T_{1/2}$=30 сут.), ранее наработанного космическими лучами за время нахождения образца на поверхности Земли. Активность изотопа контролируется измерениями в низкофоновом пропорциональном счётчике. За это время готовится переносная защита образца от тепловых нейтронов (полиэтилен 15 см+Cd 0.15 см). Баллон с образцом помещается в ящик и выносится на поверхность Земли на облучение мюонами к.л. Их поток контролируется. Через 1 мес. облучения измеряется активность образца. После этого образец опять выносится на поверхность, но без доп. защиты. Опять выдерживается 1 мес. и затем измеряется. По разности скоростей счёта с учётом вклада мюонов находится сечение реакции под действием нейтронов.

После выдержки в подземных условиях в течение 4-х месяцев, образец ксенона был установлен в нейтронную защиту и вывезен на поверхность и расположен рядом с установкой «КОВЕР», где точно измеряется поток мюонов. После экспозиции в течение месяца образец был измерен на предмет содержания в нем Xe-127, образованного в результате реакции скалывания мюонами космических лучей. Измеримого количества Xe-127 в образце не обнаружено. Идет обработка данных. Образец был выдержан в подземных условиях в течение 3-х месяцев, затем вынесен на поверхность, в кабинет №404 лаб. корпуса БНО ИЯИ РАН. Для измерения потока нейтронов в помещении, был использован детектор на основе ZnS(Ag) с добавкой ^{6}LiF с измеренной эффективностью регистрации нейтронов. Экспозиция образца продолжается.

15.10 Проблема геофизических нейтрино

Исполнители: И.Р. Барабанов, Г.Я. Новикова, В.В. Синев, Е.А. Янович

15.10 Реферат

Начиная с 2006 г в ИЯИ ведется работа по подготовке технического проекта большого сцинтилляционного детектора (~10 кт) на Баксанской нейтринной станции (БНО) ИЯИ с комплексной программой регистрации нейтрино низких энергий от различных астрофизических источников. Регистрация гео-нейтрино может помочь решить проблему теплового потока Земли и выбора детальной модели строения Земных недр.

На первом этапе работы выбран оптимальный вариант состава сцинтиллятора для детектора, исследованы его основные параметры (световой выход, прозрачность, стабильность к различным конструкционным материалам, методы очистки, возможность получения в больших количествах). Создана математическая модель детектора и исследованы его основные характеристик в зависимости от конструкции и размеров детектора). Успешная работа детектора нейтрино низких энергий возможна только при экстремально низком фоне от внешних и внутренних источников радиации. Исследованию фоновых условий на БНО и разработке методов снижения уровня фона до требуемых уровней является целью данного проекта. В 2014 году начата работа по созданию экспериментальной установки для исследования источников фона сцинтилляционного детектора и методов его снижения. Были разработаны методы очистки сцинтиллятора от наиболее опасных с точки зрения фона радиоактивных элементов (урана, тория, калия) и методы измерения их содержания в сцинтилляторе. Впервые была поставлена задача детального исследования концентрации изотопа 14C (радиоуглерода) в составе сцинтиллятора и получены первые результаты.

15.10 Введение

Одной из основных глобальных экспериментальных задач 21 века является создание сети крупномасштабных (~ десятки кт) сцинтилляционных детекторов, расположенных в подземных лабораториях для решения целого комплекса астрофизических, геофизических и прикладных ядерно-технологических задач. Одной из основных задач таких детекторов будет регистрация (анти)нейтринных потоков из недр Земли (геонейтрино). Точное знание этих потоков позволит дать однозначный ответ на вопрос –являются ли распады радиоактивных элементов единственным источником потока тепла, идущего из недр земли и определить полное количество урана в земных недрах. Помимо этого не исключено существование других экзотических источников геонейтрино, например естественных ядерных реакторов. Решение этого вопрос поможет осуществить выбор детальной модели строения земных недр. Диапазон

исследований включает, измерение параметров нейтринных осцилляций, поиск распада протона (микрофизика), регистрацию нейтрино от сверхновой (на расстоянии до 10 кпс) и нейтринного фона от гравитационных коллапсов, имевших место за всю историю Вселенной (космофизика).

Проектирование и создание подобного детектора в лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории будет являться неотъемлемым и важным звеном, проектируемой в настоящее время, мировой сети подобных детекторов. Детектор позволит регистрировать потоки и измерять спектры нейтрино низких и средних энергий: 1–100 МэВ. Основным элементом сцинтилляционного детектора является жидкий органический сцинтиллятор, который должен удовлетворять новым, более высоким требованиям эксперимента. Требования включают: высокие значения светового выхода и прозрачности, хорошие временные характеристики, низкое содержание примесей радиоактивных элементов, инертность по отношению к конструкционным материалам, возможность производства в больших количествах при низкой стоимости. Необходимо отметить выгодное географическое расположение Баксанской обсерватории (приэльбрусье): удаленность от промышленных ядерных реакторов и возможность глубокого расположения детектора под землей по сравнению с детекторами KamLAND и Борексино и, как следствие меньший, примерно на порядок, фон от мюонов космических лучей.

Эксплуатация детектора в течение нескольких десятков лет, позволит осуществить широкую программу нейтринных исследований наряду с подготовкой высококвалифицированных специалистов. Предполагаемая стоимость такого детектора будет довольно значительна и, в этой связи, будет рассмотрена возможность создания международной коллаборации для реализации проекта. На первом этапе выполнения проекта предлагается разработать общую конструктивную схему детектора, его основных компонентов.

15.10 Основные результаты

Проект создания большого сцинтилляционного детектора на Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) был предложен в 2006-2007 гг. Были отмечены преимущества БНО как лаборатории для расположения детектора - удаленность от действующих реакторов, как источников фона, и существенная глубина лаборатории. В результате начального этапа найден оптимальный вариант состава сцинтиллятора для детектора, исследованы его основные параметры (световой выход, прозрачность, стабильность к различным конструкционным материалам, методы очистки, возможность получения в больших количествах). Создана

математическая модель детектора и исследованы его основные характеристик (число регистрируемых электронов фотодетекторами) в зависимости от конструкции и размеров детектора). Показана возможность регистрации низкоэнергетических нейтринных событий с энергией ~2 МэВ вплоть до массы детектора ~ 10кт. Впервые поставлена задача исследования содержания радиоактивного изотопа 14С в органических растворителях, используемых для создания сцинтиллятора, и разработан проект установки для измерения концентрации 14С в различных органических растворителях. Установка собрана на БНО и начат процесс измерения ее фоновых параметров. Рассчитан ожидаемый эффект от геонейтрино и других астрофизических источников нейтрино низких энергий. Рассчитан эффект от нейтринного потока от распада 40К для различных моделей состава Земли. Группой накоплен значительный опыт работы с жидкими органическими сцинтилляторами в процессе предшествующих работ в проектах LENS, SHOOS и других. В процессе многолетнего опыта исследований разработаны различные методы синтеза, очистки компонентов сцинтилляторов, испытаний стабильности и исследования физико-химических свойств жидких органических сцинтилляторов. Полученные результаты опубликованы в 6-и статьях и представлены на различных международных конференциях,

15.10.1 Расчет фона от реакторов АЭС

Основным источником фона при регистрации геонейтрино являются (анти)нейтрино от реакторов, расположенных в непосредственной близости от установки. Были выделены 22 АЭС, как Российских так и зарубежных, расположенные в непосредственной близости от установки. Вклад в фон при регистрации геонейтрино возникает от реакторных (анти)нейтрино) в области энергий 1,8-3,3 Мэв Рассчитана скорость взаимодействия и суммарный поток нейтрино от всех АЭС в этом энергетическом диапазоне с учетом современных данных по осцилляциям нейтрино для сцинтилляционного детектора на основе ЛАБа . Получены результат :

N=55 год$^{-1}$ для 10 кт ЛАБ или 8,7 TNU

Это значение следует сравнить с ожидаемым потоком геонейтрино ~40 TNU (по данным Борексино . Фон от реакторных нейтрино для детектора на БНО составляет ~0,22 от ожидаемого эффекта. Это существенно ниже по сравнению с действующими в настоящее время детекторами (Борексино ~1. Камленд ~2. В этом состоит одно из основных преимуществ проектируемого на БНО детектора геонейтрино по сравнению с другими аналогичными действующими и проектируемыми детекторами.

15.10.2 Экспериментальная установка

Регистрация редких событий сцинтилляционным детектором предъявляет исключительно высокие требования, как к внешнему, так и внутреннему фону установки. Для исследования фоновых условий в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН была создана экспериментальная сцинтилляционна установка, где поток мюонов составляет ~ 0.1 $м^{-2}$ $час^{-1}$. Для подавления фона от нейтронов и гамма квантов окружающих горных пород пол комнаты, где установлен сцинтилляционный детектор, выполнены последовательно из слоёв полиэтилена (25 см), кадмия (1мм) и свинца (15 см). Установка состоит из сцинтилляционного детектора, представляющего собой кварцевую ячейку, диаметром 100 мм и длиной 200 мм , заполненную образцом жидкого органического сцинтиллятора, двух световодов из органического стекла (ПММА), размером 100*100*300 $мм^3$ и двух фотоумножителей ET9306 (3”). Для увеличения светосбора, кварцевая ячейка и световоды обёрнуты зеркальной отражающей плёнкой VM2000. Силиконовая смазка использовалась для лучшего оптического контакта между кварцевой ячейкой, световодом и ф.э.у. детектор размещён в коробе из орг. стекла (14.5 * 14.5 *120) $см^3$ и окружён со всех сторон защитой из особо чистой меди, толщиной 15 см. . Герметичный чехол из полиэтилена, окружающий детектор снаружи, служил для защиты от радона. Из внутреннего объёма радон удалялся продувкой газообразным азотом. Первый результат измерения фона за 405 часов представлен на рис 1. Скорости счёта событий во всем диапазоне 70 событий в час.

Эта установка предназначена для решения одной из основных задач проекта – измерение концентрации 14C (радиоуглерода) в жидких органических сцинтилляторах.

Из анализа спектра в области энергий E<150 кэВ для концентрации ^{14}C получено значение $^{12}C/^{14}C < 3.7*10^{-17}$

15.10.3 Очистка от радиоактивных примесей

Планируемый крупномасштабный эксперимент для регистрации слабых нейтринных сигналов требует достижения ультранизкого содержания примесей радиоактивных элементов в жидком органическом сцинтилляторе U,Th,K-40 < 10E-15 г/г . Масштаб детекторов нового поколения (10 – 30 кт) делает желательным разработку новых технологических методов ультранизкой очистки от примесей. В данной работе сделан акцент на использование водной экстракции, как основного метода очистки ЛАБа от примесей радиоактивных элементов.

Чтобы продемонстрировать возможности метода водно-экстракционной очистки ЛАБа от примесей U, Th, K были разработаны методики введения этих элементов, в виде устойчивых металлорганических соединений, в состав жидкого органического сцинтиллятора.

15.10.4 Очистка от урана

Для введения в ЛАБ урана и тория использовалась жидкостная экстракция с применением ТОРО (триоктилфосфиноксида) в качестве реагента, образующего с торием и уранил-ионом комплексные соединения, хорошо растворимые в органических растворителях.

Уран использовался в виде соли $UO_2(NO_3)_2$, из которой был приготовлен водный раствор с концентрацией С=0,014моль/л. Уран экстрагировали в ЛАБ с помощью раствора ТОРО в ЛАБе (С=0,02моль/л). Мольное соотношение между ионом UO_2^{+2} и ТОРО брали равным 1:3. Соотношение водной и органической фазы составляло 1:1. Для улучшения условий экстрагирования использовали высаливатель LiCl в количестве, при котором концентрация его в экстрагируемом водном растворе составляла 6 моль /л.

На экстракцию отбирали 10 мл водного раствора $UO_2(NO_3)_2$ (С=0,014 моль/л), 5 мл раствора ТОРО в ЛАБе (С=0,02 моль/л) и 5 мл 12 М раствора LiCL. Экстрагировали 3 мин в делительной воронке. После разделения органической и водной фазы, отбирали на анализ 5 мл органической фазы, из которой в дальнейшем был приготовлен сцинтиллятор PPO (2 г/л), bis-MSB (100 мг/л). Активность урана в пробе ЛАБа (5 мл) – 75 Бк. На рис.1 изображен спектр U-238 от распада альфа частицы с энергией 4.2 МэВ. Анализ водной фазы, которая использовалась для экстракции урана в ЛАБ показал, что эффективность введения урана в ЛАБ с помощью экстракции составила ~ 99 %.

Проведённые эксперименты показали, что при соотношении объемов ЛАБа и воды равном 1:1, эффективность водной экстракции, как метода очистки от урана, составило 31 %, а при соотношении ($V_{орг.}$: $V_{вод.}$= 1:5) – 99 %. Содержание урана в ЛАБе анализировалось по измерению активности в образце жидкого сцинтиллятора.

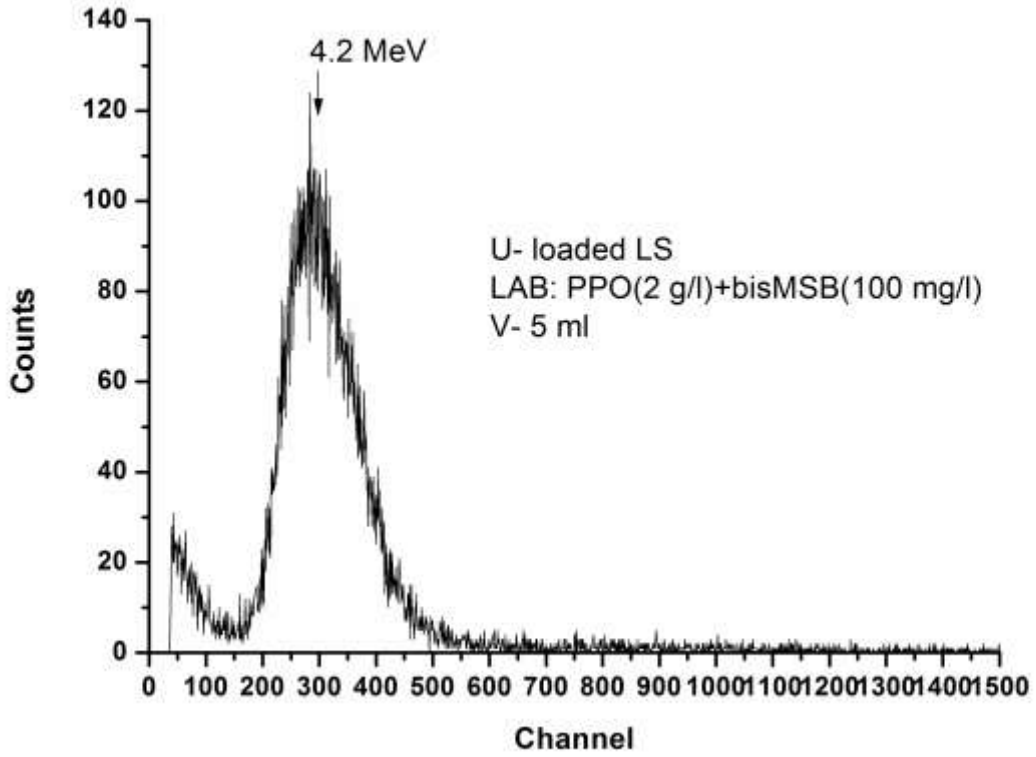


Рис.1 Спектр урана в жидком сцинтилляторе на основе ЛАБа

15.10.5 Очистка от тория

Для введения тория в ЛАБа был использован водный раствор $Th(NO_3)_4$, с концентрацией 0,975 моль/л. Экстракция Th в органику проводилась в присутствии высаливателя, 12М раствора LiCl. Для увеличения растворимости тория, предварительно, в органической фазе был растворен TOPO, в количестве обеспечивающим мольное соотношение между Th и TOPO равное 1:3. После отделения водной фазы, анализировалось содержание тория в ЛАБе. С этой целью, как и в случае с ураном, была приготовлена проба сцинтиллятора с PPO(2 г/л) и bis-MSB(100 мг/л). На рис.2 изображён амплитудный спектр тория и его дочерних продуктов в сцинтилляторе объёмом 5 мл. Активность пробы сцинтиллятора 5 мл составила 266 расп./сек. Для очистки ЛАБа от тория была использована, как и для урана, деионизованная вода, в соотношении 1:5. Для этого соотношения между органической и водной фазами эффективность извлечения тория из органики составила 97%.

Таким образом, было показано, что как для уранил-иона, так и для тория чистая деионизованная вода является хорошим средством для извлечения их из ЛАБа. При этом, согласно полученным результатам, соотношение объемов ЛАБа и воды должно составлять не менее 1:5.

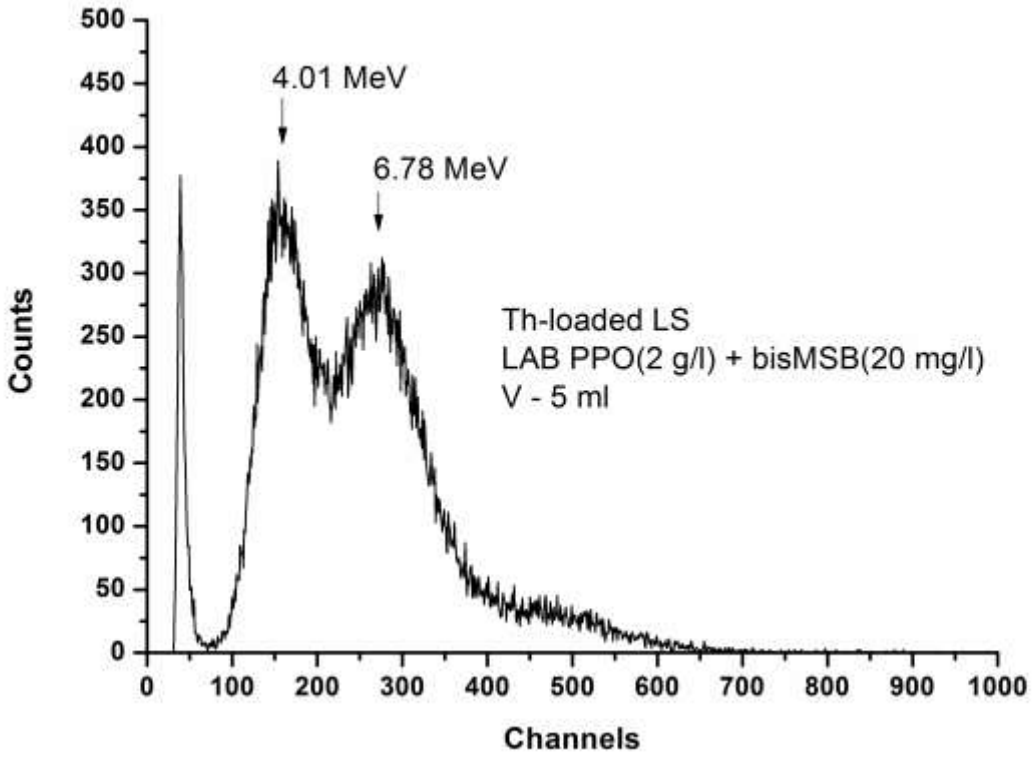


Рис.2. Спектр Th в ЛАБе PPO(2 г/л), bis-MSB(20 мг/л).

15.10.6 Очистка от калия

Концентрация радиоактивного изотопа К-40 в природном калии составляет 0.0117 %. К-40 может распадаться двумя способами: бета распад E_{max} – 1.314 МэВ (89 %) и э.з (11 %) с вылетом гамма кванта 1.46 МэВ. Основными источниками загрязнения сцинтиллятора могут являться, как и в случае урана, тория, пыль из окружающего воздуха, а также какая-нибудь калий-содержащая органическая соль, растворившаяся в органической жидкости.

Для очистки ЛАБа от калия была использована экстракция деионизованной водой, при соотношении объёмов ЛАБ: вода (1:2). Измерения активности и сцинтилляционных характеристик ЛАБа показали, что практически весь (~ 100%) калий переходит из органической фазы в водную.

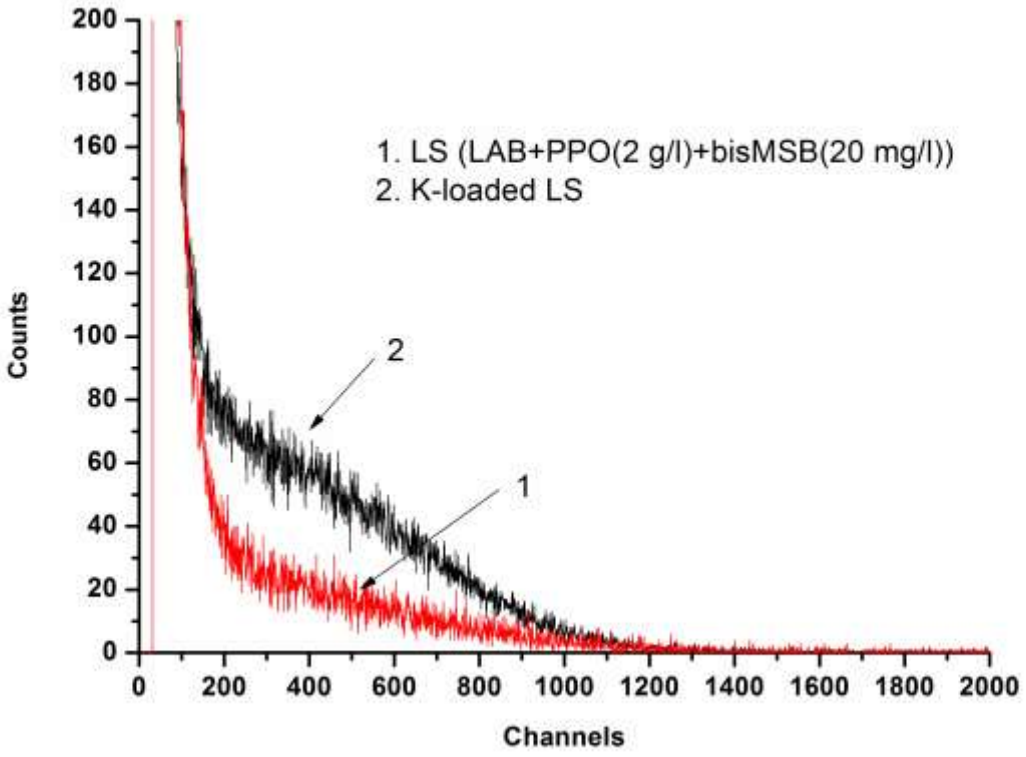


Рис.3. Спектр фона ЛАБа (1) и К-40 в ЛАБе (2)

15.10 Заключение

В 2014 г основное внимание было уделено исследованию источников фона в сцинтилляционном детекторе и методах их устранения. Рассчитан фон от реакторных нейтрино АЭС и показано, что для детектора на БНО он составляет составляет ~0,22 от ожидаемого эффекта. Это существенно ниже по сравнению с действующими в настоящее время детекторами (Борексино ~1. Камленд ~2. В этом состоит одно из основных преимуществ проектируемого на БНО детектора геонейтрино по сравнению с другими аналогичными действующими и проектируемыми детекторами.

Разработаны методы очистки сцинтиллятора от наиболее опасных радиоактивных примесей (урана, тория, калия), которые обеспечат требуемые фоновые характеристики полномасштабного детектора при регистрации нейтрино от различных астрофизических источников.

15.10 Публикации

Установка для измерения содержания ^{14}C в жидких сцинтилляторах И. Р., Барабанов, Л. Б. Безруков, А.В Вересникова Ю. М. Гаврилюк, А. М. Гангапшев, В. И. Гуренцов, В. В. Кузьминов, Б. К. Лубсандоржиев, В. П. Моргалюк, Г. Я. Новикова, В. В. Синев, Е. А. Янович, Препринт ИЯИ №1393/2014

15.11 Обоснование создания большого сцинтилляционного детектора в БНО ИЯИ РАН

Исполнители: И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А.В Вересникова, Ю. М. Гаврилюк, А. М. Гангапшев, В. И. Гуренцов, В. В. Казалов, В. В. Кузьминов, Б. К. Лубсандоржиев, С. Б. Лубсандоржиев, В. П. Моргалюк, Г. Я. Новикова, В. В. Синев, Е. А. Янович

Регистрация гео-нейтрино может помочь решить проблему теплового потока Земли. Современное значение теплового потока от Земли оценивается в 47 ±4 ТВт при измерениях в коре и до 300 ТВт при измерениях температуры мирового океана. Основной вклад в поток дают радиоактивные изотопы: уран, торий и калий. Поток от урана и тория оценивается в 19-20 ТВт. Поток от калия считается пренебрежимо малым. Мы рассмотрели данные о содержании калия в земной коре и распространили эту величину на всю Землю. В результате суммарный тепловой поток от всех трех изотопов может объяснить наблюдаемую величину потока от Земли.

15.11 Введение

Тепловой поток из недр Земли изучается уже много лет. Недавно были получены довольно точные величины этого потока 47 ± 1 ТВт при измерениях температуры в пробуренных шахтах в коре. Однако, имеются и данные по измерению поверхностной (до 2 км глубины) температуры мирового океана. Эти измерения оценивают тепловой поток до 300 ТВт. Дискутируются источники тепла, обеспечивающие такую величину теплового потока. Основной причиной называются радиоактивные элементы, расположенные в коре и мантии. Это, в основном, ^{238}U, ^{232}Th и ^{40}K. Согласно современным представлениям в ядре радиоактивных элементов быть не должно из-за того, что они являются литофильными элементами и при формировании коры должны были перейти в твердую кору из жидкой мантии.

Разработана теория состава Земли, основанная на изучении коры и хондритовых метеоритов. Эта теории получила название Основной силикатной теории. Согласно этой теории Земля содержит небольшое число радиоактивных элементов, расположенных преимущественно в коре и мантии. Элементный состав Земли и метеоритов считается тождественным.

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

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

15.11 Спектры антинейтрино 238U, 232Th и 40K

Антинейтрино от ^{238}U и ^{232}Th происходят из нескольких распадов в цепочке, 4 у ^{232}Th и 6 у ^{238}U. Энергетический спектр антинейтрино ^{238}U достигает 3.26 МэВ, а ^{232}Th – 2.25 МэВ, причем ниже 2.25 МэВ форма спектра урана и тория примерно одинакова (см. рис.1).

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

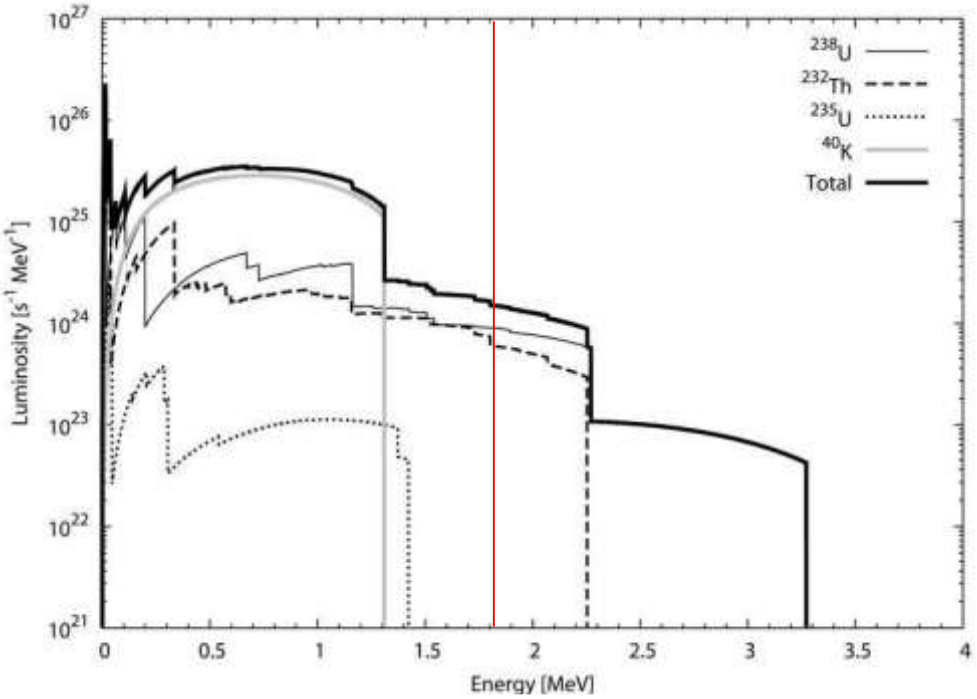


Рис.4 Спектры антинейтрино, производимые радиоактивными элементами. Вертикальная красная линия показывает порог регистрации реакции (1).

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

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ , \qquad (1)$$

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

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}'_e + e^{-\prime}. \qquad (2)$$

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

Сечение реакции (2) дается выражением

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

где E и T – энергия антинейтрино и кинетическая энергия электронов отдачи, $g_F^2 \frac{m}{\pi} = 4.308\times10^{-45}$ см^2, $x^2 = \sin^2\theta_W = 0.232$.

15.11 Детектор геонейтрино

В качестве детектора геонейтрино предлагается использовать жидкосцинтилляционный детектор объемом от несколько килотонн до нескольких десятков килотонн. Объем детектора определяется необходимой статистикой регистрируемого эффекта. Рассчитанная скорость счета геонейтрино для различных мест расположения детектора показана в табл. 1. Расчет проводился для модели расположения радиоактивных элементов в коре и мантии.

Таблица 1. Ожидаемые скорости счета N_{geo} реакции $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ в разных точках Земли в суммарном потоке $\bar{\nu}_e$ от распадов U и Th (с учетом осцилляций) в единицах TNU (1 TNU = 1 событие в год в мишени, содержащей 10^{32} протонов). Отношение R скорости счета фона реакторных антинейтрино $N_{reactor}$ к скорости счета событий геонейтрино N_{geo} в диапазоне энергий геонейтрино. Приведена глубина расположения детектора.

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

Из таблицы 1 видно, что при скорости счета примерно 50 соб./год на килотонну сцинтиллятора, необходимо иметь массу детектора не менее 10 кт для уверенной регистрации геонейтрино от урана и тория. Для того, чтобы определить соотношение Th/U с точностью

20% в среднем по планете необходимая масса детектора увеличивается до 50 кт, но с учетом эксплуатации минимум в 10 лет масса может быть уменьшена до 25 кт.

Поток геонейтрино от ^{238}U и ^{232}Th был недавно зарегистрирован двумя сцинтилляционными детекторами большого объема KamLAND (1000 т) [1] и BOREXINO (300 т) [2]. Полученный поток не противоречит минимальному содержанию в Земле, следующему из Bulk Silicate Earth, но и не закрывает окончательно другие гипотезы с гораздо большим содержанием ^{238}U и ^{232}Th [3, 4]. Погрешность измерения составляет около 25%. Мощность георeактора из этих измерений ограничивается 4.5 ТВт.

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

15.11 Сцинтиллятор

В детекторе BOREXINO используется сцинтиллятор на основе псевдокумола (Pseudocumene, PC), а в детекторе KamLAND – на основе минерального масла. В современных проектах предполагается использовать линейный алкилбензол (LAB). В табл. 2. приведены сравнительные цифры содержания ядер водорода H, углерода C и электронов в 1000 т ЛАБа и псевдокумола.

Таблица 2. Содержание ядер водорода углерода и электронов в 1000 т линейного алкилбензола и псевдокумола

1000 т	LAB	PC
Формула	$C_{18}H_{30}$	C_9H_{12}
Ядер H	7.465×10^{31}	6.013×10^{31}
Ядер C	4.479×10^{31}	4.510×10^{31}
Электроны	3.434×10^{32}	3.307×10^{32}

Сцинтиллятор на основе ЛАБа обладает хорошими свойствами для длительного использования (высокий световыход и большая прозрачность). Кроме того он может производиться в больших количествах.

15.11 Соотношение 232Th 238U в Земле

На рис. 2 приведены спектры позитронов реакции обратного бета распада (1) от потоков урана, тория и ядерных реакторов в детекторе массой 1 кт. Из приведенного рисунка понятно как можно разделить спектры урана и тория для того, чтобы измерить соотношение

содержания урана и тория во всей Земле [5]

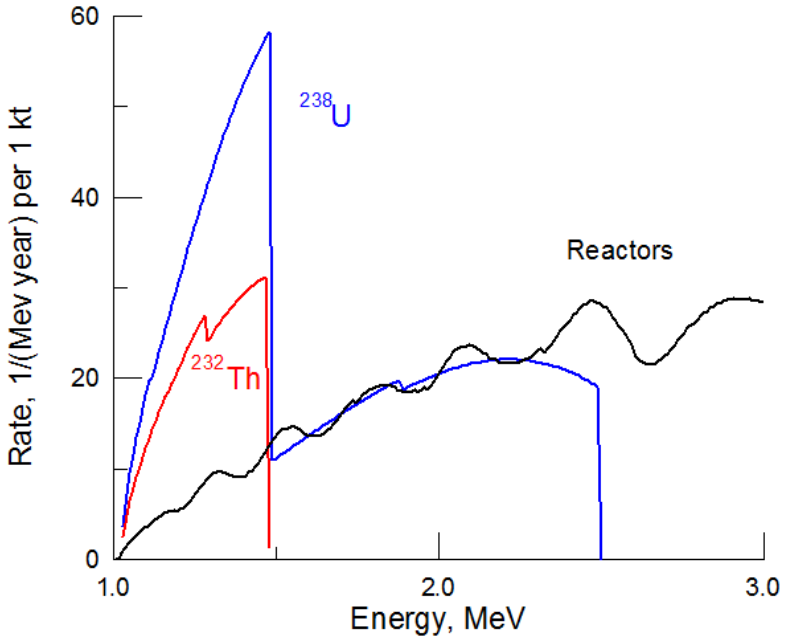


Рис. 5. Спектры позитронов реакции обратного бета распада от потоков урана, тория и ядерных реакторов.

15.11 Проблема 40К

В работе [5] рассматривались поток геонейтрино, производимый ^{40}К. При содержании калия в Земле до 3.76% (из работы [4]) поток оказался сравнимым с потоком солнечных нейтрино от 7Be; 7.8×10^{8} см$^{-2}$ с$^{-1}$, при бериллиевом потоке 4.8×10^{9} см$^{-2}$ с$^{-1}$.

Содержание калия в Земле сильно отличается в различных источниках: от 0.024% [3] до 3.76% [4]. Мы решили рассмотреть поток антинейтрино от ^{40}К и получить верхнюю и нижнюю границы этого потока, чтобы понять можно ли его зарегистрировать существующими детекторами нейтрино большого объема. В отличие от [6] мы поместили калий в кору и в ядро. Все расчеты мы провели для детектора BOREXINO, построенного в лаборатории Gran Sasso в Италии и предназначенного для регистрации потоков солнечных нейтрино по реакции рассеяния нейтрино на электроне.

Для расчета мы выбрали модель Земли, состоящую из сферических слоев согласно данным сейсмических исследований. От поверхности до слоя Мохоровичича располагается кора, которая подразделяется на верхнюю, среднюю и нижнюю. Это разделение было взято из [7], где содержатся данные по глубине нахождения каждого слоя в точках через каждые 2 градуса долготы и широты. Далее мы располагали верхнюю мантию до глубины 660 км, ее же считали литосферой при расчетах. На глубине 2900 км заканчивается нижняя мантия, далее следует внешнее (жидкое) ядро до глубины 5140 км, затем до центра – внутреннее (твердое) ядро.

^{40}K был помещен в кору и верхнюю мантию при расчете минимального эффекта. Содержание калия в коре взято 2.1 весовых % согласно [8] (в среднем по Земле содержание калия составило 0.3%). При расчете максимального эффекта ^{40}K дополнительно помещался в центре (твердом и жидком ядрах) в количестве, чтобы обеспечить среднее содержание калия в Земле 3.7% согласно гипотезе гидридной Земли [3, 4]. Используемые для расчета данные приведены в таблице 3.

Таблица 3. Содержание калия в слоях Земли в весовых процентах. Для перехода в единицы г/г надо применить коэффициент 10^{-2}.

	Минимальное содержание, %	Максимальное содержание (Модель 1), %	Максимальное содержание (Модель 2), %
Кора	2.1	2.1	2.1
Верхняя мантия	2.1	2.1	3.0
Нижняя мантия	0	0	3.5
Внешнее ядро	0	10	4.5
Внутреннее ядро	0	10	6.0
Океаны	0.042	0.042	0.042
Осадочные породы	0.2	0.2	0.2
Всего в Земле	0.36	3.74	3.74

В таблице 4 приведены полученные потоки нейтрино и ожидаемые эффекты в 100 т псевдокумена с порога 200 кэВ. При расчете учитывались вакуумные осцилляции нейтрино, и не учитывался эффект Михеева-Смирнова-Вольфенстайна. Вклад в рассеяние дают также мюонные и таонные нейтрино.

Таблица 4. Потоки антинейтрино и нейтрино и соответствующие скорости счета событий в 100 т псевдокумола.

	Содержание К 3.74%		Содержание К 0.36%	
	Нейтрино	антинейтрино	нейтрино	антинейтрино
Поток, $см^{-2}$ $с^{-1}$	1.70×10^{6}	7.58×10^{8}	3.05×10^{5}	1.36×10^{8}
Скорость счета, $сут.^{-1}$	0.06	4.04 (Мод.1) 4.54 (Мод.2)	0.015	1.01

На рис. 3. показаны спектры электронов отдачи в случае минимального и максимального содержания калия в Земле в сравнении со спектрами одиночных событий от солнечных нейтринных потоков и внутренних фонов BOREXINO [9]. В скобках указана суточная скорость счета соответствующего источника. Так, скорость счета событий от нейтринного солнечного потока ^{7}Be составляет 46 в сут., а от калия лежит в коридоре от 1 до 4 в сут.

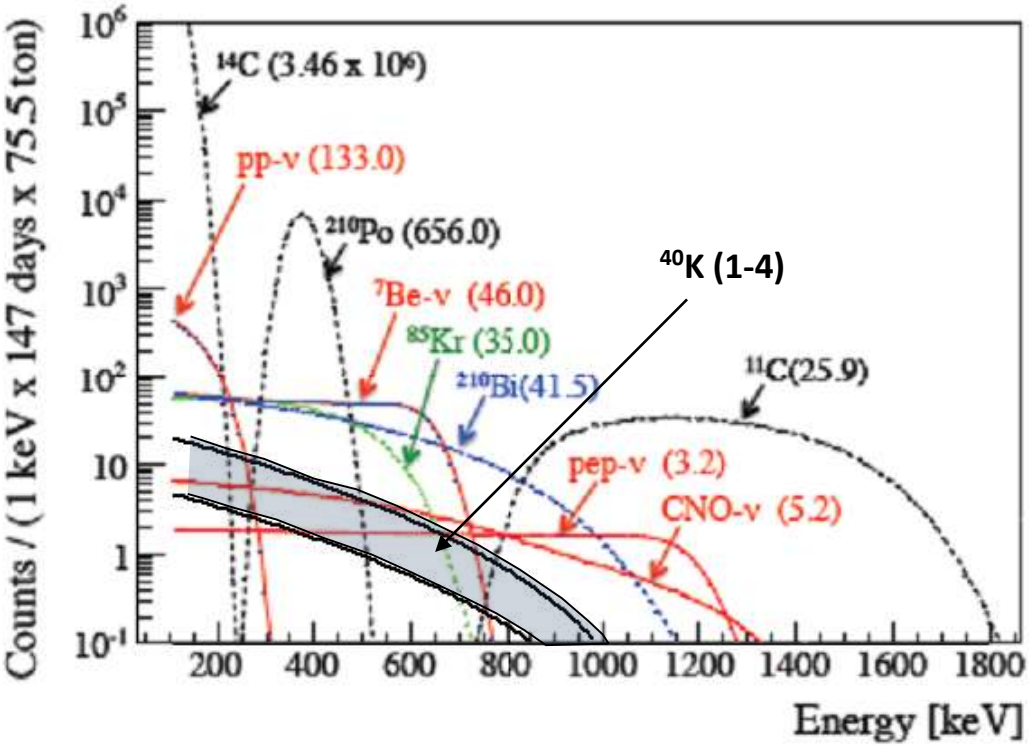


Рис. 6. Спектры одиночных событий в шкале энерговыделений в детекторе BOREXINO за 147 дней для 75.5 т жидкого сцинтиллятора из [9]. На график наложен расчетный коридор возможных спектров электронов отдачи, производимых антинейтринным потоком ^{40}К, содержащегося в Земле.

15.11 Проблема 14C в сцинтилляторе

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

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

Непонятно откуда берется ^{14}C в жидком сцинтилляторе, так как, согласно современной теории происхождения нефти, она хранится без контакта с атмосферой сотни миллионов лет. За это время весь ^{14}C должен был распасться, так как его период полураспада 5730 лет. Есть одна гипотеза [10], которая объясняет происхождение ^{14}C в нефти, но она требует тщательной проверки. Если удастся подтвердить эту гипотезу, то появляется возможность значительно уменьшить его содержание в сцинтилляторе или убрать вовсе.

15.11 Экспериментальная установка для проверки содержания 14C

Для измерения образцов сцинтиллятора на содержание ^{14}C была изготовлена экспериментальная установка [11], включающая:

Прозрачная кювета из оргстекла;

Прозрачная кювета из кварца для исследования активных жидкостей;

Два низкошумящих фотоумножителя;

Защита из меди и полиэтилена.

Создаваемый детектор расположен в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН [12] и предназначен для измерений ультранизких концентраций изотопа ^{14}C в образцах жидкого органического сцинтиллятора. Лаборатория находится внутри горы (3700 м от входа в тоннель), на глубине 4900 м.в.э., где поток мюонов составляет ~ 0.1 $м^{-2}$ $час^{-1}$. Для подавления фона от нейтронов и гамма квантов окружающих горных пород стены, пол и потолок комнаты, где установлен сцинтилляционный детектор, выполнены последовательно из слоёв полиэтилена (25 см), кадмия (1мм) и свинца (15 см). Сам детектор размещён в коробе из оргстекла (14.5 * 14.5 *120) $см^3$ и окружён со всех сторон защитой из особо чистой меди, толщиной 15 см. Принципиальная схема детектора изображена на рис.1. Детектор включает в

себя кварцевую ячейку, диаметром 100 мм и длиной 200 мм из кварцевого стекла толщиной 3 мм, заполненную образцом жидкого органического сцинтиллятора, двух световодов из органического стекла (ПММА), размером 100*100*300 мм^3 и двух низкофоновых фотоумножителей (ФЭУ) ET9302B (3”). Для увеличения светосбора, кварцевая ячейка и световоды обёрнуты зеркальной отражающей плёнкой VM2000. Для лучшего оптического контакта между кварцевой ячейкой, световодами и ФЭУ использовалась силиконовая смазка. Герметичный чехол из полиэтилена, окружающий детектор снаружи, служил для защиты от радона. Из внутреннего объёма радон удалялся продувкой газообразным азотом. В качестве источника газообразного азота использовался дьюар с жидким азотом.

Условия измерения ультранизких концентраций радиоуглерода делает необходимым использование в конструкции детектора элементов с низким содержанием радиоактивных примесей. С этой целью, с помощью низкофонового полупроводникового детектора из высокочистого германия HPGe, были проведены измерения интенсивности гамма квантов кварцевой ячейки с образцом жидкого сцинтиллятора и фотоумножителя ET9302B. По данным измерений были выполнены расчёты содержания радиоактивных примесей (Бк/кг) в ячейке с ЖОС и в фотоумножителе, представленые в табл. 5.

Таблица 5. Содержание радиоактивных примесей в ячейке с ЖОС и ФЭУ.

Изотоп	Кварцевая ячейка с ЖОС Активность в Бк/кг	ET9306 Активность в Бк/кг [Бк/ФЭУ]
^{40}K	$\leq 1.0\cdot 10^{-2}$	1.71±0.09 [0.26 ± 0.01]
^{208}Tl	$\leq 9.4\cdot 10^{-4}$	$(3.6\pm 0.6)\cdot 10^{-2}$ [$(5.4\pm 0.8)\cdot 10^{-3}$]
^{214}Bi	$(3.5\pm 1.7)\cdot 10^{-3}$	1.21±0.03 [0.180±0.004]
^{228}Ac	$\leq 2.3\cdot 10^{-3}$	0.10±0.01 [$(1.5\pm 0.2)\cdot 10^{-2}$]

Дальнейшее улучшение фоновых характеристик сцинтилляционного детектора планируется использование более низкофоновых фотоумножителей.

Для энергетической калибровки детектора использовались три источника гамма квантов: ^{241}Am, ^{137}Cs и ^{133}Ba.Энергии гамма квантов и энергия в пике наблюдаемого спектра представлены в таблице 6.

Таблица 6. Калибровочные источники.

Источник	Энергия излучаемых гамма-квантов, кэВ	Энергия электрона отдачи при рассеянии назад, кэВ	Энергия в наблюдаемом пике, кэВ	Номер канала
^{137}Cs	661.657	477.334	440	3862
^{133}Ba	356.017 (45%) 302.853 (13.4%) 80.997 (25%) 79.614 (1.9%)	197.3	170 80	1308
^{241}Am	59.54 (93%) 26.34 (6%)		59.54	413.9

Для получения количества атомов ^{14}C в объеме сцинтиллятора использовался экспериментальный спектр, полученный за 537.78 часов измерения. Спектр был преобразован в гистограмму по 5 кэВ, он показан на рисунке 4. Скорость счета во время измерения составлял в среднем (он менялся в разных циклах измерения) 92.5 отсчета в час. После перевода спектра в энергетическую шкалу он описывался функцией в виде суммы постоянной части, экспоненты и спектра ^{14}C: $A1+A2*\exp(-A3/E)+A4*F_{beta}(E)$]. Параметр A4 определяет количество распадов изотопа ^{14}C в исследуемом объеме сцинтиллятора, который был принят в нашем анализе 1.85 л. В результате анализа получено значение A4 = 28038.5 ± 8660.4. Через период полураспада ^{14}C равный 5730 лет можно получить полное число изотопов в объеме и рассчитать отношение $^{14}C/^{12}C$. Оно оказалось равным $(5.4 \pm 1.7)\times10^{-17}$.

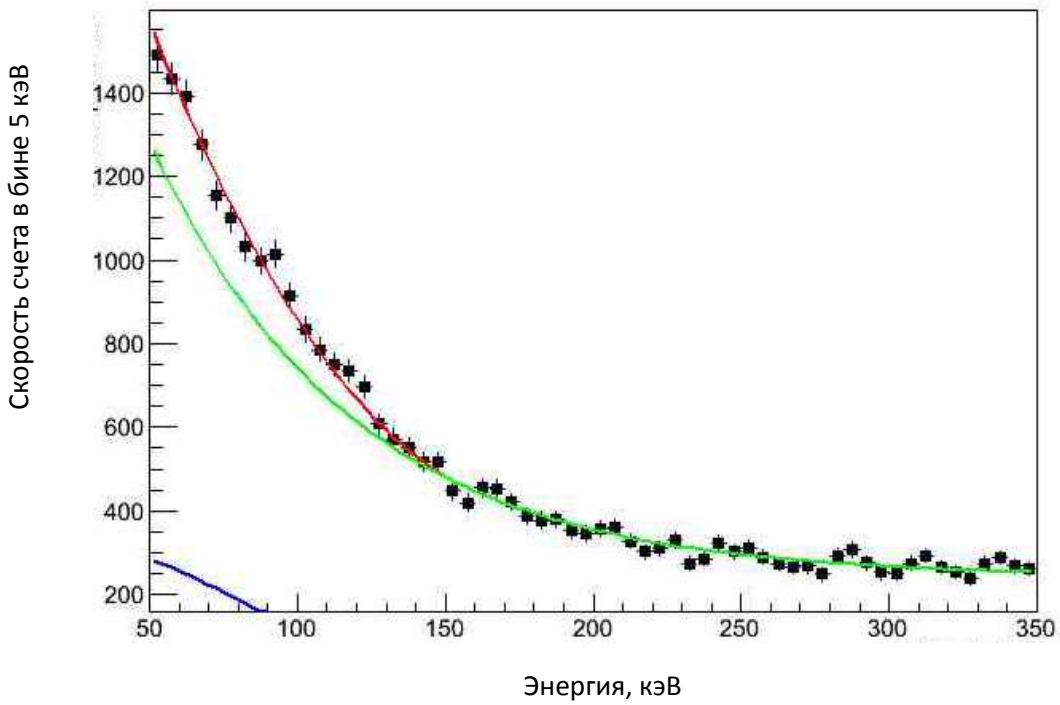


Рис. 7. Гистограмма фона по 5 кэВ в бине (черные точки с ошибкой). Красная линия – подгоночная кривая в виде суммы постоянной, экспоненты и бета-спектра^{14}C. Зеленая линия – фон гамма-квантов в виде суммы постоянной и экспоненты. Синяя линия – бета-спектр ^{14}C.

15.11 Заключение

В данной работе получено обоснование создания большого сцинтилляционного детектора для изучения геонейтрино в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН на Кавказе. Большой сцинтилляционный детектор позволит решить следующие задачи при регистрации геонейтрино:

- Точно определить содержание урана и тория в Земле и проверить насколько оно соответствует величине, полученной из измерений хондритовых метеоритов;
- Измерить поток ^{40}K и определить его полное содержание в Земле. Таким образом, может быть пересмотрен тепловой поток Земли.

В работе получено обоснование размеров детектора для получения результата за приемлемое время измерений – 25 кт лет.

Мы приводим расчеты спектров электронов отдачи, вызываемые потоком антинейтрино, производимым изотопом ^{40}K, находящимся в Земле. Полученный поток оказывается сравнимым с потоком бериллиевых солнечных нейтрино, регистрируемым детектором BOREXINO. Этот фон никогда не рассматривался, как существенный, для детекторов солнечных нейтрино. Показано, что он может составлять до 10% от спектра бериллиевых нейтрино при некоторых моделях состава Земли.

Полученные результаты расчета не противоречат измерениям BOREXINO даже в случае максимального содержания калия в Земле согласно теории [3, 4].

Создана установка по измерению содержания радиоуглерода^{14}C в образцах жидкого сцинтиллятора. Проведены первые измерения со сцинтиллятором на основе отечественного ЛАБа. Результат содержания ^{14}C оказывается на порядок больше, полученного в сцинтилляторе в детекторе Borexino [5]. Наше измерение по одному методу дает значение^{14}C/^{12}C = $(3.4 \pm 1.2)\times10^{-17}$, а по другому – значение ^{14}C/^{12}C = $(5.4 \pm 1.7)\times10^{-17}$. Возможно PC, находящийся в детекторе Borexino в виде сцинтиллятора имеет изначально меньшее содержание ^{14}C или это результат технологического процесса при производстве ЛАБа, связанный с воздействием атмосферного углекислого газа.

Предполагается исследовать образцы сцинтиллятора с основой из растворителя, полученного из нефти, добываемой из нескольких месторождений, чтобы определить влияние расположения месторождения на содержание ^{14}C (чтобы определить, нет ли зависимости содержания ^{14}C от места добычи нефти). Также будут проверены растворители, полученные из каменного угля.

Проводится анализ фонов детектора с целью их дальнейшего подавления и снижения порога детектора для более уверенной регистрации бета-спектра ^{14}C.

15.11 Использованные источники

1. Abe S., Ebihara T., Enomoto S. *et al*., Phys. Rev. Lett. **100**, 221803, 2008; arXiv: 0801.4589 [hep-ex].
2. G. Bellini, J. Benziger, D. Bick et al., Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino, ArXiv: 1303.2571 [hep-ex].
3. Larin,V. N., ed. C. Warren Hunt. Hydridic Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-Rich Planet. Polar Publishing, Calgary, Alberta, Canada, 1993, 247p.; В. Н. Ларин, Наша Земля, «Агар», Москва, 2005.
4. Herve Toulhoat, Valerie Beaumont, Viacheslav Zgonnik, Nikolay Larin and Vladimir N. Larin. Chemical differentiation of planets: a core issue. ArXiv:1308.2909 [astro-ph.EP].
5. L. Bezrukov, V: Sinev Geoneutrino and Hydridic Earth model (or primordially Hydrogen-rich planet), ArXiv:1305.3161 [astro-ph.EP].
6. Giannu Fiorenruni, Marcello Lissia and Fabio Mantovani, Geo-neutrinos and Earth's interior, Phys. Rept., 453:117-172, 2007; ArXiv: 0707.3203 [hep.ex].
7. http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html.
8. en.wikipedia.org/wiki/Abundance_of_elements_in_Earth's_crust.
9. G. Bellini, J. Benziger, D. Bick et al., Final results of Borexino Phase-I on low energy solar neutrino spectroscopy, ArXiv: 1308.0443 [hep-ex].
10. I. Barabanov, L. Bezrukov, E. Resconi, S. Schonert, The 14C abundance in liquid organic scintillators and oil, Препринт ИЯИ-1316/2012.
11. И.Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А.В Вересникова и др., «Измерение содержания ^{14}C в жидких сцинтилляторах с помощью детектора малого объема в низкофоновой камере», Препринт ИЯИ РАН 2014.
12. Ю.М.Гаврилюк, М.Гангапшев, А.М.Гежаев, В.В.Казалов ,В. В. Кузьминов, С.И.Панасенко, С.П.Якименко. «Рабочие характеристики низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900».Москва, Препринт ИЯИ РАН 1301/2011, октябрь 2011г.Ju.M. Gavriljuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev, V.V. Kazalov, V.V.Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, S.P. Yakimenko" Working characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900, Baksan Neutrino Observatory) arXiv: 1204.6424 [physics.ins-det] 01 May 2012.

15.11 Публикации 2014 г.

1. И.Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А.В Вересникова и др., «Измерение содержания ^{14}C в жидких сцинтилляторах с помощью детектора малого объема в низкофоновой камере», Препринт ИЯИ РАН 2014.

2. V. Sinev, "Looking for antineutrino flux from ^{40}K with large liquid scintillator detector", Proceedings of the International Workshop on Prospects of Particle Physics: «Neutrino Physics and Astrophysics», Valday, January 27 - February 2, 2014. ЭЧАЯ.

16 Лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий

Руководитель работ чл.-корр. РАН Г.В.Домогацкий.

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Разработка и создание нейтринных телескопов в низкофоновых подземных лабораториях и глубоко под водой для исследования природных потоков нейтрино и других элементарных частиц.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал.

Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной и космологические следствия их рождения. Руководитель работ д.ф.-м.н. Э.В.Бугаев.

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

Список исполнителей отчёта:

Зав. лабораторией, чл.-корр. РАН Г.В.Домогацкий (16.1 введение, заключение)

Ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н. Ж.-А.М.Джилкибаев (16.1 введение)

Старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. В.М.Айнутдинов (16.1 введение, результаты исследований)

Ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н. Э.В.Бугаев (16.2)

16.1 Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал

16.1 Реферат

НЕЙТРИНО, МЮОН, НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ОЗЕРО БАЙКАЛ, МОНИТОРИНГ ВОДНОЙ СРЕДЫ

Отчет Лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий ИЯИ РАН составлен по результатам выполнения государственного задания на НИР "Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал. Измерение космических потоков нейтрино высоких энергий, обнаружение их источников, сооружение с этой целью глубоководного Байкальского нейтринного телескопа с рабочим объемом до 2 км3. Создание и установка первого экспериментального образца кластера – базового комплектующего элемента Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ-1000. Накопление, анализ и обработка данных по программам регистрации мюонов и ливней от нейтрино" и проекта 14-02-00972 РФФИ «Исследование природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, поиск проявлений массивных частиц темной материи и других гипотетических частиц в экспериментах на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе нового поколения».

Конечная цель выполненных работ – создание в течение 10 лет нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба (НТ1000), методов для статистически достоверной регистрации космических нейтрино с энергиями выше 10 ТэВ и получения результатов мирового уровня в наиболее актуальных исследованиях в области астрофизики. В 2014 г. были получены результаты, существенно продвигающие коллектив лаборатории к намеченным целям: выполнены планы работ по установке на озере Байкал 2 гирлянд оптических модулей (всего на 2014г. установлено 5 гирлянд) и выполнены работы по подготовке оборудования для завершения развертывания первого кластера из 8 гирлянд создаваемого телескопа НТ1000. Получены результаты исследований по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких (E>10 ТэВ) энергий, по поиску магнитных монополей и массивных частиц – кандидатов на роль холодной тёмной материи. Получены результаты по изучению фоновых условий (свечения) водной среды в месте установки телескопа, которые имеют также важное значение в изучении экосистемы озера Байкал.

По результатам выполненных работ в 2014 г. опубликованы 2 статьи и 2 статьи подготовлены и приняты в печать. Защищена одна диссертация на степень кандидата физико-математических наук.

16.1 Введение

Байкальский нейтринный телескоп, первая очередь которого была запущена в апреле 1993 года, на протяжении четырнадцати лет был единственным в мире функционирующим стационарным глубоководным черенковским детектором элементарных частиц. Лишь в 2007 году на создававшемся в Средиземном море детекторе ANTARES было выделено первое событие, интерпретируемое авторами как событие от нейтрино, а в своем полномасштабном варианте детектор введен в строй в середине 2008 года. В этом смысле все полученные на Байкальском нейтринном телескопе и на детекторе ANTARES результаты, также как и результаты всех следующих лет, вплоть до создания в Северном полушарии нескольких, связанных в единую сеть детекторов кубокилометрового масштаба, удовлетворяют и будут удовлетворять критериям новизны «по определению». Такое же утверждение справедливо и по отношению практически ко всем результатам, получаемым в ходе изучения Байкала как уникального природного объекта.

Если же проводить сравнение с физическими результатами, получаемыми на крупнейших подземных и подледных нейтринных телескопах, то Байкальский глубоководный нейтринный телескоп является одним из мировых лидеров в таких направлениях исследований, как изучение природного потока мюонов высоких (свыше 10 ГэВ) энергий от атмосферных нейтрино, как исследование природного потока магнитных монополей и поиск проявлений массивных частиц - кандидатов на роль холодной темной материи. Байкальский детектор продолжает оставаться в компании мировых лидеров (наряду с детектором ANTARES и созданным в антарктическом льду детектором AMANDA, а с 11 мая 2009 года - IceCube) и в задаче исследования природного потока нейтрино с энергией свыше 10 ТэВ.

Отчет Лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий ИЯИ РАН составлен по результатам выполнения государственного задания на НИР "Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал.

Измерение космических потоков нейтрино высоких энергий, обнаружение их источников, сооружение с этой целью глубоководного Байкальского нейтринного телескопа с рабочим объемом до 2 км3. Создание и установка первого экспериментального образца кластера – базового комплектующего элемента Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ-1000. Накопление, анализ и обработка данных по программам регистрации мюонов и ливней от нейтрино" и проекта 14-02-00972 РФФИ «Исследование природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, поиск проявлений массивных частиц темной материи и других гипотетических частиц в экспериментах на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе нового поколения».

Конечная цель выполненных работ – создание в течение 10 лет нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба (НТ1000), методов для статистически достоверной регистрации космических нейтрино с энергиями выше 10 ТэВ и получения результатов мирового уровня в наиболее актуальных исследованиях в области астрофизики. В 2014 г. были получены результаты, существенно продвигающие коллектив лаборатории к намеченным целям: выполнены планы работ по установке на озере Байкал 2 гирлянд оптических модулей (всего на 2014 г. установлено 5 гирлянд) и выполнены работы по подготовке оборудования для завершения развертывания первого кластера из 8 гирлянд создаваемого телескопа НТ1000. Получены результаты исследований по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких (E>10 ТэВ) энергий, по поиску магнитных монополей и массивных частиц – кандидатов на роль холодной темной материи. Получены результаты по изучению фоновых условий (свечения) водной среды в месте установки телескопа, которые имеют также важное значение в изучении экосистемы озера Байкал.

По результатам выполненных работ в 2014 г. опубликованы 2 статьи и 2 статьи подготовлены и приняты в печать. Защищена одна диссертация на степень кандидата физико-математических наук.

Современное состояние исследований. В настоящее время в мире существуют пять, кроме Байкальского, финансируемых проектов - IceCube (AMANDA) на Южном полюсе и ANTARES, NESTOR, NEMO, KM3Net в Средиземном море. Проекты создания глубоководных детекторов в Средиземном море находятся либо на стадии недавнего завершения монтажных работ и осмысления первых результатов (ANTARES), либо на стадии натурных испытаний отдельных элементов (NESTOR, NEMO), либо на стадии поиска технических решений и разработки архитектуры детектора (KM3Net). Создания кубокилометрового детектора здесь можно ожидать не раньше, чем к концу текущего десятилетия.

Коллаборация ANTARES (Франция, Англия, Голландия, Испания, Россия, Италия) в середине 2008 года завершила процесс развертывания нейтринного телескопа в Тулонском заливе Средиземного моря, рассматривая его как промежуточный этап на пути создания телескопа кубокилометрового масштаба. Телескоп расположен на глубине около 2400 метров в 25 км от берега и содержит 900 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), сгруппированных в триплеты и размещенных на 12-ти стрингах (притопленных буйковых станциях с регистрирующими модулями) длиной 350 м, разнесенных на 70 метров друг от друга. Геометрические площадь и объем телескопа составляют соответственно 0.07 км^2 и 2x10^{-2} км^3.

В марте 2008 года нейтринный телескоп ANTARES приступил к набору данных в проектной конфигурации. В ходе создания телескопа коллаборация столкнулась с рядом проблем, обусловленных как трудностями эксплуатации установки на больших глубинах в море, так и с недостаточной изученностью свойств водной среды. В течение 3-х первых месяцев набора данных в 2006 году, уровень собственного свечения воды, обусловленный процессами биолюминесценции, оказался существенно выше характерных значений, наблюдавшихся при тестовых измерениях в предыдущие годы. В результате, данные за этот период были исключены из последующего анализа. В июне 2008 года была потеряна связь с установкой из-за обрыва коммуникационного кабеля, связывающего телескоп с береговым центром. Эту поломку удалось устранить к началу сентября. Опыт эксплуатации телескопа ANTARES должен дать представление о проблемах, с которыми придется столкнуться при создании детектора кубокилометрового масштаба в Средиземном море. В настоящее время нейтринный телескоп ANTARES обладает наибольшей в Северном полушарии чувствительностью к сигналу в задаче поиска локальных источников нейтрино из центра Галактики и галактической плоскости.

Коллаборация NESTOR (Греция, Германия, Россия, Швейцария, США) ведет работы по созданию нейтринного телескопа первого поколения в Средиземном море у берегов Греции с начала 90-х годов. Следует отметить, что географические, гидрооптические и гидрологические свойства среды и уровень фона (обусловленный процессами биолюминесценции) в месте расположения телескопа наиболее адекватны требованиям, предъявляемым к водной среде при создании нейтринного телескопа в Средиземном море. Наиболее значимым результатом, достигнутым в рамках работ по реализации проекта за последние 15 лет, является постановка в 2003 году прототипа уменьшенного масштаба (12 ФЭУ) одного этажа будущего детектора. После месяца эксплуатации этого детектора набор данных был прерван в связи с возникшими неполадками в системе энергопитания. Создание первой осмысленной стационарной установки, использующей несколько сотен ФЭУ, здесь можно ожидать не ранее чем через два-три года. Реальные возможности, создаваемого детектора, пока непредсказуемы.

Коллаборация NEMO (Италия) несколько лет назад начала активные исследования района Средиземного моря вблизи Сицилии с целью развертывания там детектора, который послужит прототипом будущего кубокилометрового общеевропейского нейтринного телескопа. В декабре 2006 года была осуществлена постановка и начались натурные испытания прототипа одной башни будущего детектора, содержащей 16 оптических модулей. Однако после месяца работы прототип потерял плавучесть и лег на дно. В 2013 году в рамках проекта NEMO-2 была осуществлена успешная постановка и эксплуатация в течение года

прототипа детектирующего модуля телескопа кубокилометрового масштаба разрабатываемого коллаборацией – одной башни содержащей 32 оптических модуля на базе десятидюймового ФЭУ Hamamatsu R7081.

Дальнейшие планы коллаборации NEMO связаны с созданием детектора кубокилометрового масштаба у берегов Италии в рамках проекта KM3NeT. Проект KM3NeT является общеевропейским проектом создания нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в Средиземном море. Первоначально условием финансовой поддержки проекта из общего бюджета стран ЕС являлось объединение усилий всех трех средиземноморских коллабораций (ANTARES,NEMO и NESTOR) для его разработки и реализации. В ходе реализации проекта в период с 2006 года и вплоть до настоящего времени была выработана общая концепция и разработаны основные элементы и системы будущего детектора. Детектор будет состоять из шести независимых блоков, которые планируется развернуть в трех географических районах у берегов Франции, Италии в Греции (по два блока в каждом). Каждый блок представляет из себя автономный глубоководный черенковский детектор с эффективный объем порядка 0.5 км3, содержащиый примерно 2000 фотодетекторов размещенных на 115 гирляндах. В настоящее время во Франции и в Италии ведутся натурные испытания прототипов оптических модулей и стринга будущего телескопа. Объявленной целью проекта является развертывание к 2020 году двух блоков с общим эффективным объемом порядка одного кубического километра, а к 2025 году – шести блоков с общим объемом порядка 3 км3.

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

С целью увеличения чувствительности телескопа в экспериментах по исследованию эффекта нейтринных осцилляций, поиску частиц – кандидатов на роль частиц темной материи,

а также для увеличения апертуры телескопа относительно регистрации нейтрино из верхней полусферы плотность фотодетекторов в центральной части телескопа, получившей название DeepCore, увеличена за счет постановки дополнительных 6-ти гирлянд длиной по 72 метра с более плотным размещением оптических модулей вдоль этих гирлянд. DeepCore обладает чувствительным объемом порядка 10^7 м^3 при энергетическом пороге регистрации мюонов порядка 10 ГэВ. Относительно экспериментов на DeepCore остальная часть телескопа IceCube выполняет роль veto- детектора и позволяет в определенной мере подавить фон от атмосферных мюонов. В настоящее время на телескопе IceCube ведутся исследования широкого спектра проблем астрофизики, космологии и физики элементарных частиц в диапазоне энергий от сотен ГэВ и вплоть до ультравысоких энергий на уровне чувствительности, более чем на порядок превышающем уровень, достигнутый на нейтринных телескопах первого поколения.

Анализ экспериментальных данных, накопленных как по мере развертывания телескопа IceCube, так и после ввода его в эксплуатацию в предусмотренном проектом конфигурации, привел к серьезному продвижению в задачах поиска нейтрино от астрофизических объектов, регистрации нейтринного потока, сопровождающего гамма-всплески, поиска проявлений темной материи, исследования диффузного потока нейтрино и в ряде других задач.

Наиболее ярким и значимым событием для развития нейтринной астрофизики стала публикация результатов анализа набора данных, накопленных за период с мая 2010 г. по май 2013 г., при котором было выделено 37 событий в диапазоне энергий от 30 ТэВ до 2.0 ПэВ, чьи вершины были расположены в выделенном внутреннем объеме телескопа размером 0.4 км^3. Энергетическое и угловое распределение этих событий, а также относительная доля событий с мюонным треком в полном числе событий хорошо согласуются с ожидаемым эффектом от изотропного потока нейтрино астрофизической природы с энергетическим спектром, близким к ~E^(-2), содержащего в равной доле нейтрино всех трех типов – электронного, мюонного и таонного. Этот результат, стал важнейшей вехой в развитии исследований природных потоков нейтрино высоких энергий, так как он отвечает на вопрос о величине потока нейтрино астрофизической природы и определяет необходимый уровень чувствительности экспериментов при решении задач нейтринной астрофизики высоких энергий.

Если же проводить сравнение Байкальского детектора с крупнейшими действующими подземными нейтринными телескопами (Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп и черенковский детектор SUPERKAMIOKANDE) с точки зрения возможности проведения на них тех или иных исследований, то, в первую очередь, следует отметить, что в Байкальском

нейтринном телескопе используется несоизмеримо меньшее количество фотоэлектронных умножителей (192 в НТ200 по сравнению с 11 тысячами в SUPERKAMIOKANDE) для просмотра как минимум вдвое большего объема. Поэтому в Байкальском эксперименте более высокий порог регистрации событий по энергии (около 20 ГэВ) и нет возможности получения детальной информации о событии. С другой стороны, высокая чувствительность регистрирующих глубоководных модулей в открытом объеме воды и хорошее временное разрешение всей системы регистрации позволяют вести поиск ярких и протяженных объектов на очень высоком уровне чувствительности.

Поэтому Байкальский нейтринный телескоп, существенно уступая детектору SUPERKAMIOKANDE как инструмент для изучения потока атмосферных нейтрино, обладает несоизмеримо большими возможностями для исследования потока нейтрино сверхвысоких (свыше 10 ТэВ) энергий за счет использования огромного внешнего объема воды (масштаб мегатонн) как вещества мишени.

Заключим этот раздел отчета следующим образом. К 2011 году уровень знаний о диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий (10^13 – 10^18) эВ, о локальных источниках нейтрино с энергией свыше 10 ГэВ, о природном потоке быстрых магнитных монополей и о проявлениях массивных частиц темной материи был сформирован, главным образом, результатами экспериментальных исследований на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе НТ200, на детекторе AMANDA на Южном полюсе и (в последние 2009, 2010 годы) на детекторе ANTARES в Средиземном море. Ввод в строй в 2011 году детектора IceCube на Южном полюсе позволил, в ряде задач, поднять чувствительность экспериментальных исследований еще на один-два порядка величины. На повестке дня стоит задача создания в Северном полушарии детектора(ов) способного(ых) вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube. Дальше всех в решении этой задачи продвинулась сейчас Байкальская коллаборация, где завершается создание автономного кластера глубоководных гирлянд регистрирующих модулей - базового элемента детектора кубокилометрового масштаба НТ1000 (BAIKAL-GVD). Дальнейшее сохранение полноправных позиций Байкальского детектора в компании мировых лидеров будет уже зависеть от темпов реализации этого проекта.

Цели и задачи НИР 2014 года были определены в соответствии с государственным заданием поэтапного создания Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 и завершения создания в 2015 г. первого кластера телескопа из 8 гирлянд ОМ, а также проведения исследований в рамках проекта РФФИ. В течение года должны были быть решены следующие задачи:

- подготовка глубоководного оборудования и установка 2 гирлянд оптических модулей (по 24 ОМ в каждой) в составе экспериментального образца кластера создаваемого Байкальского нейтринного телескопа НТ1000;

- набор и первичный анализ данных кластера в составе 5 гирлянд оптических модулей за примерно 200 суток его работы;

- мониторинг значений гидрооптических параметров и уровня собственного свечения водной среды в расширенном (по сравнению с НТ200) диапазоне глубин в районе постановки нейтринного телескопа НТ1000 ;

- численное моделирование отклика установки в конфигурации 2014 г. на черенковское излучение вторичных ливней с энергией выше 10 ТэВ от потока нейтрино астрофизической природы с параметрами спектра, соответствующими данным эксперимента IceCube,

- моделирование отклика установки на мюоны и ливни от фоновых потоков атмосферных мюонов и атмосферных нейтрино;

- анализ данных кластера с целью получения углового распределения атмосферных мюонов и сравнения полученных результатов с теоретическими предсказаниями;

- предварительный анализ данных, накопленных при эксплуатации кластера, по программе поиска нейтрино от гамма-всплесков.

Методы проведения НИР. Природными источниками, инициирующими регистрируемые события в нейтринном телескопе, являются релятивистские мюоны и высокоэнергичные каскады элементарных частиц. С целью определения физических характеристик этих источников разработаны методы выделения физических событий из экспериментального набора данных нейтринного телескопа. Создана обширная библиотека расчетных программ, включающая в себя как программы моделирования процесса распространения черенковского излучения в прозрачных средах (в воде, во льду) и отклика фотоприемников нейтринного телескопа на это излучение, так и программы восстановления мюонных траекторий, а также координат и энергии высокоэнергичных ливней.

С целью анализа и оперативной обработки очень большого объема данных Байкальских нейтринных телескопов была реализована стандартная схема обработки данных BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software), которая выглядит как цепочка из независимых стандартных блоков, выполняющих конкретные действия над данными.

16.1 Результаты исследований

В 2014 году на комплексе установок Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (БГНТ) выполнялись экспериментальные исследования по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких (E>10 ТэВ) энергий, по поиску магнитных монополей и массивных частиц – кандидатов на роль холодной темной материи.

В период зимней экспедиции 2014 года выполнены работы по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной аппаратуры и подводных линий кабельной связи комплекса БГНТ. Развернут и введен в эксплуатацию на оз.Байкал в режиме тестирования и круглогодичного набора данных рабочий прототип кластера проектируемого нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба НТ1000 из пяти гирлянд по 24 оптических модулей (на базе ФЭУ R7081HQE) каждая. В составе кластера проходят натурные испытания новые элементы системы сбора данных, введенные в состав гирлянд на основании результатов годичной эксплуатации кластера 2013 года, ставящие целью снижение энергопотребления и повышение надежности.

Задачи 2014-го года с чистой совестью можно считать выполненными, вкладывая в эти слова тот смысл, что на вполне удовлетворительном уровне были проведены заключительные этапы подготовки к экспедиции на оз.Байкал 2014 года, что сама экспедиция была проведена в оптимальные сроки, что были выполнены (пусть и с некоторыми шероховатостями, неизбежными при сильной зависимости темпов работ от погодных условий) практически все основные пункты программы экспедиционных работ, что в 2014-м году был развернут и введен в эксплуатацию на оз.Байкал в режиме круглогодичного набора данных кластер в составе пяти двухсекционных гирлянд создаваемого нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба НТ1000, что по состоянию на 23 декабря 2014 года «живое время» работы установки составило 172-е суток, что выполнен предварительный анализ работы установки. В настоящее время близка к завершению подготовка аппаратуры кластера-2015 года в составе восьми гирлянд ОМ и ведутся ее лабораторные испытания. Подготовительные работы планируется завершить до конца января 2015 года.

В 2014 году завершен анализ экспериментальных данных нейтринного телескопа НТ200 в задаче поиска нейтринного сигнала от аннигиляции частиц темной материи в Солнце. Получены новые ограничения на величину дополнительных потоков мюонов и нейтрино, а также на величину сечения упругого рассеяния частиц темной материи на протонах для различных каналов аннигиляции, и в частности для канала аннигиляции в пару нейтрино-антинейтрино, который не исследовался ранее.

16.1 Практическое использование научных результатов

Результаты НИР 2014 года будут использованы в создании Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 и проведении наиболее актуальных исследований в области астрофизики элементарных частиц. Результаты исследований свечения вод озера Байкал найдут применение в изучении уникальной экосистемы озера.

16.1 Заключение

В результате выполненных НИР решены все задачи, определенные госзаданием и проектом РФФИ на 2014 г. как в части этапа создания телескопа НТ1000, так и в проведении исследований с использованием накопленных баз данных с получением результатов мирового уровня. Полученные результаты позволяют Лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий ИЯИ РАН сохранять лидирующую позицию в работах по созданию глубоководных нейтринных телескопов кубокилометрового масштаба в Северном полушарии.

16.1 Публикации

A.D.Avrorin et al., «Search for neutrino emission from relic dark matter in the Sun with the Baikal NT200 detector», arXiv:1405.3551v1 [astro-ph]

A.D.Avrorin et al., «Search for neutrino emission from relic dark matter in the Sun with the Baikal NT200 detector», Asnroparticle Physics, (2014), DOI information:10.1016/j.astropartphys.2014.07.006

16.1 Использованные источники

1.IceCube homepage. Available from: http://www.icecube.wisc.edu

2.Коллаборация “Байкал, Научно-Технический Проект Глубоководного Нейтринного Телескопа Кубокилометрового Масштаба на оз. Байкал. (2010), [http://baikalwebjinr.ru]

3.KM3NeT Coll., P.Baglay et al., Conceptual Design Report, ISBN 978-90-6488-031-5 (2008)

4.KM3NeT Coll., P.Baglay et al., Technical Design Report, ISBN 978-90-6488-033-9 (2010). Available from: http://www.km3net.org.

5.IceCube Coll., M.G.Aartsen et al., Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector, arXiv:1311:5238 [astro-ph.HE]

6.IceCube Coll., M.G.Aartsen et al., First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube, arXiv:1304:5303 [astro-ph]

7.IceCube Coll., M.G.Aartsen et al., Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Year of IceCube Data, arXiv:1405:5303 [astro-ph]

8.KM3NeT Coll., A. Magriotta, The KM3NeT deep-see neutrino telescope, arXiv:1408:1392 [astro-ph.IM].

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

По первой подтеме, «Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной и космологические следствия их рождения», в 2014 году главное внимание было уделено задаче получения

ограничений (основываясь на данных по поискам первичных чёрных дыр) на параметры некоторых моделей аксионной инфляции. Показано, что довольно сильные ограничения возникают на те космологические сценарии, в которых инфляционное расширение сопровождается рождением квантов калибровочных полей, приводящим, в свою очередь, к существенному росту амплитуды первичного спектра кривизны в области малых масштабов. В 2014 году опубликована статья в журнале Phys.Rev.D и сделан доклад на международном семинаре «Кварки2014» (соавторы – Э.В.Бугаев и П.А.Климай).

По второй подтеме, «Фотоядерные взаимодействия лептонов при сверхвысоких энергиях», в 2014 году велась работа по написанию обзора, содержащего результаты, полученные соавторами (Э.В.Бугаевым и Б.В.Мангазеевым) в течение последних нескольких лет. Обзор опубликован в журнале Phys.Rev.D.

16.2 Публикации

1. E.V.Bugaev and P.A.Klimai, Axion inflation with gauge field production and primordial black holes, Phys.Rev.D90(2014)10,103501
2. P.A.Klimai and E.V.Bugaev, Primordial black hole constraints on some models of dissipative inflation, talk at Quarks-2014, будет опубликовано в журнале ЭЧАЯ
3. E.V.Bugaev and B.V.Mangazeev, Vector meson dominance and deep inelastic scattering at low and medium Q squared, e-print, arXiv:1404.4202[hep-ph]
4. E.V.Bugaev and B.V.Mangazeev, Vector meson dominance and deep inelastic scattering at low and medium Q**2, Phys.Rev.D90(2014)014026

17 Лаборатория фотоядерных реакций

Руководитель работ проф. В.Г.Недорезов.

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.

Физика атомного ядра, динамика ядерных и фотоядерных реакций, физика радионуклидов и тяжёлых ионов.

Нейтронная физика, технология интенсивных источников нейтронов, исследование конденсированных сред, радиационное материаловедение.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер; исследование свойств адронов в ядерной среде, изучение их связанных состояний (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра). Руководители работ д.ф.-м.н. Г.М.Гуревич, к.ф.-м.н. В.П.Лисин.

Изучение нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках релятивистских ионов, электронов и фемтосекундных тераваттных лазеров. Руководители работ к.ф.-м.н. А.М.Лапик, к.ф.-м.н. А.Е.Туринге.

Исследование свойств гигантских резонансов в ядрах. Руководители работ к.ф.-м.н. Б.А.Тулкпов, д.ф.-м.н. Б.С.Долбилкин, к.ф.-м.н. Л.З.Джилавян.

Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8. Руководители работ к.ф.-м.н.Г.В.Солодухов, д.т.н. А.В.Андреев.

Разработка методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях. Руководитель работ к.ф.-м.н. Л.З.Джилавян

Исследования по физике фотоядерных взаимодействий (изучение спиновых эффектов и ненуклонных степеней свободы атомных ядер).

Основные исполнители:

Гуревич Григорий Манович	д.ф.-м.н.	зав. сект.
Джилавян Леонид Завенович	к.ф.-м.н.	с.н.с
Долбилкин Борис Сергеевич	д.ф-м.н.,	в.н.с.
Кондратьев Рудольф Леонидович	к.ф-м.н.,	с.н.с
Лапик Александр Михайлович		н.с.
Лисин Валерий Павлович	к.ф-м.н	зав.сект.
Мушкаренков Александр Николаевич	к.ф-м.н	н.с.
Недорезов Владимир Георгиевич	д.ф.-м.н.	зав.лаб.
Полонский Андрей Леонидович	к.ф-м.н.,	н.с.
Руднев Николай Вячеславович		м.н.с.
Русаков Артур Владимирович		н.с.
Солодухов Геннадий Васильевич	к.ф-м.н	зав.сект.
Сорокин Юрий Иванович	к.ф-м.н	н.с.
Тулупов Борис Алексеевич	к.ф-м.н	с.н.с
Туринге Андрей Арисович	к.ф-м.н	с.н.с.

17 Реферат

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР, НУКЛОН, ФОТОН, МЕЗОН

В отчёте приведены новые результаты, полученные в 2014 году в лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН по физике электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер. Особое внимание уделено изучению поляризационных эффектов и спиновой структуры нуклонов. Начато изучение нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках электронов, релятивистских ионов и фемтосекудных тераваттных лазеров. Все приведенные в отчете результаты являются новыми и соответствуют мировому уровню.

Цель работы: прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер; исследование свойств адронов в ядерной среде, изучение их связанных состояний (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра); изучение нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках релятивистских ионов, электронов и фемтосекудных тераваттных лазеров

17 Введение

За последние годы изучение электромагнитных взаимодействий ядер в ведущих научных центрах США, Японии, Германии и других стран характеризовалось существенным расширением тематики исследований и применением новых методов. Это включало в себя прецизионное измерение амплитуд фоторождения мезонов на свободных и связанных нуклонах, изучение спиновых структурных функций и формфакторов нуклонов, исследование коллективных возбуждений ядер (гигантских резонансов), фото – и электроделения ядер. Эксперименты выполнялись на пучках реальных и виртуальных фотонов, релятивистских ионов и фемтосекундных лазеров с большой импульсной мощностью. На этой основе развивались прикладные исследования с использованием фотоядерных методов для создания систем безопасности, детектирования взрывчатых веществ и делящихся материалов, медицинской диагностики и др. В настоящем отчете приведены результаты исследований, выполненных в лаборатории фотоядерных реакции ИЯИ РАН в рамках указанной тематики по следующим направлениям исследований:

- Электромагнитные взаимодействия нуклонов и ядер; свойства адронов и их связанных состояний в ядерной среде (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра).

- Свойства гигантских резонансов в ядрах.

- Нелинейные эффекты квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках релятивистских ионов, электронов и фемтосекундных тераваттных лазеров.

- Методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях.

- Источник медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8.

17 Результаты исследований

1. В международном эксперименте, выполненном коллаборацией A2 на пучке поляризованных фотонов от ускорителя MAMI с использованием поляризованной протонной мишени ОИЯИ-ИЯИ (рис. 1), впервые определены все четыре спиновые поляризуемости протона γ_{E1E1}, γ_{M1M1}, γ_{E1M2}, γ_{M1E2}, которые описывают воздействие внешнего электромагнитного поля на спиновую структуру протона. Определение этих фундаментальных структурных констант дает новую фундаментальную информацию о строении ядерной материи на уровне нуклонных степеней свободы.

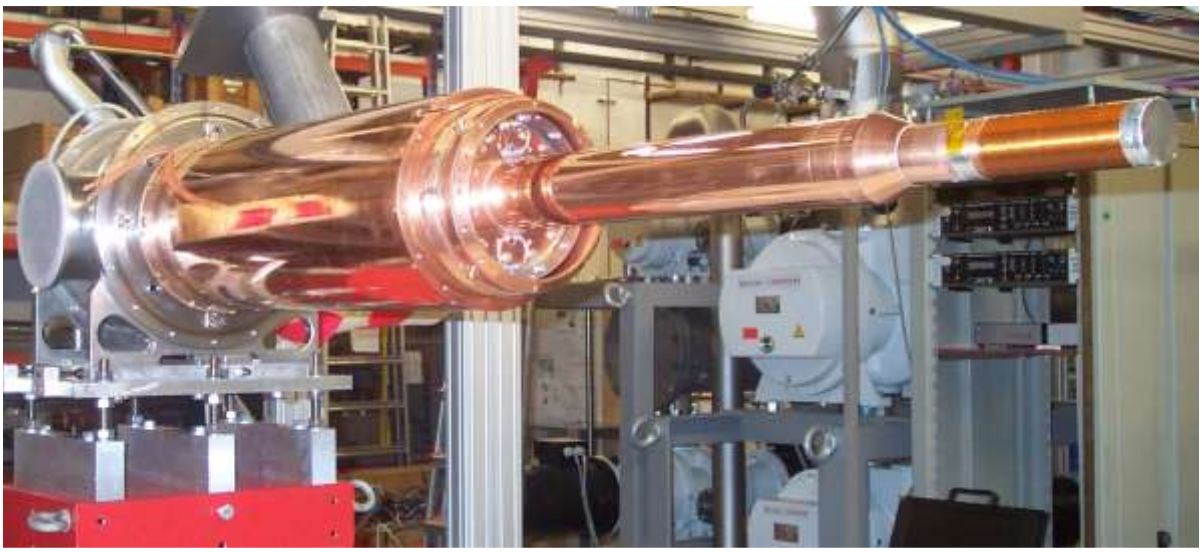


Рисунок. 1. Поляризованная мишень с рекордными на мировом уровне параметрами - российский вклад в эксперимент

2. На ускорителе MAMI C впервые измерена передача поляризации от пучка поляризованных фотонов нуклону отдачи. В этих измерениях использована принципиально новая методика спиновой поляриметрии продуктов реакции, которая может быть применена во многих других экспериментах в ядерной и адронной физике.

3. Выполнены измерения пучковой асимметрии в фоторождении пар $\pi^0\pi^\pm$ на свободных протонах, квазисвободных протонах и нейтронах при энергиях фотонов до 1,4 ГэВ. В случае нейтрона измерения проведены в квазисвободной кинематике для нейтронов, связанных в дейтроне.

4. Коллаборацией A2 на ускорителе MAMI C впервые в мире выполнены прецизионные измерения угловых распределений для фоторождения π^0-мезонов на нейтронах, связанных в дейтроне. Измерения выполнены при энергиях гамма-квантов 0.45-1.4 ГэВ с использованием 4π-детектора Crystal Ball-TAPS. Полученные данные позволяют осуществить выбор наиболее реалистичной теоретической модели для описания этой реакции.

5. Из измерений порога реакции $\gamma p \to \eta p$, выполненных на ускорителе MAMI с использованием системы мечения гамма-квантов по энергии, обладающей повышенным энергетическим разрешением, получено новое прецизионное значение массы η-мезона, равное m_η = (547.851 ± 0.031стат. ± 0.062сист.) МэВ.

6. На ускорителе MAMI исследован распад $\eta \to e+e-\gamma$ в реакции $\gamma p \to \eta p$ с использованием мультифотонных спектрометров Crystal Ball и TAPS. В этих измерениях экспериментальная статистика на порядок выше, чем в любом из предыдущих измерений. Полученная величина параметра наклона Λ-2 для η-формфактора хорошо согласуется с теоретическими расчетами.

7. Коллаборацией A2 на ускорителе MAMI C выполнены измерения сечений когерентного фоторождения пионов на ядрах ^{208}Pb, из которых впервые получена информация о размере и форме поверхностного слоя ядра, обогащенного нейтронами. Результаты указывают, что скин-слой ядра ^{208}Pb имеет характер гало. Эти измерения дают важные новые ограничения для моделей, описывающих структуру ядер и уравнение состояния нейтронной материи.

8. Выполнены измерения сечений реакций $\gamma p \to K^+\Lambda$ и $\gamma p \to K^+\Sigma^0$ с использованием новой методики идентификации K^+-мезона, в которой выделение продуктов слабого распада осуществляется по энергетическим и временным характеристикам энерговыделения в калориметре Crystal Ball. Такая методика может быть использована и в экспериментах на других установках. Высокое энергетическое разрешение и статистическая точность новых данных позволяют осуществить анализ в рамках приближения парциальных волн с целью лучшего определения спектра возбуждений нуклона. Новый анализ не подтверждает важную роль кварк-дикварковой динамики в нуклоне.

9. На ускорителе MAMI C с использованием жидкодейтериевой мишени измерены дифференциальные и полные сечения квазисвободных реакций $\gamma p \to \eta p$ и $\gamma n \to \eta n$. Сечения рождения η-мезонов были измерены в совпадении с протонами отдачи, нейтронами отдачи и в инклюзивной моде, что позволило контролировать внутреннюю согласованность данных. Полученные результаты имеют значительно лучшую статистическую точность по сравнению с предыдущими измерениями, согласуются с известным значением отношения сечений на протоне и нейтроне в максимуме резонанса $S_{11}(1535)$ и подтверждают существование пика при энергии 1670 МэВ в нейтронном сечении, который отсутствует для протона.

10. В эксперименте на пучке циркулярно поляризованных меченых фотонов от ускорителя MAMI C с использованием поперечно поляризованной протонной мишени с замороженными спинами и детектирующей системы Crystal-Ball/TAPS получены новые данные для поперечной мишенной асимметрии T и первые данные для асимметрии пучок-мишень F в реакции $\gamma p \to \eta p$ при энергиях в системе центра масс до 1.9 ГэВ. Существующие модельные предсказания не согласуются с новыми данными, что указывает на важную роль учета в теории внутренней динамики процесса фоторождения η-мезона.

11. Впервые измерены спиновые зависимости дифференциальных сечений полуинклюзивных реакций $\gamma\ ^3\mathrm{He} \to \pi^0\ X$ и $\gamma\ ^3\mathrm{He} \to \pi^\pm\ X$ в диапазоне энергий 200-450 МэВ. Эксперимент выполнен на ускорителе MAMI с использованием продольно поляризованной газовой мишени ^{3}He. Результаты сравнивались с теоретическими расчетами на основе модели Фикса-.Аренхофеля, в результате чего получена новая информация о механизме фоторождения пионов на ^{3}He.

12. В рамках программы «полного опыта» коллаборацией A2 проведены два экспериментальных сеанса (январь-февраль и апрель-май 2014 г.) по измерению поляризационных наблюдаемых E и G в фоторождении мезонов и мезонных пар на протоне с использованием пучка циркулярно и линейно поляризованных фотонов с максимальной энергией 1.5 ГэВ от ускорителя MAMI C и мишени с продольной поляризацией протонов. Кроме того, в ходе второго сеанса впервые измерена спиновая асимметрия Σ_{2z} сечения комптоновского рассеяния на протоне в области $\Delta(1232)$-резонанса. Эти измерения в сочетании с выполненными ранее дают полный набор спиновых асимметрий, необходимый для извлечения четырех спиновых поляризуемостей протона с малыми погрешностями.

13. Разработанная недавно дисперсионная частично-дырочная оптическая модель применена для исследования высокоэнергетических гигантских резонансов в ядрах. Описаны простейшие фотоядерные реакции (полное сечение фотопоглощения, прямые + полупрямые фотонейтронные и обратные реакции, сопровождающиеся возбуждением изовекторных гигантских дипольного и квадрупольного резонансов в среднетяжелых сферических ядрах), а также исследована двойная переходная плотность изоскалярного монопольного резонанса, имеющая большое значение для определения ядерной сжимаемости.

14. Для области энергий, характерной для возбуждения $E1$-гигантских резонансов в атомных ядрах, выполнен анализ потоков и спектров квазимонохроматических фотонов – продуктов аннигиляции позитронов на лету с электронами мишеней.

15. Подтверждена обоснованность нахождения вкладов, вызванных тормозными фотонами от позитронов, из данных с тормозными фотонами от электронов для тех же радиаторов, при исследованиях $E1$ гигантского резонанса с помощью квазимонохроматических аннигиляционных фотонов. Дано сопоставление фотоядерных реакций под действием как тормозных фотонов, так и электронов или позитронов в смысле возможностей разделения вкладов изовекторных $E1$ и $E2$ гигантских резонансов.

16. Изучены различия в оценках параметров $E1$ гигантского резонанса, связанные с использованием различных моделей, описывающих форму тормозного спектра (Шифф, Зельцер и Бергер).

17. При энергиях падающих фотонов E_γ = 4÷46 МэВ измерено сечение реакции $^{115}\mathrm{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\mathrm{In}$. Уточнены параметры пика в этом сечении при $E_\gamma \cong 9$ МэВ. Ранее в литературе было заявлено о существовании второго пика в сечении этой реакции при $E_\gamma \sim 27$ МэВ с интегральным сечением, многократно большим, чем у первого пика, чему, несмотря на различные попытки, не удавалось найти разумное объяснение. Проведенные измерения

показали, что при E_γ ~ 27 МэВ отсутствует пик с интегральным сечением $\sigma_{инт}$, большим $0.2\sigma_{инт}$ для пика при $E_\gamma \cong 9$ МэВ.

18. Измерены выходы фотоядерных реакций на естественной смеси изотопов титана под действием пучка тормозных γ-квантов с верхней границей 55 МэВ. Полученные результаты сравниваются с расчётами на основе модели TALYS. Показано, что для описания сечений фотоядерных реакций на изотопах Ti необходимо учитывать изоспиновое и конфигурационное расщепление $E1$ гигантского резонанса.

19. Получен патент на способ наработки радиоизотопов для целей ядерной медицины (совместно с ФИАН им.П.Н. Лебедева и НИИЯФ МГУ им. Ломоносова) на ускорителях электронов с энергией E_e = 55 МэВ и средним током пучка I ~ 40 мкА. Показано, что в результате облучения мишени из NaOH толщиной 10 г/см^2 в течение времени τ ~ 5.5 час возможно получение радиоизотопа ^{18}F в водном растворе с полной активностью A ~ (40÷60) мКи и удельной активностью a ~ (2÷3) мКи/мл. Указанный изотоп предназначен для использования в позитронно – эмиссионных томографах (рис. 2).

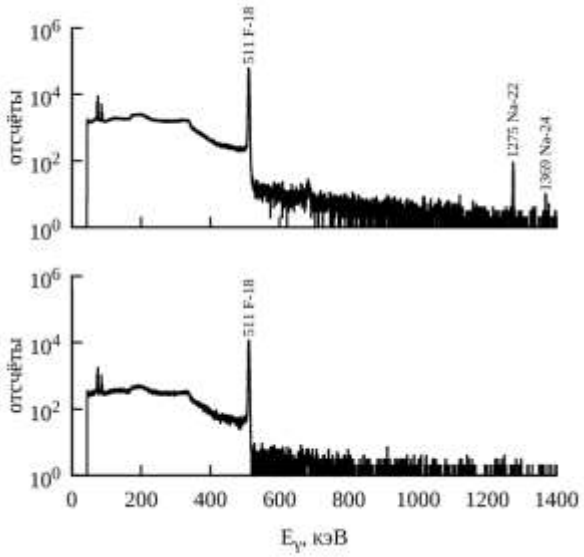


Рисунок 2. γ- спектр облученной мишени (вверху) и выделенного препарата (внизу).

20. Измерены дозы ионизирующего излучения от имитаторов багажа авиапассажиров после их облучения в условиях, соответствующих облучению при прохождении досмотра в фотоядерном детекторе взрывчатых веществ. Показано, что ионизирующее излучение, обусловленное наведенной активностью, не представляет опасности ни для населения, ни для персонала аэропорта.

21. Получен патент США на устройство для детектирования и идентификации материалов, содержащих углерод и азот. Устройство использует фотоядерные реакции,

ведущие к образованию характерных ультракороткоживущих радиоизотопов, и состоит из разрезного микротрона, тормозной мишени и наполненного водой Черенковского счетчика.

22. Проведены измерения выхода реакции ^{48}Ti(γ, p), приводящей к образованию радиоизотопа ^{47}Sc ($T_{1/2}$ ≅ 3.3492 сут), представляющего большой интерес для радиоиммунотерапии в ядерной медицине. Результаты этих измерений позволяют считать весьма перспективным получение этого радиоизотопа на ускорителях электронов.

23. Получен патент на способ генерации медицинских радиоизотопов на ускорителях электронов в фотоядерных реакциях с образованием химических элементов, отличающихся от химических элементов мишени.

24. Проведены исследования генерации быстрых электронов и фотонов с энергией до нескольких МэВ в твердотельных мишенях на фемтосекундных лазерно-плазменных источниках.

17 Заключение

Поставленные перед лабораторией фотоядерных реакций ИЯИ РАН на 2014 год задачи следует считать выполненными. Среди важных результатов, полученных в 2014 году, можно отметить следующие:

1. В результате международного эксперимента, выполненного коллаборацией A2 на пучке поляризованных фотонов от ускорителя MAMI с использованием поляризованной протонной мишени ОИЯИ-ИЯИ, впервые определены все четыре спиновые поляризуемости протона γ_{E1E1}, γ_{M1M1}, γ_{E1M2}, γ_{M1E2}, которые описывают воздействие внешнего электромагнитного поля на спиновую структуру протона. Определение этих фундаментальных структурных констант дает новую фундаментальную информацию о строении ядерной материи на уровне нуклонных степеней свободы.

2. Получен патент на способ наработки радиоизотопов для целей ядерной медицины (совместно с ФИАН им.П.Н. Лебедева и НИИЯФ МГУ им.Ломоносова) на ускорителях электронов с энергией E_e = 55 МэВ и средним током пучка I ~ 40 мкА. Показано, что в результате облучения мишени из NaOH толщиной 10 г/см^2 в течение времени τ ~ 5.5 час возможно получение радиоизотопа ^{18}F в водном растворе с полной активностью A ~ (40÷60) мКи и удельной активностью a ~ (2÷3) мКи/мл. Указанный изотоп предназначен для использования в позитронно – эмиссионных томографах.

Среди общих тенденций в исследовании электромагнитных взаимодействий ядер можно отметить расширение тематики за счет новых методов, связанных использованием фотонов, электронов и тяжелых ионов, а в последние годы - фемтосекундных лазерных

импульсов. Примером этому служат международные проекты, реализуемые в США (JLab, MIT, BNL) , Европе (ELI-NP, DESY, MAMI, FAIR), Японии (Spring-8) и др. В составе крупных коллабораций на ускорителях MAMI (Майнц) , ELSA (Бонн) активно работают сотрудники лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН. Полученные методические и научные результаты делают ИЯИ РАН одним из мировых лидеров в указанной области. Эти результаты регулярно обсуждаются на международных семинарах по электромагнитным взаимодействиям ядер (ЕМИН), которые проводятся в лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН. Очередной семинар запланирован на октябрь 2015 г. Сотрудники лаборатории регулярно приглашаются с докладами на ведущие конференции по указанной тематике. Подробная информация о деятельности лаборатории содержится на сайте www.inr.ac.ru/~pnlab.

17 Публикации

- реферируемые журналы (включая работы, принятые к печати):

1. Г.М.Гуревич. Измерение спиновых поляризуемостей протона. Ядерная физика, 77, 1 (2014) 113-119.

2. Г.М.Гуревич. Активная поляризованная мишень: измерение спиновых поляризуемостей протона. Письма в ЭЧАЯ, 11, 1(185) (2014) 57-65.

3. G.M.Gurevich. Measurement of spin polarizabilities of the proton. Physics of atomic nuclei, 77, 1 (2014) 110-116.

4. G.M.Gurevich. Active Polarized Target: Measurement of Proton Spin Polarizabilities. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 31–35.

5. C. S. Akondi, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of the Transverse Target and Beam-Target Asymmetries in η Meson Photoproduction at MAMI. Phys. Rev. Lett. 113, 102001 (2014).

6. M.H. Sikora, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of the $^{1}H(\gamma,p)\pi^{0}$ reaction using a novel nucleon spin polarimeter. PRL 112, 022501 (2014).

7. M. Oberle, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of the beam-helicity asymmetry I^{O} in the photoproduction of $\pi^{0}\pi^{\pm}$-pairs off protons and off neutrons. EPJ A 50 (2014) 54.

8. M.Dieterle, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Photoproduction of π^{0}-mesons off neutrons in the nucleon resonance region. Phys. Rev. Let. 112, 142001 (2014).

9. A.Nikolaev, R Kondratiev, V.Lisin, A.Polonski et al. Determination of the η mass with the Crystal Ball at MAMI-B. Eur.Phys. Journ. A 50 (2014) 58.

10. P.Aguar-Bartolomé, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. A new determination of the η transition form factor in the Dalitz decay η→e+e−γ with the Crystal Ball/TAPS detectors at the Mainz Microtron. Phys. Rev. C 89, 044608 (2014).

11. C.M. Tarbert, R Kondratiev, V.Lisin, A.Polonski et al. The neutron skin of ^{208}Pb from coherent pion photoproduction. Phys. Rev. Let. 112, 242502 (2014).

12. T.C.Jude, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of $K^+\Lambda$ and $K^+\Sigma^0$ photoproduction with fine center-of-mass energy resolution. Phys. Lett. B 735 (2014) 112.

13. D. Werthmüller, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Quasifree photoproduction of η-mesons off protons and neutrons. Phys.Rev. C 90, 015205 (2014).

14. S.Constanza, A.Mushkarenkov, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Polonski et al. Helicity dependence of the γ ^{3}He-> πX reaction in the D(1232) resonance region. Eur. Phys. Journ. A50 (2014) 173.

15. B.M.K.Nefkens, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. A new measurement of the rare decay η --> $\pi^0\gamma\gamma$ with the Crystal Ball/TAPS detectors at the Mainz Microtron. Phys. Rev. C (in print).

16. S.Constanza, A. Mushkarenkov, R Kondratiev, V.Lisin, A.Polonski et al. Helicity dependence of the γ ^{3}He-> πX reaction in the D(1232) resonance region. Eur.Phys. Journ. A (in print).

17. P.P. Martel, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurements of the proton spin-polarizabilities with double-polarized Compton scattering. Phys. Rev. Let. (in print).

18. C.S.Akondi, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. First measurement of target and beam-target asymmetries in the $\gamma p\to\pi^0\eta p$ reaction. Phys. Rev. C (in print).

19. V. L. Kashevarov, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Target and beam-target asymmetry for $\gamma p\to \pi^0\pi^0 p$. Phys. Rev. Let. (in print).

20. N.S.Borisov, G.M.Gurevich, R.L.Kondratiev et al. The Frozen-spin target at MAMI. Nucl. Instr. and Meth. A (in print).

21. I.I.Strakovsky, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Photoproduction of the ω meson near threshold. Phys. Rev. Let. (in print).

22. С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, А.С. Курилик, В.В. Ханкин, В.И. Шведунов. Измерения выходов фотоядерных реакций на природном титане при $(E_\gamma)_{макс} \approx$ 55 МэВ. Изв. РАН. Сер. физ. 2014, Т. 78, № 11, С. 1420–1424.

23. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, B.S. Ishkhanov, A.S. Kurilik, V.V. Khankin, and V.I. Shvedunov. Measuring the yield of photonuclear reactions in natural titanium at $(E_\gamma)_{max} \approx 55$ MeV. Bull.Russ.Acad. Sci. Phys., 2014, Vol. 78, No. 11, pp. 1153–1157.

24. Л.З. Джилавян. Потоки и спектры квазимонохроматических аннигиляционных фотонов для исследований E1-гигантских резонансов в атомных ядрах. Ядерная физика, 2014, Т. 77, №12, с. 1578–1590.

25. L.Z. Dzhilavyan. Fluxes and Spectra of Quasimonochromatic Annihilation Photons for Studying E1 Giant Resonances in Nuclei. Physics of Atomic Nuclei, 2014, Vol. 77, No. 12, pp. 1383-1395.

26. Л.З. Джилавян. Сопоставление реальных тормозных фотонов от электронов и позитронов и виртуальных фотонов в электрон- и позитрон- ядерных реакциях для задач исследования гигантских резонансов. Известия РАН. Серия физическая, 2014, Т. 78. № 5, С. 635–641.

27. L.Z. Dzhilavyan. Comparing Real Bremsstrahlung Photons from Electrons and Positrons and Virtual Photons in Electron–Nuclear and Positron–Nuclear Reactions for Studies of Giant Resonances. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2014, V. 78, No. 5, P. 445–451.

28. Л.З. Джилавян. Экспериментальные параметры изовекторного E1 гигантского резонанса в зависимости от корректности учета спектров тормозных фотонов. Известия РАН. Серия физическая (в печати).

29. L.Z. Dzhilavyan. Experimental parameters of the isovector E1 giant resonance in dependence on correctness of taking into account bremsstrahlung spectra. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics (in print).

30. Л.З. Джилавян. Сечение реакции $^{115}In(\gamma, \gamma')^{115m}In$ в области E1 гигантского резонанса. Ядерная физика (в печати).

31. L.Z. Dzhilavyan. Cross sections of the reaction $^{115}In(\gamma, \gamma')^{115m}In$ in the E1 giant resonance region. Physics of Atomic Nuclei (in print).

32. С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, А.А. Кузнецов, А.С. Курилик, В.В. Ханкин. Фотоядерные реакции на изотопах титана $^{46-50}Ti$. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2014. № 5, С. 3-12.

33. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, A.A. Kuznetsov, A.S. Kurilik, V.V. Khankin. Photonuclear reactions on isotopes of titanium 46-50Ti. Moscow University Physics Bulletin 2014. N 5. P. 3-12.

34. С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, А.А. Кузнецов, В.Н. Орлин, К.А. Стопани. Фотоядерные реакции на изотопах титана. Ядерная физика (в печати).

35. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, A.A. Kuznetsov, V.N. Orlin, K.A. Stopani. Photonuclear reactions on titanium isotopes. Physics of Atomic Nuclei (in print).

36. Р.А. Алиев, С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, В.В. Ханкин, В.И. Шведунов. Исследование возможностей получения и выделения радиоизотопа ^{18}F на ускорителях электронов. Вестник МГУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2014, № 3. С. 29-32.

37. R.A. Aliev, S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, B.S. Ishkhanov, V.V. Khankin, and V.I. Shvedunov. Study of the possibility of the production and separation of the ^{18}F radioisotope at electron accelerators. Moscow University Physics Bulletin, 2014, Vol. 69, No. 3, pp. 233–236.

38. А.И. Карев, В.Г. Раевский, С.Н. Черепня, Л.З. Джилавян, С.С. Белышев, А.Н. Ермаков, Б.С. Ишханов, В.В. Ханкин, Н.И. Пахомов, В.И. Шведунов, В.А. Берлянд. Радиационная безопасность багажа, досмотренного в аэропортах фотоядерными детекторами взрывчатых веществ. Известия РАН. Серия физическая, 2014, Т. 78. № 5. С. 642–646.

39. A.I. Karev, V.G. Raevsky, S.N. Cherepnya, L.Z. Dzhilavyan, S.S. Belyshev, A.N. Ermakov, B.S. Ishkhanov, V.V. Khankin, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, and V.A. Berlyand. Radiation Safety of Luggage Inspected for Explosive Materials by Photonuclear Detectors in Airports. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2014, Vol. 78, No. 5, pp. 452–455.

40. Р.В. Волков, К.А. Иванов, А.Б. Савельев-Трофимов, Д.С. Урюпина, С.А. Шуляпов, Р.М. Джилкибаев, В.Г. Недорезов, А.В. Русаков, А.А. Туринге, А.В. Брантов, В.Ю. Быченков. Новые фотоядерные методы на основе фемтосекундных лазеров. Письма в ЭЧАЯ, Дубна 2014, Т.11, №1(185), с. 91-100.

41. R.V. Volkov, K.A. Ivanov, A.B. Savel’ev, D.S. Uryupina, S.A. Shulyapov, R.M. Dzhilkibaev, D.P. Zagorodnyuk, A.M. Lapik, V.G. Nedorezov, A.V. Rusakov, A.A. Turinge[2], A.V. Brantov, V.Yu. Bychenkov. New photonuclear methods based on femtosecond lasers. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 54-59.

42. K. A. Ivanov, S. A. Shulyapov, P. A. Ksenofontov, I. N. Tsymbalov, R. V. Volkov, A. B. Savel'ev, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov, A. A. Turinge, A. M. Lapik, A. V. Rusakov, R. M. Djilkibaev, and V. G. Nedorezov. Comparative study of amplified spontaneous emission and short pre-pulse impacts onto fast electron generation at sub-relativistic femtosecond laser-plasma interaction. Phys. Plasmas 21, 093110 (2014).

43. Б.А.Тулупов, М.Г.Урин. “Полумикроскопическое описание релаксации изовекторного гигантского дипольного резонанса в "жестких" сферическских ядрах ”, Вестник национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" 3, с. 389-398, (2014).

44. B.A.Tulupov, M.H.Urin. "Description of the simplest photonuclear reactions within the particle-hole dispersive optical model", Phys.Rev. C 90, 034613 (2014)

45. М.Л.Горелик, Ш.Шломо, Б.А.Тулупов, М.Г.Урин. "О свойствах высокоэнергетических изоскалярных возбуждений в среднетяжелых сферических ядрах", ЯФ (принята к печати).

46. M.L.Gorelik, S.Shlomo, B.A.Tulupov, M.H.Urin. " On properties of high-energy isoscalar monopole excitations in medium-heavy mass spherical nuclei", Phys.At.Nucl. (принята к печати).

47. V. Vegna, A. Lapik, A.Mushkarenkov, V. Nedorezov, A. Ignatov, A.Turinge, N.Rudnev, e.a. . Measurement of the Σ beam asymmetry for the ω photo-production off the proton and the neutron at GRAAL. Submitted to PR C 2013 e-Print: arXiv:1306.5943

48. B.Bantes, A.N. Mushkarenkov, V.G.Nedorezov, N.V. Rudnev, A.N.Turinge e.a. The BGO-OD experiment at ELSA. International Journal of Modern Physics: Conference Series Vol. 26 (2014) 1460093.

49. G. Mandaglio, .. A.N. Mushkarenkov, V.G.Nedorezov, N.V. Rudnev, A.N.Turinge e.a. Beam asymmetry □ of _□0 photoproduction off the proton at GRAAL experiment. EPJ Web of Conferences , EDP Sciences (2014) . in publ.

50. G. Mandaglio, .. A.N. Mushkarenkov, V.G.Nedorezov, N.V. Rudnev, A.Turinge e.a. Photoproduction off the proton analysis and preliminary beam asymmetry results at GRAAL experiment EPJ Web of Conferences , EDP Sciences (2014) . in publ.

51. В. А. Басков, А. В. Кольцов, А. И. Львов, А. И. Лебедев, Л. Н. Павлюченко, В. В.Полянский, Е. В. Ржанов, С. С. Сидорин, Г. А. Сокол, С. В. Афанасьев, А. И. Малахов, А. С. Игнатов, В. Г. Недорезов. Исследование эта-мезонных ядер на электронном синхротроне ФИАН. Ядерная физика (2014) в печати.

52. Ю.И. Сорокин «Спин фотона, ширина осцилляторного уровня и структура гигантского резонанса» «Ядерная физика»,2014, в печати.

- доклады на конференциях и школах:

1. V.Nedorezov, Multi - Fragmentation of Nuclei by Photons: New Approaches and Results. XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems 15-20 September 2014 JINR, Dubna, Russia. Пленарный доклад.

2. Недорезов В.Г., Пшеничнов И.А., Туринге А.А., Лапик А.М. Мультифрагментация ядра углерода фотонами с энергией 700 – 1500 МэВ. Новые данные эксперимента GRAAL. Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН (Москва, 17-21 ноября 2014 г.).

3. V.G.Nedorezov, A.B.Savel'ev. Laser Compton Scattering Photon Beams and Other Gamma-ray Sources. Proc. Of the conf. Nuclear Physics and gamma-ray sources for nuclear security and nonproliferation. Japan (2014), Word Sci. (2014) p.243-255.

4. I.Pshenichnov, A.Turinge, V.Nedorezov. Multifragment break-up of 12C in photonuclear reactions: теоретические аспекты. International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems 15-20 September 2014 JINR, Dubna, Russia.

5. G.M.Gurevich. "Complete experiment" in meson photoproduction. 64 International conference NUCLEUS-2014 (Минск, 1-4 июля 2014 г.). Book of abstracts, p. 46 (2014).

6. B.A.Tulupov, M.H.Urin. The particle-hole dispersive optical model and its application to the description of the simplest photonuclear reactions. 64 International conference NUCLEUS-2014 (Минск, 1-4 июля 2014 г.).

7. Gorelik M.L., Shlomo S., Tulupov B.A., Urin M.H. On properties of high-energy isoscalar monopole (p-h)-type excitations in medium-heavy mass spherical nuclei. 64 International conference NUCLEUS-2014 (Минск, 1-4 июля 2014 г.).

8. Г.М.Гуревич. Первое измерение спиновых поляризуемостей протона. Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН (Москва, 17-21 ноября 2014 г.).

9. Л.З.Джилавян. Экспериментальные исследования сечения реакции ^{115}In(γ, γ′)^{115m}In в области E1 гигантского резонанса. Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН (Москва, 17-21 ноября 2014 г.).

10. Иванов К.А., Шуляпов С.А., Русаков А.В., Лапик А.М., Цымбалов И.Н., Туринге А.А., Джилкибаев Р.М., Зарубин П.И., Савельев-Трофимов А.Б. и Недорезов В.Г. Генерация гамма-излучения и ускорение электронов при воздействии релятивистски-интенсивного фемтосекундного лазерного излучения на металлическую мишень. Доклад на Международной сессии-конференции СЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» НИЯУ МИФИ, Москва, 2014.

11. Г.В.Солодухов и др. Источник нейтронов на основе ускорителя ЛУЭ-8_5, фотонейтронной W-Be мишени и замедлителя-формирователя нейтронного спектра. Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН (Москва, 17-21 ноября 2014 г.).

12. В.Г. Недорезов, А.Б. Савельев-Трофимов, Р.В. Волков, К.А. Иванов, Д.С. Урюпина, С.А. Шуляпов, Р.М. Джилкибаев, А.В. Русаков, А.А. Туринге, А.В. Брантов, В.Ю. Быченков. "Фотонные пучки, полученные методом обратного комптоновского рассеяния и другими методами. Проект источника когерентных гамма-квантов на базе фемтосекундного лазера

МЛЦ МГУ". Седьмые Черенковские чтения «Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц», Москва, ФИАН, 15 апреля 2014 г.

13. Andreev A.V, Ilic R.D., Konobeevsky E.S., Latysheva L.N., Sobolevsky N.M., Solodukhov G.V., Zuyev S.V. Optimization of a Photoneutron W-Be-source of thermal neutrons. Тезисы доклада на Международной конференции «Ядро 2014», Минск, 2014 г.

14. L.Z. Dzhilavyan. Experimental parameters of the isovector *E*1 giant resonance in dependence on correctness of taking into account bremsstrahlung spectra. Book of abstracts LXIV International Conference “Nucleus 2014”. Minsk. Publishing center of BSU. 2014. P. 66.

15. L.Z. Dzhilavyan. «Cross sections of the reaction ^{115}In(γ, γ′)^{115m}In in the *E*1 giant resonance region». Book of abstracts LXIV International Conference “Nucleus 2014”. Minsk. Publishing center of BSU. 2014. P. 100.

16. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, B.S. Ishkhanov, A.S. Kurilik, V.V. Khankin, V.I. Shvedunov. “Yields and cross-sections of the (γ, n) and (γ, p) reactions on the Ti isotopes in the GDR region”. Book of abstracts LXIV International Conference “Nucleus 2014”. Minsk. Publishing center of BSU. 2014. P. 111.

- препринты:

1. P.P. Martel, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurements of the Proton Spin-Polarizabilities with Double-Polarized Compton Scattering. arXiv:1408.1576v1 [nucl-ex] 7 Aug 2014.

2. C. S. Akondi, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of the Transverse Target and Beam-Target Asymmetries in η Meson Photoproduction at MAMI. arXiv:1408.3274v1 [nucl-ex] 14 Aug 2014.

3. T.C.Jude, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of $K^+\Lambda$ and $K^+\Sigma^0$ photoproduction with fine center-of-mass energy resolution. http://arxiv.org/pdf/1308.5659.pdf

- патенты :

1. United States Patent. A.I. Karev, V.G. Raevsky, S.N. L.Z. Dzhilavyan, V.D. Laptev, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, V.I. Rykalin, L.J. Brothers. L.K. Wilhide. Device for detection and identification of carbon- and nitrogen-containing materials. Partent No.: US 8,681,939 B2. Date of Patent: Mar. 25, 2014.

2. Л.З. Джилавян, А.И. Карев, В.Г. Раевский. Способ генерации медицинских радиоизотопов. Патент № RU 2500429 C2 (10.12.2013 Бюл. № 34).

- монографии :

1. В.Г.Недорезов. Фотоядерные реакции в области нуклонных резонансов. Москва. Наука образования (2014) , ББК 22.383.Н42. Iswbn 978-5-904006-05-1 10 печ.л.

18 Лаборатория атомного ядра

Руководитель работ к.ф.-м.н. Е.С.Конобеевский.

Физика атомного ядра, динамика ядерных и фотоядерных реакций, физика радионуклидов и тяжёлых ионов.

Нейтронная физика, технология интенсивных источников нейтронов, исследование конденсированных сред, радиационное материаловедение.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами.

Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров. Руководитель работ д.т.н. А.В.Андреев.

Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы. Руководитель работ к.ф.-м.н. И.В.Суркова.

Совершенствование средств и методов аварийной радиационной защиты для обеспечения пожарной безопасности радиационно-опасных объектов и экологической чистоты ядерной энергетики. Руководитель работ д.ф.-м.н. Б.А.Бенецкий

Поиск сверхузких дибарионных резонансов и измерение длины нейтрон-нейтронного рассеяния на Московской мезонной фабрике ИЯИ РАН.

Основные исполнители

Мордовской М.В, снс, кфмн

Зуев С.В., снс, кфмн

Исполнители

Поташев С.И., снс, кфмн

Бурмистров Ю.М., мнс

Каспаров А.А., стажер-исслед.

18 Реферат

NN И *PP* КОРРЕЛЯЦИИ, ДЛИНА РАССЕЯНИЯ, КВАЗИСВОБОДНОЕ РАССЕЯНИЕ, СПЕКТРОМЕТРИЯ НУКЛОНОВ

Сильные расхождения между теорией и экспериментом, обнаруженные в *nd* и *pd* взаимодействии, указывают на необходимость продолжения исследования механизмов различных процессов в малонуклонных системах. Для исследования *nn* и *pp* корреляций в трехнуклонных ядрах ^{3}He и ^{3}H разработана программа экспериментов по исследованию реакций $d + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^2\mathrm{He} + (nn)$, $n + {}^3\mathrm{H} \rightarrow {}^2\mathrm{H} + (nn)$ и ${}^3\mathrm{He} + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^3\mathrm{H} + (pp)$. Моделирование реакций с образованием и развалом квазисвязанного *nn*- (*pp*-) состояния показало, что при определенных кинематических условиях имеется прямая зависимость формы энергетического распределения “развальной” частицы от энергии квазисвязанного состояния, позволяющая определить эту важную характеристику *NN*-взаимодействия. Для детектирования в совпадении нескольких заряженных и нейтральных частиц и определения их энергетических и временных параметров создана система сбора информации, центральным элементом которой выбрана комбинация цифровых сигнальных процессоров – CAEN DT5742 и 5720. На пучке дейтронов НИИЯФ МГУ с энергией 15 МэВ проведен **эксперимент** по исследованию реакции $d + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^2\mathrm{He} + n + n$. Получены предварительные данные для энергетического и временного спектра нейтронов при условии отбора двухпротонных событий в $\Delta E - E$ телескопе. Обнаружена структура во временном спектре, однако для строгой количественной оценки энергии квазисвязанного “динейтронного” состояния необходимо увеличение статистики эксперимента. Проведен сеанс на нейтронном канале РАДЭКС, во время которого была опробована система сбора информации, в тестовом режиме проведены предварительные исследования реакции nd-развала в геометриях квазисвободного рассеяния и SPACE-STAR. Кроме того во время сеанса на нейтронном пучке был установлен монитор нейтронов, оперативная информация с которого была доступна в сети.

18 Введение

Исследование нуклон-нуклонного взаимодействия ведется уже на протяжении почти столетия. Накоплено большое количество данных по *pp*- и *np*-взаимодействию, проведен тщательный их анализ, в результате которого получены *NN*-потенциалы взаимодействия, описывающие подавляющее количество экспериментальных данных [1]. Некоторые расхождения эксперимента и теории удается устранить за счет введения трехнуклонных (3*NF*) сил [2].

Более неоднозначная ситуация возникает, когда мы говорим о *nn*-взаимодействии. Ввиду отсутствия нейтронной мишени, данные об этом взаимодействии получают в основном из анализа реакций с двумя нейтронами в конечном состоянии. Наиболее простой и перспективной реакцией в этом смысле является реакция развала дейтрона нейтроном или протоном $n + d \rightarrow n + n + \text{p}$ и $p + d \rightarrow p + p + n$.

В последние годы выполнено множество экспериментов, в которых весьма точно измерены сечения трехчастичного $N + d$ развала в различных геометриях. Эти точные экспериментальные данные затем были подвергнуты тщательной проверке с использованием детальных расчетов на основе уравнений Фаддеева. Оказалось, что во многих случаях имеются сильные расхождения полученных экспериментальных данных с результатами наиболее полных и точных на сегодня фаддеевских расчетов.

Наиболее сильные расхождения обнаружены в нейтрон-нейтронном квазисвободном рассеянии (КСР). Экспериментальные сечения *nn*-КСР, полученные при исследовании реакции *nd*-развала при E_n = 26 МэВ [3] и E_n = 25 МэВ [4], превышают теоретические оценки на ~ 18%. При этом теория хорошо описывает сечения *np*-КСР, полученные в [3]. Анализ, проведенный в [5], показал, что теоретические результаты являются достаточно стабильными при замене стандартных потенциалов и включении современных 3*N* сил. Так как в сечении КСР при низких энергиях доминирует синглетная $^1S_0$ составляющая, авторы [6] пришли к выводу, что именно этот вклад недооценен и эта недооценка является причиной несовпадения эксперимента и теории. Увеличение величины этой составляющей на ~ 8 % дало согласие теории и эксперимента как для *np*-, так и для *nn*-КСР, но привело к уменьшению значения эффективного радиуса от r_{eff} =2.75 Фм до r_{eff} =2.41 Фм, а также к серьезным изменениям длины *nn*-рассеяния и даже к изменению ее знака и существованию связанного «динейтрона». В [6] было показано также, что данная модификация $^1S_0$ *nn*-силы не позволяет объяснить существующее расхождение между расчетом [7] и экспериментальными данными для *nd*- и *pd*-развала в геометрии “Space-Star” [8–11].

В последнее время обсуждается возможность использования для исследования нуклон-нуклонного взаимодействия реакций с трехнуклонными ядрами ^{3}H и ^{3}He [5]. Известно, что ^{3}He представляет собой состояние, состоящее из двух протонов с противоположными спинами и нейтрона. Аналогично в ^{3}H два нейтрона находятся в спин-синглетном состоянии. Это делает ^{3}H и ^{3}He мишень или снаряд очень удобным для определения энергий *nn* и *pp* квазисвязанных синглетных $^1S_0$ состояний. В [12] было высказано предположение, что в ядре ^{3}H (система $n + n + p$) дополнительная корреляция двух нейтронов, индуцированная протоном, приводит к появлению эффективного “слабосвязанного состояния“ двух нейтронов в поле протона, а соответственно в ядре ^{3}He (система $p + p + n$) появляется околопороговое состояние двух протонов в поле нейтрона. Но при слабой связи двух нейтронов в ^{3}H замена их на два протона в ^{3}He и дополнительное кулоновское взаимодействие в паре *p-p* может кардинально изменить весь механизм такой парной корреляции. В частности, вместо “связанной” *nn*-пары получается резонансная *pp*-пара, и динамика ее распада будет совсем иная, чем динамика распада “эффективного *nn*-связанного состояния”.

Идея предложенных в нами экспериментов состоит в том, что если из ^{3}H быстро удалить протон или из ^{3}He – нейтрон, то наблюдаемый характер импульсных распределений “оставшихся” *nn* или *pp* пар не должен измениться, т.к. динейтронная и дипротонная пары являются в таком эксперименте “спектаторами”, которые быстро вылетают из зоны реакции без сильных искажений того состояния, которое эта пара имела первоначально. Поэтому предлагаемая серия экспериментов направлена как раз на исследование исходных парных *nn*- и *pp*-корреляций в ^{3}H и ^{3}He, соответственно. И можно ожидать, что измеренные *nn*- и *pp*-корреляции, в частности извлеченные длины рассеяния и энергии квазисвязанной пары, окажутся совсем не те, которые присущи свободным *nn*- и *pp*-системам.

18 Основные результаты

Основная работа по теме была связана с разработкой программы исследований, моделированием различных реакций, модернизацией системы сбора и проведением экспериментов на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН и дейтронном пучке циклотрона НИИЯФ МГУ.

Разработана программа исследований нейтрон-нейтронных и протон-протонных корреляций в трехнуклонных системах (*nnp* и *ppn*) в различных реакциях индуцируемых как нуклонами, так и заряженными частицами

$n+d \rightarrow n+n+p$ (1)

$n+{}^3\mathrm{H} \rightarrow n+n+d$ (2)

$d+^2\text{H}\rightarrow n+n+^2\text{He}$ (3)

$^3\text{He}+d\rightarrow p+p+^3\text{H}$ (4).

Программа предполагает проведение экспериментов на нейтронном канале РАДЭКС (1-2), пучке дейтронов и пучке ионов ^{3}He циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ (3-4). Основной целью программы является исследование *nn* и *pp* корреляций, которое будет проведено как в *nd*- и dd-взаимодействии, так и в реакциях с трехнуклонными системами ^{3}H и ^{3}He, в которых уже могут существовать квазисвязанные *nn* и *pp* состояния. При этом можно ожидать, что измеренные нами *nn*- и *pp*-корреляции, в частности, извлеченные в экспериментах (2,4) эффективные длины рассеяния (a_{nn} a_{pp}) и энергии квазисвязанной пары (E^*_{nn} и E^*_{pp}), окажутся совсем не те, которые присущи свободным *nn*- и *pp*-системам (1,3).

18.1 Моделирование реакций с образованием и развалом двухнуклонных состояний

Моделирование планируемых экспериментов (1-4) проводилось с помощью программы, предназначенной для изучения реакций с тремя частицами в конечном состоянии и идущих в два этапа через распадающееся промежуточное состояние [13]. Программа позволяет проводить выбор геометрии эксперимента, в выбранной геометрии рассчитывать времена пролета и энергии всех вторичных частиц, оптимизировать параметры установки, оценивать как область энергий возбуждения, доступную в эксперименте, так и возможное разрешение по энергии возбуждения.

Основным условием экспериментов является детектирование в совпадении заряженной частицы и нуклона от развала двухнуклонной системы. Энергия и угол вылета второго “развального” нуклона будут восстановлены применением законов сохранения энергии и импульса. Энергия возбуждения двухнуклонной системы может быть рассчитана по формуле

$$E^* = [E_1 + E_2 - 2(E_1 \cdot E_2)^{1/2} \cdot \cos(\Theta_1 - \Theta_2)]/2. \quad (3)$$

В реакциях с образованием и развалом квазисвязанного *nn* (*pp*)-состояния и при условии, что детектирование частицы происходит под углом соответствующем вылету *NN*-системы в двухчастичной реакции, попасть в детектор могут только “развальные” частицы, вылетающие в системе ц.м. двух нуклонов или вперед (~ 0°), или назад (~ 180°). В результате получается специфический энергетический (и соответствующий ему временной) спектр, характеризующийся двумя пиками с расстоянием между ними, зависящим от энергии квазисвязанного состояния. На рис. 2 показаны двумерная диаграмма $E_{n1} - E_{n2}$ (рис. 2*а*) и временной спектр нейтронов (рис. 2*б*), образующихся при распаде квазисвязанного *nn*-состояния с энергией 80 кэВ (*1*). На рис. 2*б* показан также спектр нейтронов (*2*) для фоновой

реакции $d + {}^3\mathrm{H} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + n + n$ без образования квазисвязанного состояния. На рис. 3 показаны полученные в результате моделирования время-пролетные спектры одного из нейтронов, регистрируемого под углом вылета *nn*-системы для различных энергий квазисвязанного состояния. Видно, что различным энергиям соответствуют различные временные расстояния между пиками. Следует отметить, что форма спектров развальных частиц зависит только от энергии квазисвязанного состояния и кинетической энергии двухнуклонной системы до ее развала, и не зависит от реакции, в которой эта система (*nn* или *pp*) была образована.

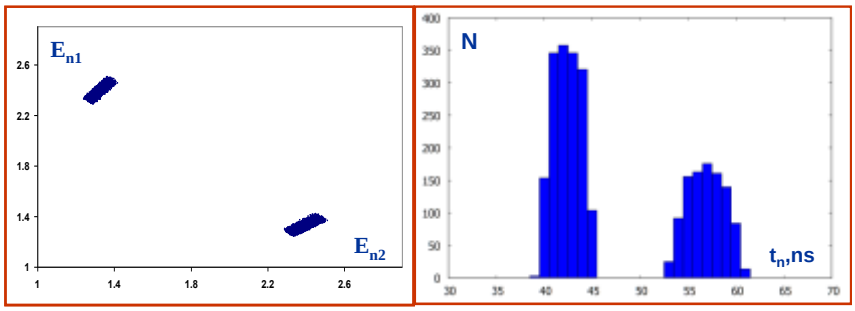


Рис. 2. Результаты моделирования энергетического и временного спектров нейтронов, образующихся при распаде квазисвязанного *nn*-состояния с энергией 130 кэВ: *слева* – двумерная диаграмма $E_{n1} - E_{n2}$ в координатах энергий двух нейтронов, *справа* – временной спектр нейтронов при длине время-пролётной базы 1 м.

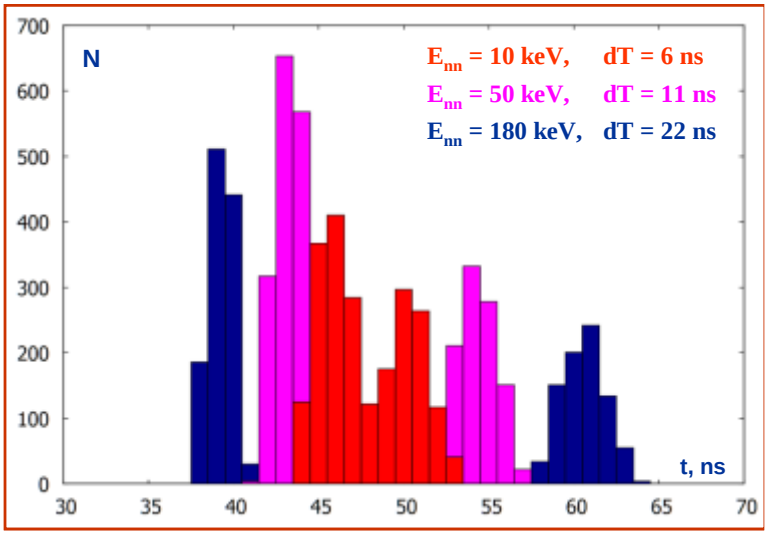


Рис. 3. Время-пролетные спектры “развальных” нейтронов для различных энергий квазисвязанного ${}^2n$ состояния. Длина время-пролетной базы 1 м.

18.1.1 Создание экспериментальной установки для исследования двухнуклонных корреляций

Для детектирования в совпадении нескольких заряженных и нейтральных частиц и определения их энергетических и временных параметров создана система сбора информации, центральным элементом которой выбрана комбинация цифровых сигнальных процессоров – CAEN DT5742 и 5720 [3]. С использованием этой системы было проведено экспериментальное исследование реакции $d + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^2\mathrm{He} + n + n$ на пучке дейтронов НИИЯФ МГУ с энергией 15 МэВ. В эксперименте, схема которого показана на рис. 4, в совпадении детектировались две частицы – заряженная частица ${}^2\mathrm{He}$ (*pp*) и нейтрон. В измерениях была использована мишень из дейтерированного полиэтилена толщиной 2 мг·см$^{-2}$, пучок дейтронов с током на мишени 10 – 20 нА, а телесные углы детекторов заряженных частиц и нейтронов составляли ~10^{-3} ср.

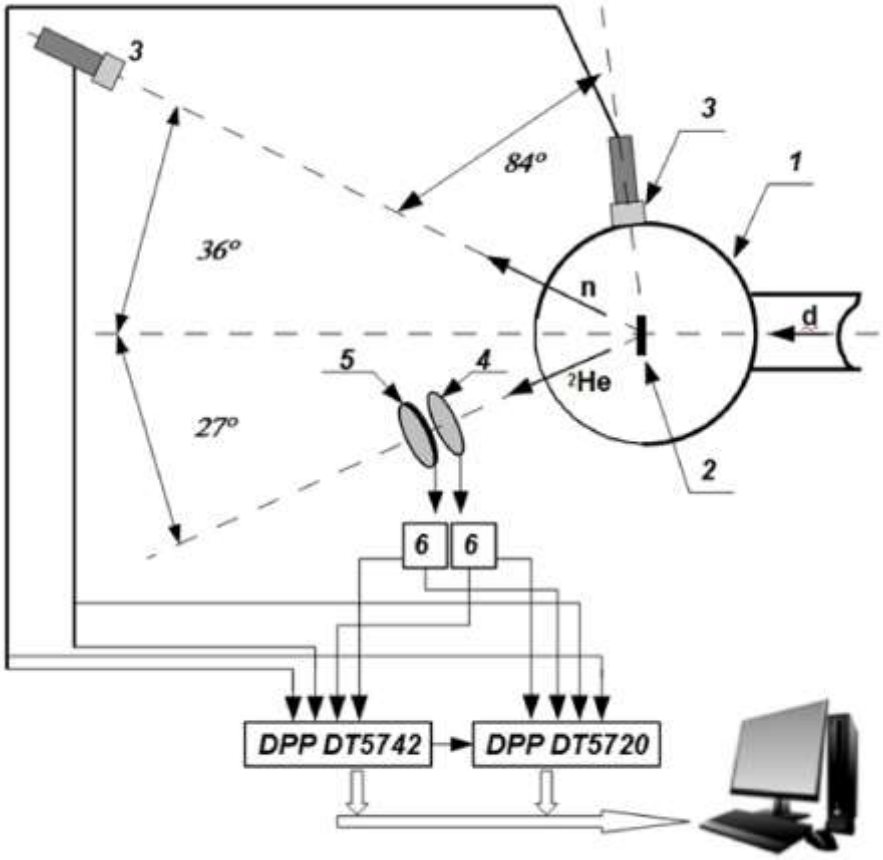


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования реакции $d + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^2\mathrm{He} + n + n$: *1* – камера рассеяния, *2* – CD_2-мишень, *3* – нейтронные детекторы, *4* – ΔE-детектор, *5* – E-детектор, *6* – предусилители Si-детекторов с амплитудными (A) и временными (t) выходами.

Два протона (^{2}He) регистрировались ΔE–E телескопом под углом 27°. В качестве ΔE-детектора был использован полностью обедненный поверхностно-барьерный кремниевый детектор толщиной ~ 25 мкм, а в качестве E-детектора – кремниевый детектор с толщиной 200 мкм. Нейтроны детектировались под углом 36° (соответствующим кинематике двухчастичной реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^2\text{He} + {}^2n$) жидким водородосодержащим сцинтиллятором EJ-301 (аналог NE-213), установленным на расстоянии 1 м от мишени. Энергия нейтронов определялась по времени пролета нейтронов до детектора, при этом в качестве стартового сигнала время-пролетной системы использовался временной сигнал от ΔE-детектора. Для проверки работоспособности системы еще один такой же нейтронный детектор располагался под углом 84° для регистрации нейтрона из двухчастичной реакции $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$.

В настоящем эксперименте для получения конечной информации об энергиях квазисвязанных состояний необходимо определять энергии всех зарегистрированных частиц (в том числе и нейтронов), т.е. измерять с достаточной точностью как амплитудные, так и временные характеристики сигналов от всех детекторов. Для получения этих характеристик в работе использовалась система сбора информации на основе дигитайзеров (цифровых сигнальных процессоров) DT5742 и DT5720 фирмы CAEN.

Блок DT5742 предназначен для временного анализа сигналов и имеет следующие характеристики: количество детекторных входов 16, максимальная частота оцифровки $5 \cdot 10^9$ выборок/с (шаг временной развертки 0.2 нс, 1024 канала), амплитудное разрешение 12 бит, буферная память на 128 событий. Блок 5720 предназначен для амплитудного анализа и, соответственно, имеет характеристики: 4 детекторных входа, $250 \cdot 10^6$ выборок/с (шаг 4 нс, 16000 каналов), разрешение 12 бит и память на 1250 событий. Таким образом, сочетание этих модулей позволяет получать с хорошим разрешением как временную, так и амплитудную информацию со всех детекторов системы регистрации.

В нашей системе сбора данных сигнал от ΔE-детектора запускал быстрый блок DT5742, предназначенный для получения временной информации. На него же поступали временные сигналы от других детекторов (E-детектора заряженных частиц и нейтронных детекторов). Блок DT5742 в свою очередь запускал блок DT5720, на который поступали амплитудные сигналы от всех детекторов. Реальному событию соответствовал случай, когда на оба блока поступали сигналы от трех детекторов (ΔE, E и одного из нейтронных детекторов).

Следует отметить, что измерения выхода реакции $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ носили методический характер и, в частности, предназначались для калибровки системы по времени. При получении временного спектра, показанного на рис. 5, стартовый сигнал в блок DT5742 поступал с E-детектора, а стоповый – с нейтронного детектора, установленного под углом 84°. Полученное

время (~ 13 нс) характеризует разность аппаратных задержек в каналах *E*- и нейтронного детектора, поскольку расстояния до детекторов выбирались так, чтобы частицы (^{3}He и нейтрон) практически одновременно попадали в детекторы. Ширина временного пика составляет 1.5 нс, что в основном связано с разбросом места образования нейтроном протона отдачи в достаточно длинном нейтронном детекторе (± 2.5 см) при достаточно короткой базе ~ 20 см.

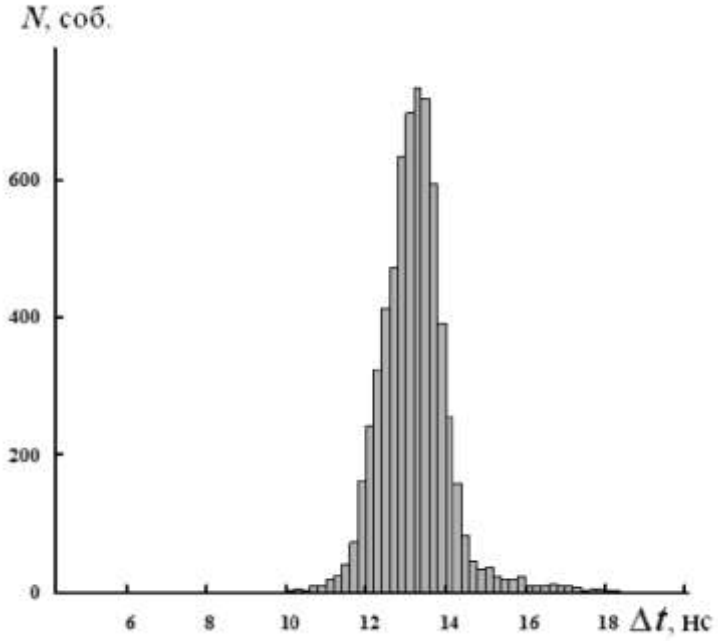


Рис. 5. Спектр разности времен $\Delta t = t_n - t_{3He}$ между сигналами нейтронного (84°) и *E*-детектора, полученный с помощью блока DT5742. Отобраны события, соответствующие локусу ^{3}He.

18.1.2 Эксперимент по исследованию реакции d + 2H → 2He + n + n на пучке дейтронов НИИЯФ МГУ

Основными целями эксперимента являлись проверка методики и получение предварительных данных о параметрах нейтрон-нейтронного квазисвязанного синглетного состояния. На рис. 6 показана двумерная $\Delta E - E$ диаграмма, полученная с помощью дигитайзера DT5720 при условии совпадения сигналов от ΔE, E и нейтронного детектора, установленного под углом регистрации 36° и соответствующего кинематике реакции $d + d \rightarrow {}^2\mathrm{He} + {}^2n$.

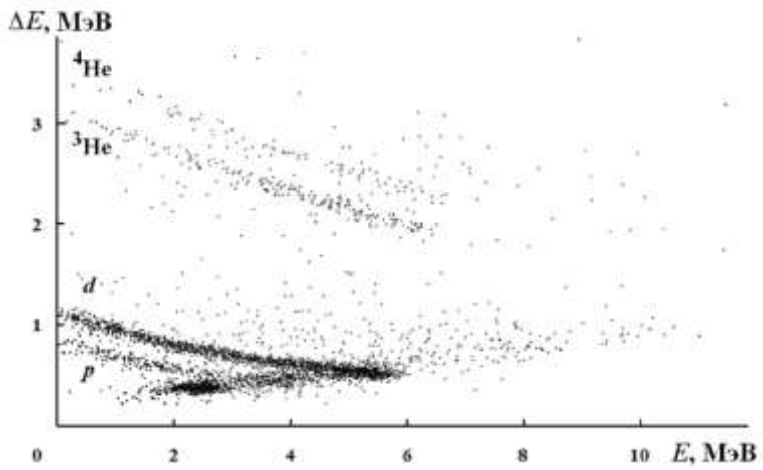


Рис. 6. Двумерная $\Delta E - E$ диаграмма, полученная с помощью блока DT5720 при условии совпадения сигналов от ΔE, E и n-детектора (36°). На диаграмме видны локусы, соответствующие протонам, дейтронам, ^{3}He и ^{4}He.

Видно, что имеется значительное количество событий выше дейтронного локуса и ниже локуса ^{3}He. Проведенное моделирование показало, что именно эта область соответствует событиям одновременного прохождения двух протонов (^{2}He) через $\Delta E - E$ систему. Отбор по такой области приводит к следующему спектру $\Delta E + E$, показанному на рис. 7*а*. Серая гистограмма представляет экспериментальный суммарный спектр, соответствующий одновременной регистрации двух протонов в телескопе $\Delta E - E$ под углом 27° и одного нейтрона в детекторе под углом 36°. Для сравнения на рис. 7а показаны также результаты моделирования при условии образования и распада квазисвязанного ^2n-состояния с энергией в интервале 50 – 150 кэВ.

Конечной целью эксперимента являлось получение энергетического (временного) спектра нейтронов при условии регистрации двух протонов (^{2}He) в соответствующем телескопе. Как было показано при моделировании, форма такого спектра однозначно связана с энергией квазисвязанного состояния двухнейтронной системы. На рис. 8*б* показаны предварительные данные по временному спектру нейтронов. Данные получены при указанных выше условиях регистрации и отбора. На рисунке приведены также результаты моделирования нейтронного спектра для реакции с образованием и развалом квазисвязанного состояния ^2n-системы с энергией 80 ± 10 кэВ.

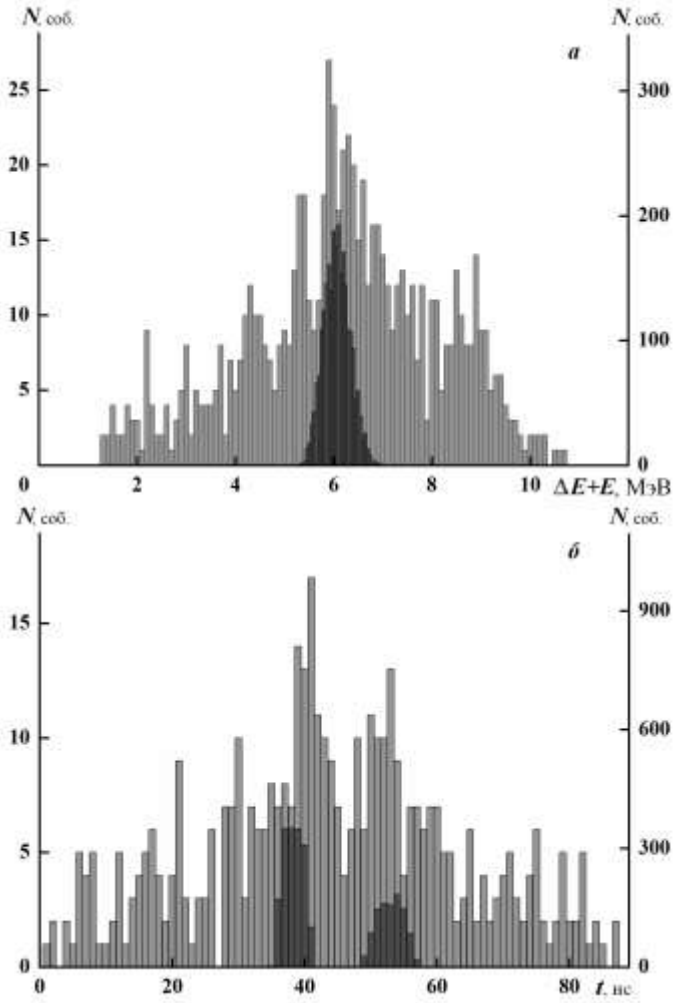


Рис. 8. Экспериментальные и моделированные спектры, полученные при условии регистрации двухпротонных событий в ΔE – E телескопе и нейтрона в n-детекторе (36°): а – суммарный спектр ΔE + E; серая гистограмма – эксперимент, черная гистограмма – моделирование для E*(2n) = 100 ± 50 кэВ, б – временной спектр нейтронов; серая гистограмма – эксперимент, черная гистограмма – моделирование для E*(2n) = 80 ± 10 кэВ.

К сожалению, недостаточная статистика проведенных измерений не позволяет пока сделать определенные количественные оценки энергии возбуждения, хотя вывод о наличии структуры в полученном временном спектре кажется авторам достаточно основательным.

18.1.3 Проведение тестового эксперимента на канале РАДЭКС ИЯИ РАН

Во время наладочного сеанса декабря 2014 г. в рамках данной темы были проведены работы на канале РАДЭКС. На прямом нейтронном канале был установлен жидкодейтериевый сцинтиллятор EJ-315. Данный сцинтиллятор использовался одновременно, как активная

мишень в эксперименте по исследованию реакции *nd*-развала в различных геометриях, так и в качестве монитора нейтронного пучка.

1. В качестве регистрирующей аппаратуры **монитора нейтронного пучка (МНП)** была использован цифровой сигнальный процессор DPP-DT5720 и встроенная программа DT-PSD разделения сигналов по форме импульса. Кроме того была использована оригинальная программа, позволяющая в режиме on-line получать информацию на любой компьютер, находящийся в сети (в том числе на пульт управления ОУК и оперативного дежурного РАДЭКС). В результате, во время всего сеанса была доступна оперативная информация, как о наличии, так и об интенсивности нейтронного потока в месте расположения МНП (нейтронный канал 0°, 12 м от мишени. Пример временной диаграммы – зависимости нейтронного потока от времени показан на рис.9.

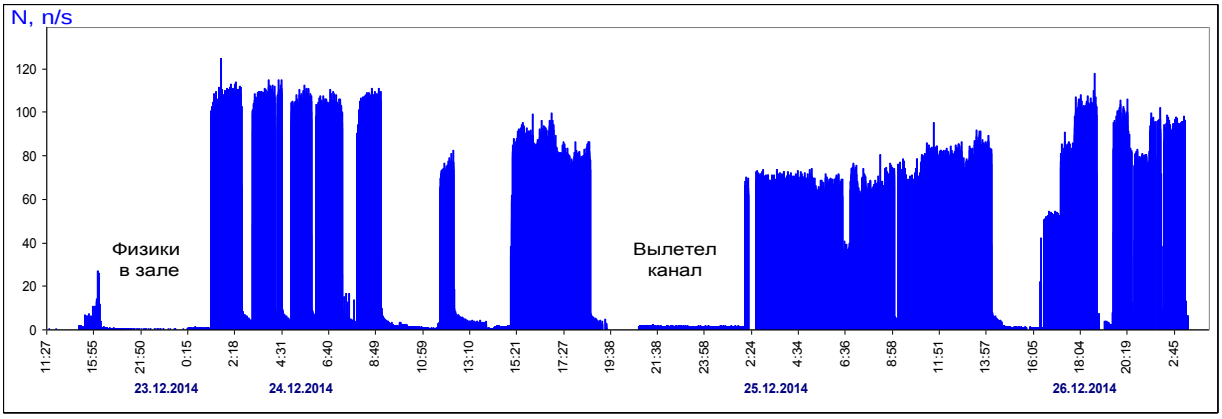


Рис.9. Интенсивность нейтронов во время сеанса 23-26 декабря 2014 г.

2. Для проверки методики **проведения эксперимента по исследованию реакции *nd*-развала в различных геометриях** помимо активной жидкодейтериевой мищени были установлены нейтронные детекторы на основе жидководородных сцинтилляторов. Энергия нейтронов определялась по времени пролета, при этом стартовым сигналом являлся сигнал от жидкодейтериевой активной мишени. Была проверена система сбора информации на основе цифрового сигнального процессора DPP-DT5742. Особенностью данного прибора является многоканальность (до 16 входов) и возможность одновременного получения как амплитудной так и временной информации (шаг временной шкалы 0.2 нс).

3. В ходе сеанса получены предварительные результаты для двух геометрий реакции *nd*-развала:

а) – геометрии нейтрон-нейтронного квазисвободного рассеяния (КСР) Θ_1=45°,Θ_2=55°, Ф=180°.

б) – геометрии SPACE-STAR, когда все три нуклона разлетаются в системе ц.м. с одинаковыми импульсами и углами разлета - Θ_1=45°,Θ_2=55°, Ф=120°.

Так как условия проведения сеанса, предназначенного для проводки пучка (частота 1-10 гц, ширина макроимпульса 90 мкс) далеко не оптимальны для получения статистически обеспеченных результатов, в сеансе получены только оценочные данные, обработка которых состоится в ближайшее время.

18.1 Использованные источники

1. R. Machleidt, F. Sammarruca, and Y. Song Phys. Rev. C 53, R1483 (1996); V.G.J. Stoks et al. Phys. Rev. C 49, 2950 (1994).

2. S.A. Coon et al. Nucl. Phys. A 317, 242 (1979); S.A. Coon and H.K. Han Few-Body Syst. 30, 131 (2001).

3. A. Siepe, et al. Phys. Rev. C 65, 034010 (2002).

4. X.C. Ruan, et al. Phys.Rev. C 75, 057001 (2007).

5. H. Witala and W. Glöckle Phys.Rev. C 83, 034004 (2011).

6. H. Witala and W. Glöckle J. Phys. G 37, 064003 (2010).

7. A. Deltuva, et al. Phys. Rev. C 72, 054004 (2005).

8. H.R. Setze, et al. Phys. Lett. B 388, 229 (1996).

9. J. Strate, et al. Nucl. Phys. A 501, 51 (1989).

10. T. Ishida, et al. Mod. Phys. Lett. A 18, 436 (2003).

11. G. Rauprich, et al, Nucl.Phys. A 501, 51 (1989).

12. Е.С. Конобеевский, В.И. Кукулин, С.В. Зуев, В.М. Лебедев, М.В. Мордовской, А.В. Спасский Изв. РАН. Сер. физ. 78, 522 (2014) [Bull. Russ. Acad. Sci. 78, 341 (2014)].

13. E. Konobeevski, S. Zuyev, A. Kasparov, V. Ostashko Few-Body Syst. 55, 1059 (2014).

18.1 публикации

1. Е.С.Конобеевский, В.И.Кукулин, С.В.Зуев, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский / Исследование нейтрон-нейтронных и протон-протонных корреляций в малонуклонных системах в реакциях с двумя нуклонами в конечном состоянии // Известия Российской академии наук. Серия физическая 2014, том 78, № 5, с. 522–526
2. S. V. Zuyev, E. S. Konobeevski, and M. V. Mordovskoy/ A Data Acquisition System Based on Digital Signal Processors for a Setup with the Detecting of Coincident Events //Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2014, Vol. 78, No. 5, pp. 350–354.
3. Е.С. Конобеевский, А.А.Каспаров, С.В.Зуев / Программа моделирования экспериментов по исследованию реакций с тремя частицами в конечном состоянии // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2014. Т. 78, № 5, с. 527–531
4. E.S.Konobeevski, S.V.Zuyev, A.A.Kasparov, V.V.Ostashko / SIMULATION OF d + T → 3He +2n; 2n → n + n REACTION // Few Body Problems 2014, vol.55, No 2, 0855
5. E.Konobeevski, V.Lebedev, M.Mordovskoy, A.Spasskii, S.Zuyev / Study of neutron-neutron interaction in proton pick-up reactions on 3H// EPJ Web of Conferences 2014,vol. 66, 03047
6. Data Acquisition System on the Base of Digital Pulse Processors Using for Registration of Coincidence Events // S.V.Zuyev, E.S.Konobeevski, M.V.Mordovskoy, P.Sugathan, N.Saneesh // Preprint INR RAS. N 1393/2014.
7. E. S. Konobeevski, V. I. Kukulin, S. V. Zuyev, V. M. Lebedev, M. V. Mordovskoy, and A. V. Spassky / Investigating Neutron–Neutron and Proton–Proton Correlations in Few_Nucleon Systems in Reactions with Two Nucleons in the Final State // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2014, Vol. 78, No. 5, pp. 341–344
8. S. V. Zuyev, A. A. Kasparov, and E. S. Konobeevski / A Program for Simulation Experiments to Study Reactions with Three Particles in the Final State // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2014, Vol. 78, No. 5, pp. 345–349

В печати

9. Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев, А.А. Каспаров, В.М. Лебедев, М.В. Мордовской, А.В. Спасский. Исследование реакции d + d →2He + 2n при энергии дейтронов 15 МэВ // ЯФ 2015 (в печати)

Дооклад на конференции

E. Konobeevski, V. Lebedev, M. Mordovskoy, A. Spasskii, S. Zuyev, A. Kasparov // STUDY OF $d+d\rightarrow{}^{2}\mathrm{He}+{}^{2}n$ REACTION AT DEUTRON ENERGY OF 15 MeV // Доклад на Международной конференции «Ядро 2014», Минск, 2014 г.

18.2 Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях

Руководитель темы: Евгений Сергеевич Конобеевский, зав. лаб., кфмн

Основные исполнители:

Заварзина В.П., снс, кфмн

Зуев С.В., снс, кфмн

Курлович А.С., стажер-исследователь

Сергеев В.А., снс, кфмн

Исполнители:

Каспаров А.А., стажер-исслед.

Беловицкий Г.Е., снс, кфмн

Пафомов В.Е., снс, дфмн

Хохлов Ю.К., снс, кфмн

18.2 Реферат

ЛЁГКИЕ ГАЛО ЯДРА, КЛАСТЕРНАЯ СТРУКТУРА, КВАЗИМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СОСТОЯНИЯ, КВАЗИСВОБОДНОЕ РАССЕЯНИЕ, ЯДЕРНЫЕ ФОТОЭМУЛЬСИИ.

Работа направлена на решение фундаментальной проблемы – исследование кластерной структуры легких ядер. Ядра ^{6}He и ^{6}Li представляют значительный экспериментальный и теоретический интерес из-за кластерной структуры низколежащих состояний, рассматриваемых как ^{4}He + 2n и ^{4}He + d, соответственно. Более сложная структура ядра ^{8}He дает и большую возможность рассмотрения кластерной структуры ядра, как комбинаций различных нейтрон-нейтронных корреляций – динейтрон, динейтронный конденсат и др. с различными корами (^{4}He, ^{6}He). Проведенное нами моделирование реакций ^{6}He+p и ^{8}He+p показало, что события квазисвободного рассеяния протона на различных кластерах занимают различные кинематические области на диаграммах Далитца, и обнаружение таких областей позволит сделать выводы о кластерной структуре исследуемых гало-ядер.

В то же время в системе A = 6 при высоких энергиях возбуждения возможны трехнуклонные квазимолекулярные состояния, описываемые как двухфермионные системы (t + t или t + ^{3}He). Для исследований таких состояний проведено облучение ядерных фотоэмульсий на пучке гало-ядер ^{6}He с энергией 150 МэВ в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Поиск ведется в реакции ^{6}He +^{1}H→p+t+t , в настоящее время ведется обработка полученных данных.

Для изучения кластерной структуры высоковозбужденных состояний в ядрах ^{6}Li и ^{6}He подготовлен проект, в рамках которого будет проведено исследование реакций ^{6}Li + ^{7}Li → ^{7}Li + ^{6}Li* → ^{7}L + t + ^{3}He (1), ^{6}Li + ^{7}Li → ^{7}Be + ^{6}He* → ^{7}Be + t + t (2), и n + ^{7}Li → ^{2}H + ^{6}He*

→ ^{2}H + t + t (3). Реакции 1 и 2 будут исследованы на пучке ионов ^{6}Li с энергией 50–54 МэВ на пеллетроне 15 UD Межуниверситетского ускорительного центра (IUAC, Нью-Дели, Индия). Реакция (3) будет исследована на нейтронном канале РАДЭКС Института ядерных исследований Российской академии наук. Проведено моделирование эксперимента с использованием созданной программы расчета кинематических переменных, разработана методика измерений, частично подготовлены детекторы заряженных частиц, опробована система сбора информации.

18.2 Введение

Работы по теме направлены на решение фундаментальной проблемы ядерной физики – проблемы существования кластерной структуры ядер. Строгая корреляция между нуклонами приводит к явлению кластеризации. Существование альфа-кластеров доказано, не только в легких, но также и в тяжелых ядрах. Ядерные кластеры, отличные от альфа-кластеров, наблюдаются и играют заметную роль, как для адекватного описания механизмов ядерных реакций, так и структуры ядер. Для нейтронно-избыточных ядер имеются как теоретические [1], так и экспериментальные [2, 3] основания для предположения о существовании динейтронного кластера. Большой интерес представляют ядра с двухнейтронным гало ^{6}He, ^{11}Li, ^{14}Be, в которых подсистемы кор+нейтрон и нейтрон+нейтрон не имеют связанных состояний.

Исследование квазисвободного рассеяния протона на валентном нейтроне и нейтронных кластерах радиоактивных гало ядер ^{6}He, ^{8}He, ^{11}Li и др. является естественным продолжением и развитием работ по изучению кластерной структуры стабильных ядер ^{6}Li, ^{7}Li, ^{9}Be и др. Экспериментальные данные о реакции квазисвободного рассеяния протона при средней энергии позволят получить прямую информацию о вероятности образования нейтронных кластеров в гало ядрах с двумя и более валентными нейтронами, устранить неоднозначность выводов о структуре ядер ^{6}He, ^{8}He и др.

Ядра ^{6}He и ^{6}Li представляют также значительный экспериментальный и теоретический интерес из-за возможности существования в них при высоких энергиях возбуждения трехнуклонных квазимолекулярных состояний, описываемых как двухфермионные системы (t + t или t + ^{3}He). Однако, данные о структуре, энергиях и ширинах высоковозбужденных состояний по-прежнему довольно противоречивы и требуют дальнейшего изучения в различных реакциях и с использованием различных методов.

18.2 Основные результаты

18.2.1 Исследование реакции квазисвободного рассеяния протона на кластерах гало ядер в обратной геометрии

Для исследований реакций квазисвободного рассеяния протона на кластерах легких ядер планировалось облучение ядерных фотоэмульсий на пучках гало-ядер ^{6}He и ^{8}He в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Проведенное нами моделирование реакций ^{6}He+p и ^{8}He+p показало, что события квазисвободного рассеяния протона на различных кластерах занимают различные кинематические области на диаграммах Далитца, и обнаружение таких областей позволит сделать выводы о кластерной структуре исследуемых гало-ядер [4]. К сожалению планируемое облучения фотоэмульсий в ЛФЯР ОИЯИ при энергии ^{6}He и ^{8}He порядка 10 МэВ/нуклон было отложено на 2015 г..

18.2.2 Исследование высоковозбужденных состояний в ядрах 6He и 6Li

1 Поиск возбуждения трехнуклонных квазимолекулярных состояний в реакции

^{6}He +^{1}H→p+t+t проведено на пучке гало-ядер ^{6}He с энергией 150 МэВ в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. В качестве мишени использовались ядра водорода, входящие в состав ядерной фотоэмульсии. В настоящее время ведется обработка полученных данных.

2 Совместно с экспериментальной группой из Межуниверситетского ускорительного центра (IUAC, Нью-Дели, Индия) подготовлен проект эксперимента по исследованию кластерной структуры легких слабосвязанных ядер в реакциях

^{6}Li + ^{7}Li → ^{7}Li + ^{6}Li* → ^{7}L + t + ^{3}He (1),

^{6}Li + ^{7}Li → ^{7}Be + ^{6}He* → ^{7}Be + t + t (2),

n + ^{7}Li → ^{2}H + ^{6}He* → ^{2}H + t + t (3).

Реакции 1 и 2 будут исследованы на пучке ионов ^{6}Li с энергией 50–54 МэВ на пеллетроне 15 UD Межуниверситетского ускорительного центра (IUAC, Нью-Дели, Индия). Реакция (3) будет исследована на нейтронном канале РАДЭКС Института ядерных исследований Российской академии наук.

а) Разработка методики эксперимента. Основным условием экспериментов является детектирование в совпадении заряженной частицы и трехнуклонного кластера (t или τ) от развала легкого ядра (^{6}Li, ^{6}He). Энергия и угол вылета второй “развальной” частицы будут восстановлены, используя законы сохранения энергии и импульса. В качестве мишеней будут использованы самоподдерживающиеся металлические фольги ^{7}Li, с толщинами порядка 0.2 – 0.5 мг/см^2.

Схема эксперимента показана на примере реакции ^{6}Li + ^{7}Li → ^{7}Li + ^{6}Li* → ^{7}L + t + ^{3}He.

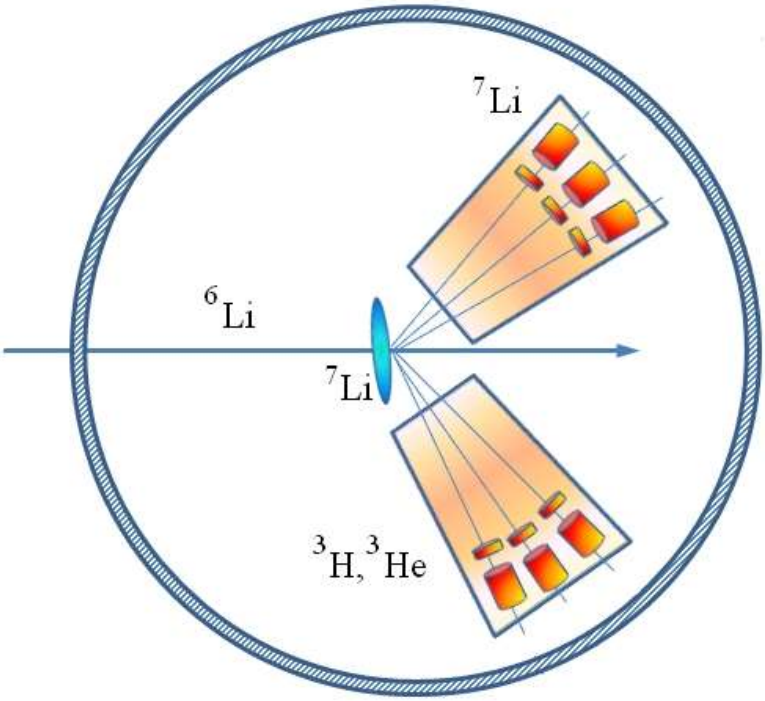


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В эксперименте будут регистрироваться в совпадении как продукты распада (^{3}H и ^{3}He) высоковозбужденных состояний, так и рассеянная частица – ^{7}Li. Рассеянные частицы будут детектироваться с помощью ΔE – E телескопа кремниевых поверхностно-барьерных детекторов с толщинами 25 – 60 и 600 – 1000 мкм, соответственно. Продукты распада возбужденного состояния ^{6}Li, будут детектироваться несколькими ΔE – E телескопами кремниевых поверхностно-барьерных детекторов с толщинами 25 – 60 и 500 – 1000 мкм, соответственно. Такие толщины детекторов позволят регистрировать тритоны и гелионы-3 от развала ^{6}Li* с энергиями в интервале 2 – 20 МэВ и 8 – 40 МэВ, соответственно. Такие энергетические интервалы достаточны для проведения поиска возбужденных состояний ^{6}Li* с энергиями возбуждения 10 – 30 МэВ.

Для получения конечных энергетических спектров будет использована система сбора информации на основе цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) [5, 6]. Система сбора данных была опробована в эксперименте по исследованию реакции $d + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^2\mathrm{He} + n + n$ [6]. Система позволяет регистрировать в совпадении сигналы с детекторов заряженных и нейтральных частиц с определением их энергий и времен пролета. При этом вся необходимая информация может быть получена при использовании минимального набора блоков

электроники, а обработка оцифрованных сигналов дает широкие возможности для отбора и анализа полученных данных.

б) Моделирование эксперимента. Проведено моделирование эксперимента с использованием созданной программы расчета кинематических переменных. На рис. 2 показаны аппаратные функции (спектры $E_x(^6Li)$), полученные при моделировании реакции $^7Li + ^6Li \rightarrow ^7Li + t + X$ для разных углов регистрации $\Theta(^7Li) = 7° \pm 1°$, $20° \pm 1°$ и $30° \pm 1°$. Остальные условия: $E(^7Li) \geq 10$ МэВ, $\Theta(t) = 55° \pm 5°$, $\Phi(^7Li\text{-}t) = 180°$, $E(t) \geq 3$ МэВ. Проведенное моделирование показало возможность исследования интервала энергий возбуждения ^6Li от порога развала до энергии порядка 30 МэВ (рис. 2).

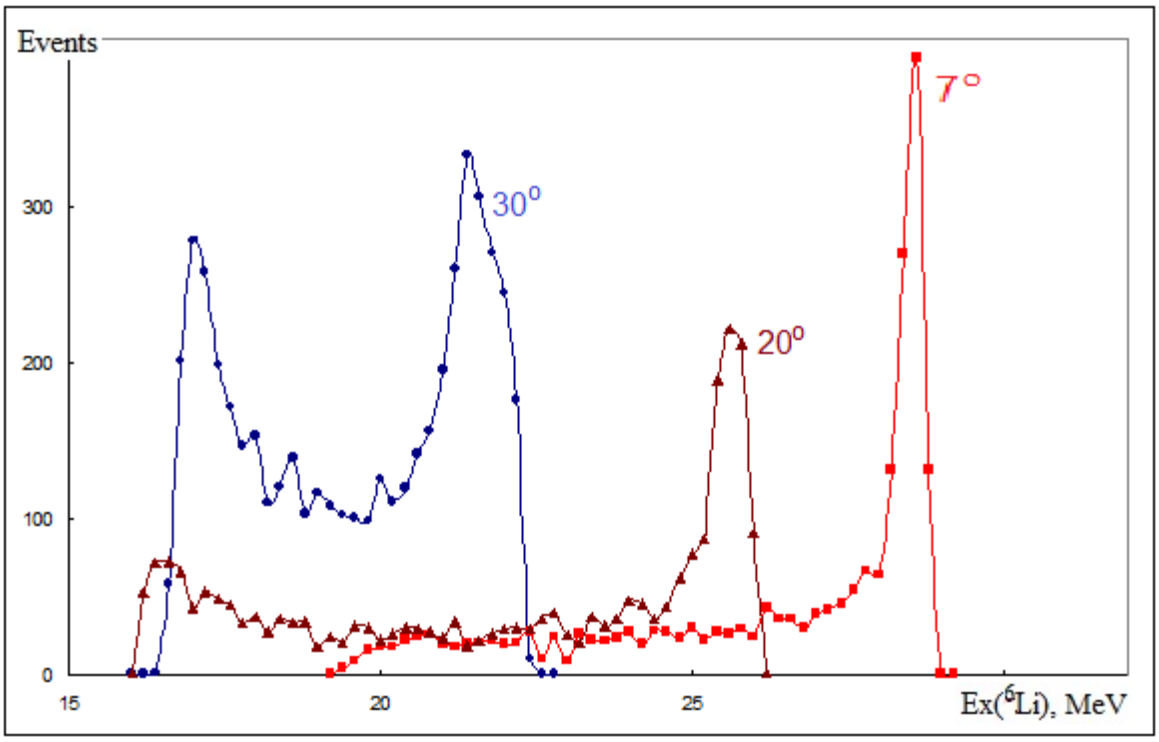


Рис. 2. Аппаратная функция (E_x-спектр ^6Li), полученная при моделировании реакции $^7Li + ^6Li \rightarrow ^7Li + ^6Li^*$ для различных углов регистрации $\Theta(^7Li) = 7° \pm 1°$, $20° \pm 1°$ и $30° \pm 1°$.

В процессе моделирования были рассмотрены возможности выделения искомого канала развала $^6Li^* \rightarrow t + ^3He$ от фонового $^6Li^* \rightarrow d + ^4He$. В последнем случае регистрируемыми частицами будут ^7Li и ^4He или ^7Li и d. На рис. 3 показаны результаты моделирования двумерных диаграмм $E(^7Li)$–$E(t)$, $E(^7Li)$–$E(^4He)$, $E(^7Li)$–$E(d)$, при условиях: угол регистрации ^7Li – 20°, угол регистрации второй частицы (t или ^4He или d) – 55°. Видно, что различным каналам развала $^6Li^*$ соответствуют различные области двумерной диаграммы, что позволит однозначно выделить искомые события. Кроме того в канале развальной частицы

будет проводиться ΔE – E анализ, который позволит проводить отбор событий регистрации тритонов от событий регистрации дейтронов или альфа-частиц.

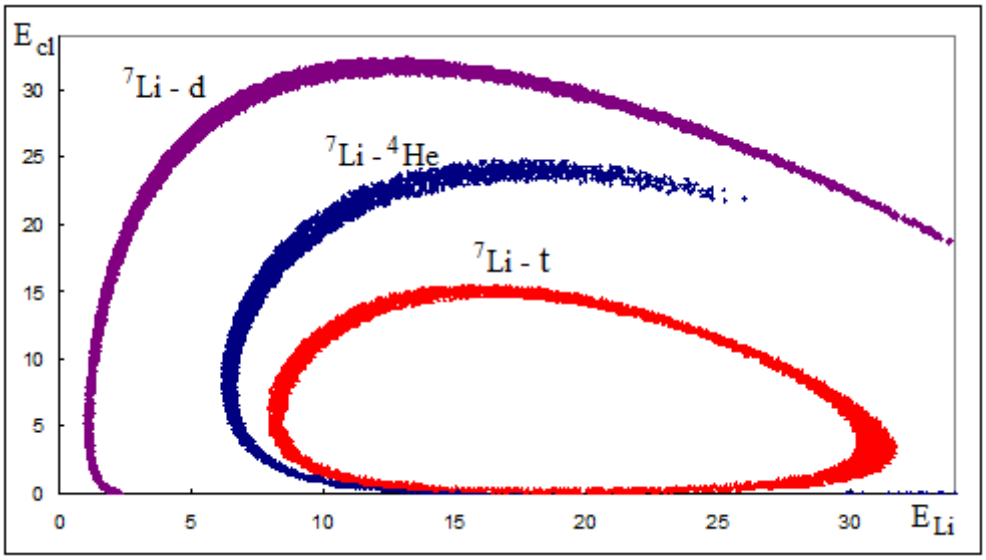


Рис.3. Двумерные диаграммы E(^{7}Li)–E(t), E(^{7}Li)–E(^{4}He), E(^{7}Li)–E(d) при условиях: Θ(^{7}Li) = 20°, Θ(cl) = –55° (cl = t, ^{4}He, d). Энергия пучка ^{6}Li – 54 МэВ.

18.2.3 Сравнительный анализ инклюзивных реакций срыва остова и срыва нуклона гало-ядра

На основе дифракционной модели выполнены расчеты дифференциальных сечений реакций срыва нуклона и остова гало-ядра для различных наборов параметров, характеризующих поглощение нуклона и остова ядром-мишенью. Определены точность и область применимости аналитических выражений, полученных ранее для сечений срыва и импульсных распределений наблюдаемых частиц. Показано, как общее соотношение дифракционной модели может быть использовано для приближенного выражения сечения реакции срыва остова гало-ядра.

18.2 Использованные источники

1. M.V. Zhukov, *et al*. Phys. Rep. **231**, 151 (1993).

2. Yu.Ts. Oganessian, *et al*. Phys. Rev. C **60,** 044605 (1999).

3. Г.Е. Беловицкий, В.П. Заварзина, С.В.Зуев, Е.С. Конобеевский, и др. ЯФ 72, 1772 (2009) [Phys. Atom. Nucl. 72, 1714 (2009)].

4 Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев, А.А. Каспаров. Возможности исследования структуры гало-ядер в реакциях квазисвободного рассеяния протона при низких энергиях // ЯФ 2015 (в печати)

5 S. V. Zuyev, E. S. Konobeevski, and M. V. Mordovskoy/ A Data Acquisition System Based on Digital Signal Processors for a Setup with the Detecting of Coincident Events //Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2014, Vol. 78, No. 5, pp. 350–354.

6 S.V.Zuyev, E.S.Konobeevski, M.V.Mordovskoy, P.Sugathan, N.Saneesh // Data Acquisition System on the Base of Digital Pulse Processors Using for Registration of Coincidence Events // Preprint INR RAS. N 1393/2014.

18.2 Публикации

1. Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев, А.А. Каспаров. Возможности исследования структуры гало-ядер в реакциях квазисвободного рассеяния протона при низких энергиях // ЯФ 2015 (в печати)

2. Study of Cluster Structure of ^{6}Li and ^{6}He Nuclei in Reactions with Neutron and ^{6}Li Beams // E.S.Konobeevski, P.Sugathan, K.S.Golda, A.Jhingan, A.A.Kasparov, M.V.Mordovskoy, N.Saneesh, S.V.Zuyev // Preprint INR RAS. N 1392/2014.

3. Data Acquisition System on the Base of Digital Pulse Processors Using for Registration of Coincidence Events // S.V.Zuyev, E.S.Konobeevski, M.V.Mordovskoy, P.Sugathan, N.Saneesh // Preprint INR RAS. N 1393/2014.

4. В. П. Заварзина, В. Е. Пафомов, В. А. Сергеев / О НЕКОТОРЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ В ТЕОРИИ РЕАКЦИЙ С ГАЛО-ЯДРАМИ. // *ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2014, том 78, № 5, с. 662–664.*

5. V. P. Zavarzina, V. E. Pafomov, and V. A. Sergeev / On Some Approximations in the Theory of Halo Nucleus Reactions //*Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2014, Vol. 78, No. 5, pp. 469–471.*

6. В.П. Заварзина, В. Е. Пафомов, В.А. Сергеев /ИМПУЛЬСНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В РЕАКЦИЯХ С ГАЛО-ЯДРАМИ НА ЛЕГКИХ МИШЕНЯХ// Препринт ИЯИ РАН 1388/2014

В печати

7. V.E. Pafomov, V.A. Sergeev, V.P. Zavarzina /MOMENTUM DISTRIBUTIONS IN STRIPPING REACTIONS OF HALO NUCLEI ON LIGHT TARGET// EXON-2014. Book of Proceedings with World Scientific Publishing House

Доклады

1. Е.Конобеевский, С.Зуев, А.Каспаров // Возможности исследования структуры гало-ядер в реакциях квазисвободного рассеяния протона при низких энергиях // Доклад на Международной конференции «Ядро 2014», Минск, 2014 г.

2. E. Konobeevski, A. Kasparov, A. Kurlovich, S. Zuyev, V. Zavarzina // STUDY OF CLUSTER STRUCTURE OF LIGHT NUCLEI BY PROTON QUASIFREE SCATTERING AT LOW ENERGIES // Тезисы доклада на Международной конференции EXON-2014, Калининград, 8-13 сентября 2014 г.

3. Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев, А.А.Каспаров / Возможность исследования структуры ядер ^{6}He и ^{6}Li в экспериментах на пучках нейтронов и легких ядер // Труды Всероссийской научной конференции Актуальные проблемы фундаментальных и

прикладных наук в современном информационном обществе. Москва, МФТИ, 24–29 ноября 2014 года

4. А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев / Возможности изучения кластерной структуры ядер 6Li и 6He с пучками нейтронов и ядер 6Li // Доклад на Межинститутской молодежной конференции, 12–13 ноября 2014 года, Москва, ИЯИ РАН.

5. V.E. Pafomov, V.A. Sergeev, V.P. Zavarzina /MOMENTUM DISTRIBUTIONS IN STRIPPING REACTIONS OF HALO NUCLEI ON LIGHT TARGET// Absract and poster on VII International Symposium on Exotic Nuclei “EXON - 2014” Kaliningrad, 8 - 13 September 2014.

Продолжена работа, связанная с широко обсуждающейся в литературе гипотезой о существовании прозрачных сред, у которых проницаемости ε и μ (фигурирующие в соотношениях $\vec{B} = \mu\vec{H}, \vec{D} = \varepsilon\vec{E}$) отрицательны.

В печати

Ю.К. Хохлов // К теории электромагнитных волн в сплошных средах / КСФ (2015)

18.3 Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров

Научный руководитель: А.В.Андреев.

Основные исполнители:

Мордовской М.В, снс, кфмн

Зуев С.В., снс, кфмн

Бурмистров Ю.М., мнс

Исполнители:

Сабинин С.Л.

Тишин В.В.

18.3 Реферат

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ, ГАММА СПЕКТРОМЕТР, НИЗКОФОНОВАЯ КАМЕРА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ, АКТИВНАЯ И ПАССИВНАЯ ЗАЩИТА, ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ, ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК.

Исследования по теме направлены на разработку, апробацию и аттестацию новых инструментальных методик нейтронно-активационного анализа (НАА) с использованием перспективных источников нейтронов. В результате исследований будут развиты, апробированы и предложены к аттестации аналитических методы с улучшенными метрологическими характеристиками высокочувствительного определения содержания естественных радиоактивных элементов и нанопримесей в высокочистых веществах, материалах, для анализа геологических объектов (руд, продуктов их переработки и обогащения, пород, отходов горно-обогатительных предприятий и др.), экологических проб для мониторинга состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения, а также жидкостей (в том числе горючих, например, нефть) путем НАА с использованием новых ядерно-физических методов на базе фотонейтронных источников. В рамках данных работ исследуются возможности применения для НАА высокоинтенсивного компактного W-Be-фотонейтронного источника на основе серийного промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5, вольфрамовой тормозной мишени, фотонейтронной бериллиевой мишени и замедлителя быстрых нейтронов. Гамма спектры облученных образцов измеряются на низкофоновом гамма-спектрометре, смонтированном в защитной камере с «активной» защитой от космического излучения с системой сбора информации на базе процессоров цифровой обработки фирмы CAEN.

18.3 Основные результаты

В отчетном году проводились работы по разработке методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров. Модернизирована низкофоновая камера с «пассивной» и «активной» защитой с прецизионным гамма-спектрометром на базе детектора из особочистого германия. Для работы с прецизионным гамма-спектрометром на базе детектора из особочистого германия была запущена и проверена в эксплуатации система сбора информации на базе аппаратуры цифрового анализа формы импульсов фирмы CAEN при использовании низкофоновой камеры с активной защитой. С помощью этой аппаратуры и программного обеспечения проведены измерения уровня фона низкофоновой камеры, который составил ~ 0,8 имп/с для измеряемого интервала энергий 100 – 3000 кэВ.

Для проведения работ по нейтронно-активационному анализу создана компьютерная модель фото-нейтронного W-Be-источника тепловых нейтронов. Совместно с ЛФЯР и ЛНИ проведены исследования и расчеты параметров источника с целью получения максимальной плотности потока тепловых нейтронов в измерительной полости камеры (в центре замедлителя). Оптимизация параметров источника выполнена с помощью программы MCNP5 (Monte-Carlo-N-Particle), моделирующей процессы взаимодействия, гамма-квантов. электронов и нейтронов с конструкционными материалами источника. Оценены значения потоков быстрых и тепловых нейтронов внутри и снаружи источника. Показана возможность достижения плотности тепловых нейтронов в измерительной полости порядка 10^8 нейтрон/см^2/с.

С учетом результатов моделирования изготовлен вариант фото-нейтронного W-Be-источника тепловых нейтронов и установлен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5.

Проведена подготовка аппаратуры и программного обеспечения для измерения наведенной под действием нейтронов активности образцов в рабочей полости источника и оценки плотности потока нейтронов в ней. Проведены измерения с источником Na-22 эффективности германиевого спектрометра низкофоновой камеры для линии 511 кэВ, которая составила 5,56% и пробные измерения плотности потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника по активации образца Cu-64, которая составила ~10^7 нейтрон/см^{2}с при среднем токе электронов 10 мкА.

18.3 Доклады на международных конференциях.

1 Andreev A.V., Ilic R.D., Konobeevsky E.S., Latysheva L.N., Sobolevsky N.M., Soloduhov G.V., Zuyev S.V./ Optimization of a photoneutron W-Be-source of thermal neutrons // LXIV International Conference “NUCLEUS 2014” “Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies”, Minsk, July 1-4, 2014, Book of Abstracts, p. 253.

2 А.В.Андреев, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, Л.Н.Латышева, М.В.Мордовской, Н.М.Соболевский, Г.В.Солодухов, Р.Д.Илич / Источник нейтронов на основе электронного ускорителя ЛУЭ-8-5, фотонейтронной W-Be мишени и замедлителя-формирователя нейтронного спектра // Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», 17-21 Ноября, 2014, Москва, МИФИ.

Подана заявка на грант РФФИ 2015 г. № 15-03-08772 «Исследование возможностей применения W-Be-фотонейтронного источника для разработки новых инструментальных методик нейтронно-активационного анализа с использованием высокочувствительного гамма-спектрометра на основе низкофоновой камеры с детектором из особочистого германия с антикомптоновской защитой», руководитель – Андреев А.В.

18.4 Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8

Научные руководители: Г.В.Солодухов (ЛФЯР), А.В.Андреев (ЛАЯ).

Отв. исполнители:

Громов А.М.(ЛФЯР),

Зуев С.В., снс, кфмн (ЛАЯ)

Бурмистров Ю.М., мнс (ЛАЯ)

Мордовской М.В., снс, кфмн (ЛАЯ)

Исполнители:

Пономарев В.Н.(ЛФЯР)

Тишин В.В.(ЛАЯ)

Собинин С.Л.(ЛАЯ)

18.4 Реферат

ТЕПЛОВЫЕ И БЫСТРЫЕ НЕЙТРОНЫ, ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ, ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК, УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ

Исследования по теме направлены на разработку высокоинтенсивного компактного W-Be-фото-нейтронного источника на основе серийного промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5, вольфрамовой тормозной мишени, фото-нейтронной бериллиевой мишени и замедлителя быстрых нейтронов. Источник предполагается использовать для проведения работ по разработке новых методик нейтронно-активационного анализа с улучшенными метрологическими характеристиками, исследования конденсированных сред, радиационного материаловедения и других физических задач с использованием тепловых и быстрых нейтронов.

18.4 Основные результаты

Совместно с ЛФЯР и ЛНИ создана компьютерная модель фото-нейтронного W-Be-источника тепловых нейтронов, проведены исследования и расчеты параметров источника с целью получения максимальной плотности потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника (в центре замедлителя). Оптимизация параметров источника выполнена с помощью программы MCNP5 (Monte-Carlo-N-Particle), моделирующей процессы взаимодействия, гамма-квантов. электронов и нейтронов с конструкционными материалами источника. Оценены значения потоков быстрых и тепловых нейтронов внутри

и снаружи источника. Показана возможность достижения плотности тепловых нейтронов в измерительной полости порядка 10^8 нейтрон/см^{2}с.

С учетом результатов моделирования изготовлен вариант фото-нейтронного W-Be-источника тепловых нейтронов. В источнике предусмотрены как внутренняя полость для облучения образцов тепловыми нейтронами, так и каналы для вывода тепловых и быстрых нейтронов из источника. Монтаж источника был проведен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 (см. рис.). Все работы по изготовлению источника проводились силами исполнителей темы. Для оптимального расположения источника были проведены дополнительные работы на линейном ускорителе электронов: установлен дополнительный удлинитель вакуумпровода, проведена юстировка пучка, установлено дополнительное охлаждение вольфрамовой мишени.

Рисунок 4. Фото-нейтронный источник в процессе монтажа на ускорителе ЛУЭ-8-8

Проведены пробные сеансы на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5. Плотность потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника была оценена по активации образца Cu-64 и составила ~10^7 нейтрон/см^{2}с при среднем токе электронов 10 мкА. Проведено измерение потока быстрых нейтронов в выводном канале источника.

18.4 Доклады на международных конференциях

Andreev A.V., Ilic R.D., Konobeevsky E.S., Latysheva L.N., Sobolevsky N.M., Soloduhov G.V., Zuyev S.V./ Optimization of a photoneutron W-Be-source of thermal neutrons // LXIV International Conference “NUCLEUS 2014” “Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies”, Minsk, July 1-4, 2014, Book of Abstracts, p. 253.

А.В.Андреев, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, Л.Н.Латышева, М.В.Мордовской, Н.М.Соболевский, Г.В.Солодухов, Р.Д.Илич / Источник нейтронов на основе электронного ускорителя ЛУЭ-8-5, фотонейтронной W-Be мишени и замедлителя-формирователя нейтронного спектра // Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», 17-21 Ноября, 2014, Москва, МИФИ.

18.5 Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы

Основные исполнители:

Суркова Инна Владимировна, снс, кфмн

Мордовской Михаил Вадимович, зав.сект., кфмн

Осипчук Игорь Иванович, нс, кфмн

18.5 Реферат

ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СО СВЯЗЬЮ КАНАЛОВ, НЕЙТРОН-ЯДЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, МАГИЧЕСКИЕ И ПОЛУМАГИЧЕСКИЕ ЧИСЛА НУКЛОНОВ

Ранее в ЛАЯ было установлено существование плавной зависимости неупругих сечений нейтронов от произведения чисел валентных нуклонов ядра-мишени — так называемая N_pN_n–систематика неупругих сечений нейтронов. Такая систематика, в частности, позволила определить значения ряда нетрадиционных магических (или полумагических) чисех нуклонов и таким образом легла в основу разработанного метода поиска полумагических чисел, на основе анализа нейтронных данных в терминах оптической модели со связью каналов. Применение этого метода для уже известных (с разной степенью достоверности) полумагических чисел N=38, 56, 64 и Z=40, 64 показало полное совпадение результатов такого применения с результатами, полученными ранее другими авторами. Это совпадение может рассматриваться как свидетельство надежности предложенного метода.

18.5 Основной результат

В рамках оптической модели со связью каналов (ОМСК) проведен анализ экспериментальных данных по нейтрон–ядерному взаимодействию для четно-четных изотопов в области массовых чисел $56 \leq A \leq 246$ при энергии нейтронов 0.04–3 МэВ. С целью единого описания совокупности данных при этих энергиях нейтронов изучались проявления оболочечных эффектов в нейтронных сечениях.

Получено указание на появление нетрадиционного магического числа в свойствах ядра $^{68}_{30}Zn_{38}$. Исследованы эффекты проявления подоболочки N = 28–38 для других ядер. По результатам работы подготовлен препринт.

18.5 Публикации

1. М.В. Мордовской, И.В. Суркова // Поведение произведения чисел валентных нуклонов NpNn для цепочки четно-четных изотопов ядер Ni и Zn // Известия РАН. Сер. Физ. 2014. Т. 78. № 5. С.658.

2. M. V. Mordovskoy and I. V. Surkova /Isotopic Features of the N_pN_n Function for Even–Even Isotope Chains of Ni and Zn //Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2014, Vol. 78, **p. 466**

18.6 Разработка основ создания средств аварийной радиационной защиты третьего поколения (АРЗ_3) и методов испытаний и контроля для повышения безопасности экологической чистоты ядерной энергетики

Руководитель темы: Бенецкий Борис Алексеевич

Основные исполнители:

Лифанов Михаил Николаевич, нс, кфмн

Плотникова Марина Викторовна, нс

18.6 Реферат

Ключевые слова: РАДИАЦИЯ, АВАРИЯ, ОБЛУЧЕНИЕ, ТЯЖЕСТЬ ПОСЛЕДСТВИЙ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ДОЗИМЕТРИЯ, ДОЗИМЕТР, РАДИОМЕТР, ГАММА ДОЗЫ, БЕТА ДОЗЫ, КОРРЕЛЯЦИЯ ДОЗ, СОЧЕТАННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ, ПОРАЖАЮЩИЙ ФАКТОР

В результате ранее проведенных работ (годовой отчет по теме 2013) была сформулирована проблема контроля радиационной безопасности пожарных при ликвидации аварий и ЧП на радиационно-опасных объектах. Эта проблема состоит в наличии разрыва между определениями (понятий) дозовых характеристик и норм радиационной безопасности (в частности − пределов доз), с одной стороны и реальными возможностями инструментальных средств и методов измерений необходимых параметров многофакторного воздействия радиационных поражающих факторов при авариях с другой. Отчет содержит результаты анализа некоторых аспектов этой проблемы и рекомендации по их разрешению.

18.6 Введение

Исследования по теме являются продолжением ранее выполненных работ. Б.А. Бенецкий, М.Н. Лифанов, М.В. Плотникова /Проблемы радиационной безопасности и дозиметрии при авариях в условиях применения индивидуальных средств радиационной защиты и при их отсутствии //Препринт ИЯИ – 1380/2014, 40 С. и М.Н. Лифанов, Б.А. Бенецкий /Проблемы дозиметрии при ликвидации последствий ядерных и радиационных аварий//Ядерная физика и инжиниринг, 2013, том 4, № 12, С 1072-1076.

Проводился анализ современного состояния радиационной безопасности пожарных и ликвидаторов и возможностей контроля воздействия поражающих факторов при сочетанном облучении, сопровождающем аварии и пожары на радиационно-опасных объектах. Суть проблемы заключается в том, что основной предел доз установлен Нормами радиационной безопасности для эффективной эквивалентной дозы Е – величины, не измеряемой в условиях аварийного облучения. Эта величина является количественной характеристикой сочетанного воздействия радиационных поражающих факторов на весь организм человека, учитывающей как относительную биологическую эффективность ионизирующих излучений, так и радиационную чувствительность органов и тканей. Вследствие чего она наиболее полно отражает совокупное воздействие радиации на организм человека. В стационарных условиях требования по обеспечению радиационной безопасности (в форме ограничений допустимой плотности потоков при внешнем облучении или пределов годового поступления радиоактивности в организм) могут быть выполнены для каждого радиационно-поражающего фактора в отдельности. И для их совокупности путем сложения доз при наличии соответствующего инструментального обеспечения. Такое возможно на рабочем месте в стационарных условиях, но невыполнимо при чрезвычайной ситуации. К тому же сочетание при авариях факторов радиационной природы, или комбинация с нерадиационными поражающими факторами может проводить к их взаимоотягощающему влиянию. Так, термический ожог 10% кожи или гамма облучение всего тела в дозе 1 Гр по отдельности не приводят к смертельным исходам. Однако их комбинированное воздействие (без лечения подопытных животных) вызывает 42 % летальных исходов. Все это заставляет искать пути, если не измерений, то хотя бы оценок вкладов различных поражающих факторов в формирование тяжести общего поражения при аварийных ситуациях.

18.6 Основная часть

Несмотря на наличие рекламных материалов о специальных разработках дозиметрических приборов для пожарных и ликвидаторов, анализ ситуации приводит к выводу о неудовлетворенной востребованности разработок дозиметрических приборов, предназначенных для использования при ликвидации пожаров и аварий на радиационно-опасных объектах. Анализ показал, что не существует приборной базы для оперативного аварийного контроля за бета излучением. Вследствие такой ситуации возможным путем решения может оказаться проведение частичного, например, гамма и нейтронного индивидуально-коллективного дозиметрического контроля с поправкой на относительный

вклад в общую дозовую нагрузку «неосновных» поражающих радиационных факторов. Среди таковых бета облучение занимает, возможно, первое место. В Российском национальном докладе «20 лет чернобыльской катастрофы» в разделе Медицинские последствия катастрофы приведены данные о тяжело пострадавших: «В первые 3 месяца умерли 28 человек, при этом 19 из них – в связи с тяжелыми бета поражениями кожи…» Следствием бета облучения является местная (не глубокая, но высокоэффективная) лучевая травма. Она проявляется про дозах в коже более 8 Зв в виде радиационного (лучевого) ожога и, так же как при термическом ожоге, характеризуется взаимоотягощающим влиянием на костно-мозговое поражение, которое в свою очередь следствием гамма облучения. Даже при меньших дозах, приводящих к субклинической форме (когда радиационный ожог не проявляется), бета облучение маскирует тяжесть поражения кроветворных органов в период максимального проявления последствий гамма облучения. Оно также затягивает период восстановления кроветворения при выздоровлении. И хотя ведущим является гамма облучение, такого рода последствия и определяют важность учета бета компонента в сочетанном поражении. К тому же бета ожог является наиболее мучительным последствием аварийных облучений.

Были рассмотрены возможности оценки бета доз, формируемых при аварийном сочетанном облучении, сопровождающем аварии на ядерных реакторах Возможной альтернативой может оказаться оценка на основании корреляционной связи доз гамма и бета излучений. Предпосылкой к тому являются причинные связи при генерировании источников излучений в случае аварий на реакторах. Если авария не сопровождается возникновением самопроизвольной цепной реакции, основной причиной возникновения источников радиации является ранее произошедшее деление ядер. Деление приводит к образованию спектра продуктов деления (в том числе радиоактивных нуклидов) и сопровождается бета распадами осколков с последующим гамма излучением. Вследствие этого дозовые характеристики компонентов сочетанного облучения, такие как эквивалентная доза внешнего гамма облучения тела H_γ и эквивалентная доза внешнего бета облучения кожи H_β, должны быть коррелированны. Были рассмотрены как возможность установления эмпирических зависимостей между усредненными дозовыми характеристиками, так и возможность применения метода линейной регрессии, позволяющего связать значения среднего логарифма эквивалентной дозы бета излучения с логарифмом инструментально измеренной гамма дозы.

Таблица 1

Эквивалентная доза внешнего гамма облучения тела H_γ, примерно равная ($\sim E_\gamma$). Данные измерений Зв	Эквивалентная доза внешнего бета облучения кожи H_β. Данные медико-биологических наблюдений Зв	Эквивалентная доза внешнего бета облучения кожи H_β. Данные расчетов на основе метода линейной регрессии, Зв	Вклад бета облучения кожи в эффективную эквивалентную дозу облучения тела E_β Зв	Доля вклада бета облучения кожи в % от основного поражающего фактора (внешнего гамма облучения тела) %
1	*2*	*3*	*4*	*5*
0,65 ± 0,35	<2	*2,0* [2,0]	*0,020* [0,020]	3,1
0,95	3,8	*3,5* [3,6]	*0,035* [0,036]	3,8
1,40 ± 0,40	6,5±4,5	*6,3* [6,4]	*0,063* [0,064]	4,5
2,75 ± 0,75	25±15	*17,5* [17,6]	*0,175* [0,176]	6,4
4,00 ± 1,00	34±9,0	*30,8* [30,9]	*0,308* [0,309]	7,8
9,45	100	*112,9* [114,0]	*1,129* [1,114]	12,0

Во втором случае для этого были использованы данные наблюдений (гамма дозы и дозы бета облучения кожи, определенные методом биологической дозиметрии) и модель доминирующего влияния человеческого фактора на формирование аварийных доз. Был разработаны способы оценок и проведены соответствующие расчеты, результаты которых в сравнении с данными наблюдений при авариях на ЯЭУ приведены в таблице 1. Из данных таблицы следует, что с увеличением дозы гамма излучения доза бета растет не только по абсолютной величине, но и относительно дозы «основного» излучения.

При этих оценках учитывалось следующее. Вклад гамма излучения как основного поражающего фактора определяется тем, что оно воздействует на все органы и ткани, тогда формально его взвешивающий коэффициент для тела $W_т \approx 1$, и эквивалентная доза внешнего гамма облучения H_γ примерно равна его эффективной эквивалентной дозе ($H_\gamma \approx E_\gamma$). При определении вклада бета излучения в эффективную эквивалентную дозу взвешивающий коэффициент для кожи составляет $W_к = 0{,}01$. Соответствующий вклад бета излучения представлен в четвертом столбце таблицы, он хорошо описывается аппроксимирующей зависимостью

$$E_\beta = 0{,}038\, H_\gamma^{\,1{,}51} \qquad (1)$$

(курсив в третьем и четвертом столбцах). Его доля в процентах от основного поражающего фактора H_γ представлена в пятом столбце. Практически такой же результат (скобки квадратные) был получен непосредственно из прямой нормальной регрессии $\ln H_\beta$

по ln H_γ , параметры которой следует непосредственно из данных медицинских наблюдений и измерений гамма доз:

$$H_\beta = 3{,}846\ H_\gamma^{\ 1{,}503} \qquad (2).$$

И, соответственно, вклад бета облучения кожи в эффективную эквивалентную дозу составляет:

$$E_\beta = 0{,}\ 03846\ H_\gamma^{\ 1{,}503} \qquad (3)$$

Казалось бы относительно небольшой вклад бета излучения в эффективную эквивалентную дозу, в ряде случаев может иметь тяжелые последствия. Лучевой ожог – это детерминированное последствие облучения, имеющее пороговый характер (т.е. возникающее при дозах облучения кожи выше определенной величины). Он, как упомянуто выше, является наиболее мучительным последствием облучения и обладает способностью взаимоотягощающего воздействия на результат гамма облучения. В отличие от термического, лучевой ожог проявляется не сразу, а спустя часы или сутки (в зависимости от тяжести). На основании зависимости (2) может быть получена оценка гамма дозы, соответствующей порогу возникновения лучевого бета ожога. Если по бета дозе порог составляет не измеряемую в аварийных условиях величину H_β = 8 - 10 Зв, то бета ожог при сочетанном облучении вследствие аварии на реакторе следует ожидать при измеренных гамма дозах свыше 1,6-1,9 Зв. Т.е. вблизи границы доз, определяющей различие поражений кроветворного костного мозга, приводящих к возникновению ОЛБ-1 или ОЛБ-2.

Рассматривались требования к приборной базе ДАПП (дозиметрической аппаратуры профессионального применения) и методам испытаний приборов инструментального дозиметрического обеспечения. Отбор индивидуальных дозиметрических приборов электронно-измерительного типа, пригодных для оснащения пожарных проводился из продукции, выпускаемой серийно предприятиями России и Республики Беларусь для профессионального использования. Основными критериями служили: диапазон измерения дозы, диапазон измерения мощности дозы, вид излучения (гамма-лучи, нейтроны). Также учитывались следующие показатели: способ представления информации, тип корпуса, способ крепления, устройство электропитания, наличие памяти и интерфейса связи с компьютером. В результате были отобраны пять дозиметров, представленных в таблице 2.

Верхний предел динамического диапазона приборов составляет единицы Зиверт для дозы и десятки Зиверт $час^{-1}$ для мощности дозы, обеспечивая тем самым измерения в аварийных условиях. Вместе с тем приборы имеют высокую чувствительность (0,01÷1 мкЗв), что даёт возможность использовать их не только в аварийных, но и в контролируемых условиях. В таблице приведены данные, характеризующие устойчивость приборов к внешним воздействиям: температуре и влажности согласно НТД

производителей. Поскольку предполагается, что дозиметры будут входить в комплектацию оснащения пожарных, они непременно должны пройти специализированные испытания в соответствующих условиях и, возможно, оснащены дополнительными мерами защиты. Кроме электронных приборов рассматривались химические дозиметры, представляющие собой индикаторы, меняющие цвет в зависимости от дозы. Привлекательность таких индикаторов определяется следующим. Преимущество химических дозиметров состоит в простоте устройства – в виде липкой ленты. Обеспечивается быстрота и наглядность определения дозы, при этом отсутствуют электропитание, хрупкие детали .Практически не играет роли их вес Химический дозиметр способен фиксировать результат измерения для архивирования, он может быть изготовлен тканеэквивалентным. Отечественная промышленность выпускает химические дозиметры серийно, но они предназначены для контроля технологических процессов, связанных с использованием ионизирующего излучения высокой интенсивности, например, для стерилизации медицинских препаратов. При этом измеряются дозы в диапазоне 1 – 50 кГр. Дозиметры с такой низкой чувствительностью для наших целей неприемлемы.

Таблица 2

Параметр	Наименование дозиметра				
	ДКС-АТ3509С	ДКГ-05Д	ДВС-02С	ДКГ-РМ1621	ДКГ-08А "Скаут"
	1	2	3	4	5
Детектор	кремниевый планар.детектор	кремниевые полу-проводниковые	многослойный, кремниевый	сч. Гейгера-Мюллера	два сч. Гейгера-Мюллера
Диапазон.изм. мощности дозы	0,1 *мкЗв/ч*÷ 5 *Зв/ч*	1 *мкЗв/ч*÷ 10 *Зв/ч*	1 *мкЗв/ч*÷ 10 *Зв/ч*	0.01 *мкЗв/ч*÷ 2.0 *Зв/ч*	0,1 мкЗв/ч÷ 10 Зв/ч
Диапазон.изм. дозы	1*мкЗв*÷10 *Зв*	0,1 *мкЗв*÷15 *Зв*	0,1 *мкЗв*÷15 *Зв*	0.01 *мкЗв*÷9.99 *Зв*	0,01 мкЗв÷100 Зв
Вид излучения	гамма 30 *кэВ*÷10 *МэВ*	гамма 0,05 ÷ 3,0 *МэВ*	гамма 0,05÷6 *МэВ*, нейтроны 0,023*эВ*÷20 *МэВ*	гамма 10 кэВ÷20 *МэВ*	гамма 0,05÷3,0 МэВ
Габариты, вес	58x104x23 *мм*, 100*г*	97x48x32 *мм*, 90 *г*, с клипсой	97x48x32 мм, 90 г, с клипсой	87 x 72 x 35 *мм*, 150*г*; поясной	120 x 65 x 22 мм 200 г
Рабочая температура	– 10 ÷ + 40°С	– 40 ÷ + 50°С	– 20 ÷ + 50°С	– 40 ÷ + 60°С	– 20 ÷ + 50°С
Влажность	до 90% при 35°С	до 90% при 25°С	до 95% при 35°С	до 98% при 35°С	до 95% при 35°С
Герметичный дезактивир. корпус		+	+	+	
Стоимость	26000 руб	23800 руб	18750 руб	21900 руб	18700 руб
Страна, производитель	Белоруссия, АТОМТЕХ	Россия, Зеленоград	Россия, Зеленоград	Россия, Зеленоград	Россия, Зеленоград

Возможно, в будущем появятся более приемлемые варианты. чему есть основания. Среди патентных продуктов, зарегистрированных в России, имеется «Персональный и территориальный самопоказывающий предупреждающий радиационный дозиметр моментального действия» (патент №2345384 US). Дозиметр имеет заявленную чувствительность от 1 мГр, т.е. нижний предел измеряемой им дозы соответствует годовому пределу дозы техногенного гамма и рентгеновского облучения для населении. Под воздействием ионизирующего излучения чувствительный материал изменяет цвет, предоставляя пользователю или медицинскому персоналу немедленную информацию о накопленной поглощенной дозе при «совокупном» (не имеющий определения термин НТД) воздействии излучения на пострадавшего. Дозиметр с такой чувствительностью может найти применение в качестве только дополнительного средства защиты и только для

профессионалов группы А (для которых предел эффективной эквивалентной дозы установлен в размере 20 мЗв в год) и только в условиях повышенного облучения видами излучений с взвешивающими коэффициентами для определения эквивалентных доз W =1. Тогда доза в Греях равна дозе в Зивертах. Поиск на основании технической и рекламной информации показал, что такие радиационно-чувствительные цветовые индикаторы в настоящее время обладают слишком высоким порогом чувствительности. Они к тому же способны изменять свой цвет не только под воздействием ионизирующей радиации, вследствие чего требуют применения добавочных индикаторов. Цветовые индикаторы не обладают избирательностью к виду регистрируемого излучения, без чего невозможно определение доз в единицах эквивалентной дозы, учитывающих относительную биологическую эффективность излучения (в Зивертах).

Возможным путем решения проблемы дозиметрии при авариях может оказаться проведение частичного, например, гамма и нейтронного индивидуально-коллективного дозиметрического контроля с поправкой на относительный вклад в общую дозовую нагрузку «неосновных» поражающих радиационных факторов. По материалам ранее выполненных в этом направлении исследований проводились предварительные работы по подготовке патентной заявки на способ оценки тяжести аварийных сочетанных радиационных поражений. Способ, состоящий в инструментальном определении эквивалентных доз части воздействующих на человека радиационных (гамма, нейтроны) поражающих факторов с добавлением в эффективную эквивалентную дозу вклада доз, формируемых не измеряемыми поражающими факторами.

При планирования мероприятий по ликвидации последствий ядерных и радиационных аварий недостаточно применение только средних показателей поражений. Необходимо знание распределений количественных мер (доз) поражающих факторов. Согласно существующим данным наблюдений при аварийных облучениях распределения индивидуальных доз описываются логнормальным распределением. Такие распределения, как у ликвидаторов, так и у свидетелей, наблюдались при аварии на атомных подводных лодках с ЯЭУ и на ЧАЭС. Ранее (см. отчет за 2013 г.) была разработана обобщенная модель доминирующего влияния человеческого фактора в экстремальных ситуациях, описывающая имеющиеся данные наблюдений. Результаты этих работ обобщены в статье Б.А. Бенецкий /О влиянии человеческого фактора на распределение тяжести поражений при ядерных и радиационных авариях и на последствия других чрезвычайных ситуаций// КСФ, 2014, т.41, № 1, С. 12–17. Что, в свою очередь, на основании модели доминирующего влияния человеческого фактора позволило сформулировать способ прогнозирования распределений тяжести радиационных поражений при авариях

Статья. Б.А. Бенецкий /«О прогнозировании распределений тяжести индивидуальных поражений при радиационных авариях». // В печати, КСФ, рег. № 5101 и описание к заявке на патент «Способ прогнозирования распределений тяжести индивидуальных поражений при радиационных авариях», авторы Б.А. Бенецкий, М.В. Плотникова. Ниже приведены данные о публикациях в 2014 году.

18.6 Публикации

Статьи в рецензируемых российских журналах

1. Б.А. Бенецкий /О влиянии человеческого фактора на распределение тяжести поражений при ядерных и радиационных авариях и на последствия других чрезвычайных ситуаций// КСФ, 2014, т.41, № 1, С. 12–17.

2. B.A. Benetskii /On the …//BULLETIN OF THE LEBEDEV PHYSICS INSTITUTE, 2014, v. 41, No. 1, pp. 23-32. 28-32’

3. М.Н. Лифанов, Б.А. Бенецкий /Проблемы дозиметрии при ликвидации последствий ядерных и радиационных аварий//Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 4, № 12, С 1-6.

Препринт ИЯИ РАН

Б.А. Бенецкий, М.Н. Лифанов, М.В. Плотникова/Проблемы радиационной безопасности и дозиметрии при авариях в условиях применения индивидуальных средств радиационной защиты и при их отсутствии//Препринт ИЯИ – 1380/2014, 40 С.

В печати

Б.А. Бенецкий /«О прогнозировании распределений тяжести индивидуальных поражений при радиационных авариях». // В печати, КСФ, рег. № 5101.

Патенты

Патент на полезную модель № 137628 Имитатор-тренажер дозиметра радиометра // Патентообладатель: ИЯИ РАН, автор: Лифанов М.Н., Заявка № 2013136744, приоритет полезной модели 06 августа 2013 г., зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 20 февраля 2014г.

Подана заявка на патентование способа «Способ прогнозирования распределений тяжести индивидуальных поражений при радиационных авариях», авторы Б.А. Бенецкий, М.В. Плотникова.

18.6 Заключение

Разработан метод оценки относительного вклада бета доз, формируемых при аварийном сочетанном гамма-бета облучении для определения эффективной эквивалентной дозы в режиме реального времени. Метод основан на предположении о наличии корреляционной связи доз гамма и бета излучений и поиске эмпирических закономерностей в соотношениях дозовых характеристик. Предпосылкой к такому подходу является наличие причинных связей (цепочки ядерных превращений, спектры, каскады переходов) при генерировании источников излучений в случае аварий на реакторах. Дозовый вклад бета излучения в эффективную эквивалентную дозу при фиксированной эквивалентной гамма дозе может быть в среднем хорошо описан аппроксимирующей данные наблюдений зависимостью (1). Практически такой же результат (3) может быть получен непосредственно из прямой регрессии логарифма средней эквивалентной дозы бета облучения $\ln H_\beta$ по логарифму дозы гамма облучения $\ln H_\gamma$ (2). Такое согласие является доводом в пользу справедливости предположения о наличии корреляции доз, а простота зависимостей (1) и (3) предопределяет простоту алгоритма при расчете поправок.

Из соотношений (1,2) следует также оценка гамма дозы, соответствующей порогу возникновения лучевого бета ожога при сочетанном облучении. Бета ожог, согласно данным биологической дозиметрии, возникает при бета дозах порядка 8-10 Зв, проявляется, в зависимости от степени, через сутки или часы и вследствие аварии на реакторе возможен при гамма дозах свыше 1,6-1,9 Зв. Это значение находится вблизи границы гамма дозы (2 Зв), определяющей поражение кроветворного костного мозга, приводящее к возникновению ОЛБ-2. В реальности характерные проявления субтотального бета ожога наблюдались у пострадавших при авариях на ЯЭУ, у которых были диагностированы ОЛБ не ниже 2 степени, что также говорит в пользу правильности полученных результатов. В целом, эти результаты являются некоторым приближением к решению проблемы дозиметрии многофакторного воздействия ионизирующей радиации при авариях.

19 Лаборатория нейтронных исследований

Руководитель работ д.ф.-м.н. Э.А.Коптелов.

Нейтронная физика, технология интенсивных источников нейтронов, исследование конденсированных сред, радиационное материаловедение.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Развитие Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, приборного парка и средств математического моделирования для исследований по физике деления, нейтрон-ядерных взаимодействий и конденсированных сред.

Использование методов рассеяния нейтронов, рентгеновского и гамма излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред.

Развитие экспериментальной техники для исследования материалов тепловыми и эпитепловыми нейтронами.

Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов. Структура и динамика наноструктур и наноматериалов: исследования с помощью комплекса нейтронографических установок на импульсных источниках нейтронов ИН-06 и Радэкс ИЯИ РАН.

Измерение нейтронных сечений с использованием метода по времени замедления нейтронов в свинце.

Исследование трансмутации ядерных материалов и разработка технологии подкритических систем на пучках заряженных частиц.

Разработка высокоэффективных твердотельных детекторов нейтронов. Руководитель работ к.ф.-м.н. Садыков Р.А.

Времяпролётная спектрометрия неупругого рассеяния нейтронов с большим телесным углом на нейтронном комплексе ИЯИ РАН.

Разработка многодетекторных систем и нейтронного диффрактометра нейтронного комплекса ИЯИ РАН.

Список исполнителей:

Алексеев Андрей Алексеевич	н.с.
Аксенов Сергей Николаевич	м.н.с.
Гаврилюк Александр Григорьевич	с.н.с., к.ф.-м.н.
Латышева Людмила Николаевна	н.с.
Лебедь Юлия Борисовна	н.с., к.б.н.
Литвин ВасилийСергеевич	м.н.с. к.ф.-м.н
Клементьев Евгений Станиславович	с.н.с., к.ф.-м.н.
Кузнецов Валерий Леонидович	с.н.с., к.ф.-м.н.
Кузнецова Евгения Васильевна	с.н.с., к.ф.-м.н.
Садыков Равиль Асхатович	зав.сект., к.ф.-м.н.
Сидоркин Станислав Федорович	зав.сект., к.ф.-м.н.
Семенов Алексей Алексеевич	с.н.с., к.ф.-м.н.
Соболевский Николай Михайлович	зав.сект, д.ф.-м.н.
Трунов Дмитрий Николаевич	аспирант

19 Реферат

Отчет Лаборатории нейтронных исследований за 2014 год отражает основные результаты, полученные сотрудниками в рамках работ по выполнению Государственного задания отчетного периода Плана научных исследований ИЯИ РАН и Программ РАН. Отчет содержит также список публикаций по результатам работ.

19 Введение

Научная и научно-организационная деятельность Лаборатории нейтронных исследований ИЯИ РАН направлена на проведение и развитие работ по выполнению Государственного задания, в том числеразработку и оснащение научным оборудованием импульсного источника тепловых нейтронов ИН-06 (spallation типа) на основе сильноточного линейного ускорителя ионов водорода, разработку и реализацию программы фундаментальных и прикладных исследований на базе Нейтронного комплекса (включая облучательное устройство мишенно-ловушечного узла на прямомканале протонов – установку РАДЭКС с времяпролетным нейтронным спектрометром, импульсный нейтронный источник ИН-06, спектрометр по времени замедления в свинце СВЗ-100), подбор и подготовку необходимых высококвалифицированных научных и инженерно-технических кадров.

В состав Лаборатории нейтронных исследований входят:

Расчетно-теоретический сектор.

Сектор конденсированных сред.

Сектор импульсных нейтронных источников, включая группу нейтрон-ядерных взаимодействий.

Сектор электроники и технического обеспечения.

19 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

19.1 Развитие Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, приборного парка и средств математического моделирования для исследований по физике деления, нейтрон-ядерных взаимодействий и конденсированных сред

19.1.1 Импульсный нейтронный источник ИН-06 ИЯИ РАН. Расчетно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней spallation-типа. Математическое моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и улучшения параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений

Завершена длительная серия расчетов по мишени на основе ^{237}Np, в рамках которой проведено сравнения нептуниевой мишени с твердотельными мишенями на основе ^{238}U и W. Рассчитан выигрыш от использования нептуниевой мишени и условия ее использования. Подготовлены исходные данные для разработки конструкторской документации (рекомендации для технического задания), ведется подготовка публикаций – развернутой в виде препринта и сокращенной в виде статьи.

Начаты расчетные работы по трансмутации минорных актиноидов в прямом протонном пучке. в мишени на основе жидких солей.

Обеспечена текущая эксплуатация установки РАДЕКС в том числе в пучковом сеансе.

Изготовлены отдельные детали для нового мишенного модуля. Ведутся работы по подготовке отдельной публикации по новому мишенному модулю.

Завершены первоначальные обсуждения по возможности создания бесконтактной диагностики мишенных окон на основе тепловизионной техники. Выявлен круг вопросов, требующих дальнейшего исследования и экспериментального моделирования.

Подготовлены рекомендации для технического задания на разработку мишени мощностью ~ 3 КВт для СВЗ – 100.

Заведующий сектором ЛНИ, к.ф.-м.н. С.Ф.Сидоркин.

По результатам работ, направленных на дальнейшее развитие транспортного кода SHIELD как инструмента компьютерного моделирования процессов взаимодействия частиц и ядер с веществом, подготовлены публикации

1 A.Krylov, M.Paraipan, N.Sobolevsky, G.Timoshenko, V.Tret'yakov. GEANT4, MCNPX, and SHIELD Code Comparison Concerning Relativistic Heavy Ion Interaction with Matter Phys.Part.Nucl.Lett.11 (2014) 847-850 (ПисьмавЭЧАЯ).

2 Ю.Е.Титаренко, В.Ф.Батяев, К.В.Павлов, А.Ю.Титаренко, В.И.Рогов, В.М.Живун, Т.В.Кулевой (ГНЦРФИТЭФ, г. Москва); Н.М.Соболевский (ИЯИРАН, г. Москва); А.М.Волощенко (ИПМРАН, г. Москва); А.Н.Диденко, С.М.Полозов, А.Б.Колдобский, (НИЯУМИФИ, г. Москва), П.Н.Алексеев, П.А.Фомиченко, А.А.Дудников, В.А.Невиница, А.А.Седов, А.А.Фролов, А.С.Лубина, А.Л.Баланин, С.А.Субботин, А.С.Субботин (НИЦ «Курчатовскийинт», г. Москва); А.Ю.Станковский, ГердванденЭйнде (ЦентрядерныхисследованийSCK/CEN, Бельгия), С.Г.Машник (LANL, США). Анализ параметров мишенного узла жидкосолевой подкритической электроядерной установки; Атомная Энергия 117 (2014) 19-25.

3 J.Norbury, N.Sobolevsky. Fluxes of particles and nuclear fragments behind aluminum screen under GCR and SEP irradiation: Comparison HZETRN-SHIELD; 2nd NASA and FSA Technical Interchange Meeting. SINPMSU, Moscow, July 30-31, 2014.

Продолжены работы по моделированию нейтронного поля в спектрометре по времени замедления в свинце СВЗ-100 как функции времени замедления и локализации и оценкам выходавыхода нейтронов из мишени установки РАДЭКС.

Проведено Монте-Карло моделирование фото-нейтронного источника тепловых нейтронов на базе электронного ускорителя ЛУЭ-8 ИЯИ РАН (совместно с ЛАЯ и ЛФЯР ИЯИ) – изготовлен макет источника и опубликованы результаты работы

4 A.Andreev, R.Ilic, E.Konobeevsky, L.Latysheva, N.Sobolevsky, G.Solodukhov, S.Zuyev. Optimization of a Photoneutron W-Be-Source of Thermal Neutron; Poster talk at 64th Int. Conf. NUCLEUS 2014, 1–4 July 2014, Minsk, Belarus.

5 А.В.Андреев, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, Л.Н.Латышева, М.В.Мордовской, Н.М.Соболевский, Г.В.Солодухов, Р.Д.Илич. Источник нейтронов на основе электронного ускорителя ЛУЭ-8-5, фотонейтронной W-Be мишени и замедлителя-формирователя нейтронного спектра. Доклад на Сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", 17-21 ноября 2014, МИФИ.

Зав. сектором ЛНИ Н.М.Соболевский, н.с. Л.Н.Латышева.

19.1.2 Исследования по физике деления и нейтрон – ядерных взаимодействий

В рамках задачи по получению более точных параметров спектров захвата нейтронов ядрами, полученных с помощью методики спектрометрии по времени замедления разрабатывается программное обеспечение по выделению отдельных резонансов из усреднённого спектра.

Проведено сравнение временного и энергетического разрешения спектрометра СВЗ-100 при длительности протонного пучка 1мкс и 2мкс с использованием нейтрон-захватных резонансов.

Предложена конструкция детектора (делительная камера) с анодом в виде сетки для регистрации частиц имеющих малый энергетический выход. Предложена методика исследования свойств детектора новой конструкции.

1. А. А. Алексеев, А. А. Бергман , А. И. Берлев, Э. А. Коптелов, А. С. Егоров, Б.Ф.Самылин, Б.И.Фурсов, В. С. Шорин "ПРОМЕЖУТОЧНАЯ СТРУКТУРА В СЕЧЕНИИ ПОДБАРЬЕРНОГОДЕЛЕНИЯ 241Am", ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2014, том 77,№5, с. 579–582.

2. А. А. Алексеев, А. А. Бергман , А. И. Берлев, Э. А. Коптелов, А. С. Егоров, Б.Ф.Самылин, Б.И.Фурсов, В. С. Шорин "Нейтронное сечение деления и резонансные параметры 241Am". Атомная энергия, 2014, т.116 №6, с.338-344.

3. А.А.Алексеев, А.А.Бергман, А.И.Берлёв, Э.А.Коптелов, Б.Ф.Самылин, Б.И.Фурсов, В.С.Шорин, "Исследования подбарьерного деления ядер на нейтронном спектрометре по времени замедления в свинце СВЗ-100: Pu-240(n,f). Препринт ИЯИ РАН 1391/2014, октябрь 2014, Москва.

Рук.группы ЛНИ н.с. А.А.Алексеев.

19.1.3 Разработка спектрометров неупругого рассеяния нейтронов и дифрактометра на эпитепловых нейтронах

Проведена оптимизация параметров проектируемых установок второй очереди Нейтронного комплекса ИЯИ – времяпролетных нейтронных спектрометров прямой и обратной геометрии.

19.1.4 Оптимизация нейтронных исследований на Нейтронном комплексе ИЯИ РАН. Модернизация детекторных систем. Разработка и создание прототипов больших газовых и сцинтилляционных позиционно-чувствительных нейтронных детекторов

Руководитель работ: зав.сектором Р.А.Садыков

Разработана и изготовлена простая система детектирования нейтронов и накопления данных, включающая в себя секторные блоки 3He_счетчиков, усилители_формирователи, 8_канальные многостоповые времяцифровые преобразователи, генератор длительности ворот, контроллеры ветви и крейта, сопряженные с компьютером. Система предназначена для спектрографических установок на импульсном источнике нейтронов ИЯИ РАН. Импульс на выходе усилителя_формирователя привязан к быстрой электронной компоненте лавины в детекторе. Времяцифровой преобразователь за время разрешения записи от 1 до 63 мс формирует в своей памяти спектр времени пролета нейтронов. Его временной диапазон имеет 4096 градаций с квантом времени от 0.125 до 128 мкс. Драйвер ядра Linux обеспечивает высокое быстродействие системы. Программа сбора данных на основе библиотеки Qt4 распознает модули в крейте КАМАК и отображает спектры с их предварительной обработкой.

Публикации:

1. Марин В.Н., Поташев С.И., Трунов Д.Н., Поташев А.С., Аксенов С.Н., Афонин А.А., Литвин В.С., Алексеев А.А., Кононыхин А.С., Садыков Р.А. СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИХ УСТАНОВОК - ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА—2014, №6,с.37-41.

Решается актуальный для нейтронной физики вопрос замены газовых гелиевых детекторов твердотельными. Показано, что появление нового вида фотодетекторов, микропиксельных лавинных фотодиодов дает возможность детектирования слабых световых сигналов от захвата тепловых нейтронов в сцинтилляторе ZnS(Ag)/LiF большой площади. Описаны методы, позволяющие надежно регистрировать нейтроны в детекторах с эффективностью, сравнимой с традиционными гелиевыми счетчиками. Проведено исследование прототипа нового вида нейтронного детектора со съемом сигнала лавинными фотодиодами. Параметры данного твердотельного детектора – эффективность регистрации около 50%, площадь 10x200 мм2, возможность дальнейшего увеличения объема детектора

делают данный детектор полноценной альтернативой дорогостоящим гелиевым счетчикам. Предложен вариант 2-D PSD на основе SiPM и WLS-fiber.

2. В.С. Литвин, В.Н. Марин, А. И. Ивашкин,С.Х. Караевский, Д.Н. Трунов, С.Н. Аксенов, А.А. Столяров, Р.А. Садыков «Двухкоординатные сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе твердотельных фотоумножителей и световодов» Совещание по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах. «РНСИКС-2014», 27-31 октября 2014, Санкт-Петербург, Старый Петергоф.

19.1.5 СВЗ 100

С использованием программы свёртки сечений с функцией отклика спектрометра СВЗ, определена возможность исследования реакций дающих малоэнергетический выход методикой спектрометрии нейтронов по времени замедления в свинце (СВЗ).

Проведено сравнение характеристик делительной камеры и пропорционального счётчика в случае использования методики спектрометрии по времени замедления нейтронов.

Продолжалось исследование возможностей спектрометра по времени замедления нейтронов в свинце для изучения ядерных реакций имеющих малоэнергетический выход. Исследовалась возможность подавления электромагнитных помех и выделения полезных сигналов на их фоне.

Публикации:

А.А.Алексеев, В.И.Иванов, "Использование процедуры свёртки сечений нейтрон-ядерных реакций со спектром нейтроновдля оценки возможности проведения экспериментовна спектрометре СВЗ-100". Препринт ИЯИ РАН1394/2014 НОЯБРЬ 2014, Москва.

Руководитель работ: рук.группы ЛНИ н.с. А.А.Алексеев.

19.1.6 Математическое моделирование ядерных реакций и процессов взаимодействия частиц с веществом. Использование результатов в высокотехнологичных приложениях и фундаментальных исследованиях

Моделирование и анализ дозовых полей в биологической ткани под действием терапевтических пучков протонов и легких ионов с помощью кода SHIELD-HIT (совместно с Университетом г. Орхус, Дания).

Публикации:

1 A.Luehr, M.Priegnitz, F.Fiedler, W.Enghardt, N.Sobolevsky, N.Bassler. Dependence of simulated positron emitter yields in ion beam cancer therapy on modeling nuclear fragmentation. Appl. Radiat. Isot.83B (2014) 165–170.

2 J.Toftegaard, A.Luehr, N.Sobolevsky, N.Bassler. Improvements in the stopping power library libdEdx and release of the web GUI dedx.au.dk. Journal of Physics: Conference Series 489 (2014) 012003.

3 N.Bassler, D.C.Hansen, A.Luehr, B.Thomsen, J.B.Petersen, N.Sobolevsky. SHIELD HIT12A - a Monte Carlo particle transport program for ion therapy research . Journal of Physics: Conference Series 489 (2014) 012004.

19.1.7 Развитие статистических моделей мультифрагментации, испарения, деления, Ферми-развала для описания дезинтеграции возбужденных ядер

Публикации:

1 H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina, W.Trautmann. Theoretical study of projectile fragmentation in the reactions 112Sn+112Sn and 124Sn+124Sn at 1 GeV/nucleon. arXiv:1403.4786v1 [nucl-th]. Submitted to Phys. Rev. C

2 A.Ergun, H.Imal, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina. Influence of angular momentum and Coulomb interaction of colliding nuclei on their multifragmentation. arXiv:1408.2840v1 [nucl-th]. Submitted to Phys. Rev. C

Анализ новых экспериментальных данных по образованию фрагментов в ядерных реакциях с целью уточнения уравнения состояния (EoS) ядерной материи. Применение EoS при субъядерной плотности для описания процессов взрыва суперновых и нейтронных звезд.

Публикации:

1 A.Botvina.Statistical approach for supernova matter and nuclear multifragmentation Talk at the ATHENA Brussels workshop on Astrophysics, January 27-28, 2014,UniversiteLibre de Bruxelles, Belgium. http://exp-astro.physik.uni-frankfurt.de/meetings/athena-brussels-meeting/hprogram-new.php

2 N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, I.N.Mishustin. Tabulated equation of state for supernova matter including full nuclear ensemble, Astrophysical Journal, 789 (2014) 33-44, doi:10.1088/0004-637X/789/1/33

3 J.Steinheimer, T.Lang, H.vanHees, A.S.Botvina, K.K.Gudima, I.N.Mishustin, H.Stoecker, M.Bleicher. Strangeness in Quark Matter, J. Phys. Conf. Ser. 509 (2014) 012002

Развитие статистических моделей распада гиперъядерной материи, образующейся в ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях. Анализ захвата гиперонов возбужденными ядрами и распада таких ядерю

Публикации:

1. A.Botvina.Hypernuclei and hypermatter in relativistic heavy-ion reactions. Invited talk at the International SPHERE workshop, Prague, Czech Republic, September 9-11, 2014. http://rafael.ujf.cas.cz/sphere2014/presentations/Botvina_SPHERE_2014.pdf

2 A.Botvina.Production of hypernuclei from excited nuclear residues in relativistic ion collisions, Talk at the DPG Annual meeting - Frankfurt 2014, Frankfurt am Main. http://www.dpg-verhandlungen.de/year/2014/conference/frankfurt/static/hk63.pdf

3 A.S.Botvina.Production of hypernuclei from excited nuclear residues in relativistic ion collisions: New opportunities for AFTER@LHC , Invited talk at the International Workshop "Probing the Strong Interaction at A Fixed Target ExpeRiment with the LHC beams", Les Houches School, January 12 - 17 , 2014, Les Houches, France. https://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confId=8591

Зав. сектором ЛНИ Н.М.Соболевский, с.н.с. А.С.Ботвина, н.с. Л.Н.Латышева

19.2 Использование методов рассеяния нейтронов, рентгеновского и гамма излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред

Исполнители: зав. сектором ЛНИ Р.А.Садыков, с.н.с Е.С. Клементьев, с.н.с А.Г. Гаврилюк.

С помощью неупругого рассеяния нейтронов была изучена зависимость магнитного спектрального отклика в промежуточно-валентом интерметаллиде EuCu2Si2 от переданного нейтронами импульса. Была разработана процедура разделения магнитного и фононного вклада в нейтронные спектры. Выделено два пика магнитной природы – межмультиплетный переход и возбуждение, присущее основному синглетному состоянию. Обнаружена аномальная зависимость интегральной интенсивности магнитного формактора для EuCu2Si2. Исследовано валентное состояние ионов европия в данном соединении при замещении кремния на германий. Установлено необычное сосуществование дальнего магнитного порядка и сильных валентных флуктуаций в EuCu2(Si1-x, Gex)2. В системе Yb(Tm)B12 исследовано влияние замещения на туллий на спектр магнитных возбуждений. Исследованы структурные фазовые переходы в системах на основе валентно-нестабильных ионов церия.

Публикации :

1 Possible undercompensation effect in the Kondo insulator (Yb,Tm)B12, P.A. Alekseev et al., Phys. Rev. B 89 (2014) 115121.

2 Coexistence of long range magnetic order and intervalent state of Eu in EuCu2(SixGe1-x)2: evidence from neutron diffraction and spectroscopic studies, P.A. Alekseev et al., JETP Letters, v. 99., issue 3 (2014) p. 185.

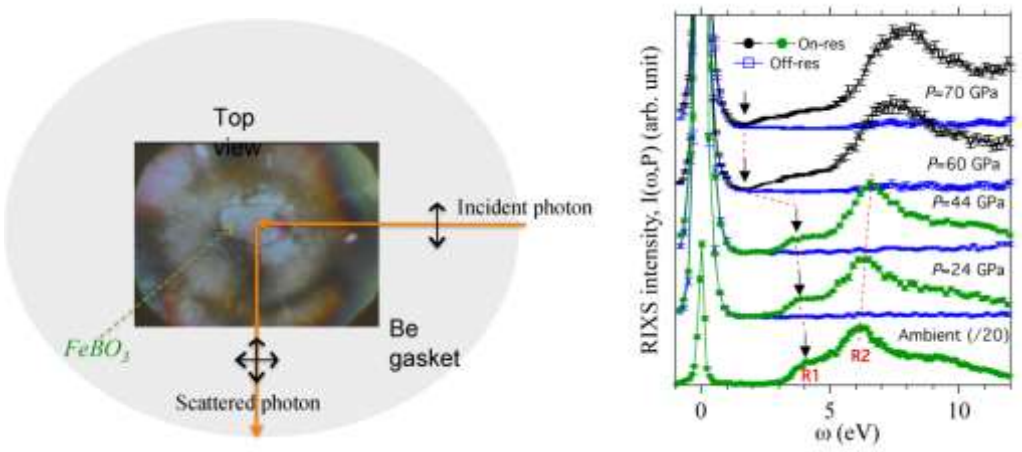
3 Аномалии структурных и динамических свойств систем на основе f- и d-элементов, Е.С. Клементьев и др., Вестник РФФИ (2014) в печати.

Мелкодисперсный порошок Fe-Cu со средним размером 800 А (данные электронного микроскопа) был получен методом испарения исходных компонентов в высоковольтной дуге высокочастотного индуктора в вакууме с последующей конденсацией в потоке инертного газа низкого давления. Проведены рентгеноструктурные и мёсбауэровские исследования зависимости свойств железо-медного (Fe-Cu) псевдосплава от метода синтеза и технологий последующей обработки [1]. Было показано, что обработка и компактирование наночастиц при высоком давлении в полноплотные компакты

существенно подавляет процессы окисления наночастиц. А также обнаружено, что эффект старения приводит к результатам сходным с эффектом давления. Таким образом, кроме таких параметров исходных наночастиц Fe-Cu как их размер, плотность и фазовый состав, на свойства конечного материала оказывают существенное воздействие продолжительность времени старения, температура и давление последующей обработки компактов. Было также обнаружено в мёссбауэровских экспериментах, что степень неупорядоченности в псевдосплаве сильно зависит от величины приложенного давления.

4 A. G. Gavriliuk, S. N. Aksenov, R. A. Sadykov, V. P. Filonenko, " Physics of aging of nanophase alloys: Mössbauer investigation of nanocrystalline iron-copper pseudoalloy ", Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 8(6), 1216-1220 (2014)

Были проведены исследования резонансного неупругого рассеяния рентгеновского излучения (RIXS- resonant inelastic x-ray scattering) на Fe-K - крае кристалла FeBO3 при высоких давлениях для изучения эволюции электронных возбуждений при спиновом кроссовере, индуцированном давлением [1]. В спектре RIXS наблюдался систематический сдвиг пиков при незначительном их уширении в области высокоспинового состояния. Одновременно со спиновым кроссовером произошел электронный переход, выразившийся в появлении новых пиков в низкоэнергетической области RIXS спектра. В результате энергетическая щель уменьшилась скачком из-за появления этих новых пиков, а не из-за резкого уширения пиков, существовавших до этого. Таким образом, этот эксперимент подтверждает наши предыдущие эксперименты, теоретические расчёты и представления [2, 3, 4] о первопричине электронного перехода диэлектрик-полупроводник в FeBO3. Основной причиной этого перехода является спиновый кроссовер электронной оболочки ионов Fe3+ из высокоспинового (S=5/2) в низкоспиновое (S=1/2) состояние. Новые пики в RIXS спектре возникающие в ходе этого электронного перехода полностью соответствуют d-d возбуждениям для новой низкоспиновой кофигурации электронной оболочки иона Fe3+(S=1/2).



(b) **(a)**

Рис. 1. На рисунке (a) приведена схема рассеяния квантов синхротронного излучения в RIXS эксперименте. На рисунке (b) приведена эволюция RIXS спектров с ростом давления в области спинового (S=5/2) →(S=1/2) кроссовера и вызванного им электронного перехода диэлектрик-полупроводник.

Литература:

[1]. Jungho Kim, Viktor V. Struzhkin, Sergey G. Ovchinnikov,Yu. Orlov, Yu. Shvyd'ko, M. H. Upton, D. Casa, Alexander G. Gavriliuk and S. V. Sinogeikin, "Pressure-induced spin transition and evolution of the electronic excitations of FeBO3: Resonant inelastic x-ray scattering results", EPL 108, 37001 (2014).

[2]. A. G. Gavrilyuk, I. A. Trojan, S. G. Ovchinnikov, I. S. Lyubutin and V. A. Sarkisyan, "The Mechanism of Suppression of Strong Electron Correlations in FeBO3 at High Pressures", JETP 99(3), pp. 566-573 (2004).

[3]. A. G. Gaviliuk, I. A. Trojan, I. S. Lyubutin, V. A. Sarkissian, S. G. Ovchinnikov, "High-pressure magnetic properties and P-T phase diagram of iron borate FeBO3" , JETP 100(4), 688–696 (2005).

[4]. I.S. Lyubutin, S.G. Ovchinnikov, A.G. Gavriliuk, V.V. Struzhkin, "Spin-crossover induced Mott transition and the other scenarios of metallization in 3dn metal compounds", Phys. Rev. B 79(8), 085125 (2009).

Проведены синхротронные рентгенографические исследования структурных свойств лангасита Ba3TaFe3Si2O14 при высоких гидростатических давлениях до 60 ГПа, создаваемых в камерах с алмазными наковальнями [1]. Также при давлениях до 20 ГПа изучены мессбауэровские спектры поглощения ядер 57Fe и рамановские спектры [1]. Обнаружены два структурных фазовых перехода при P ≈ 5.5 и ≈ 20 ГПа. При первом

переходе происходит смещение легких атомов кислорода и повышается локальная симметрия 3f кислородных тетраэдров в окружении железа. При втором переходе сильно уменьшается параметр c элементарной ячейки и объем ячейки падает скачком на 8.6 %. Значительное уменьшение параметра c при структурном переходе должно привести к существенному увеличению обменных взаимодействий между ионами железа в соседних плоскостях (ab), что объясняет колоссальное увеличение точки Нееля в этом кристалле при давлениях выше 20 ГПа [2].

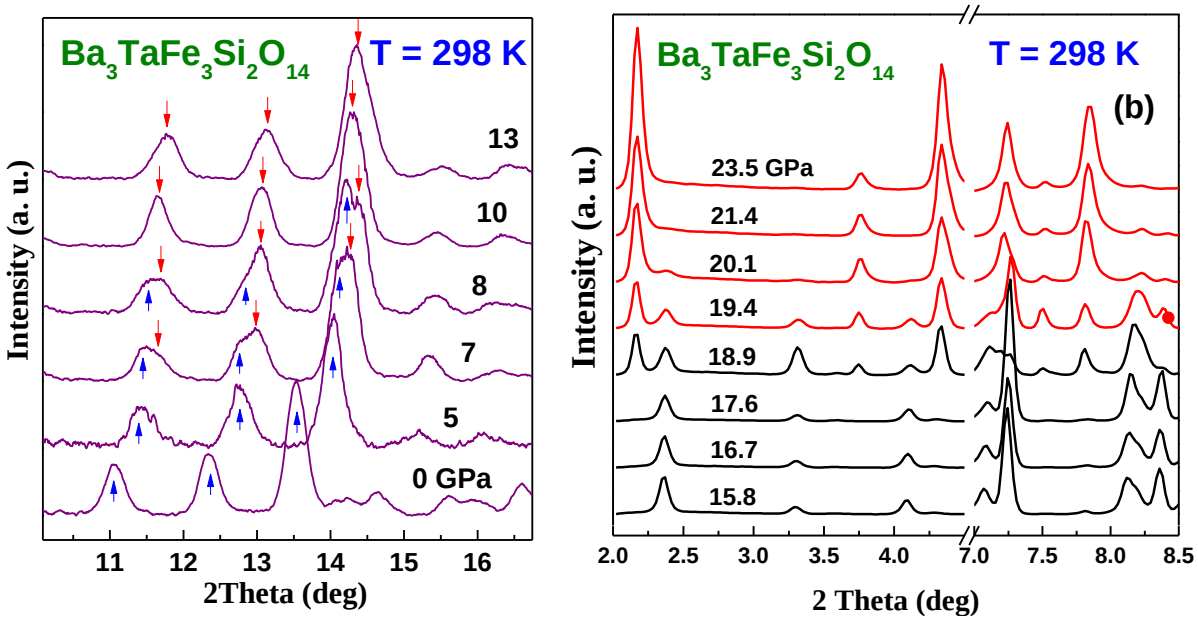


Рис. 1. Характерные участки дифрактограмм лангасита Ba3TaFe3Si2O14 в интервале углов и давлений, где наиболее заметно происходят изменения при фазовых переходах. (a) Трансформация пиков в области углов 2θ = 11-15o при первом структурном переходе (лабораторный дифрактометр, излучение MoKα). Синими стрелками (↑) показаны пики исходной фазы при P < 5 ГПа, а красными стрелками (↓) – пики новой фазы при P > 7 ГПа. (b) Исчезновение пиков исходной фазы и появление пиков новой фазы в области углов 2θ = 2-5 и 7-8.5o при втором структурном переходе (синхротрон PETRA-III, длина волны λ=0.289886 Å).

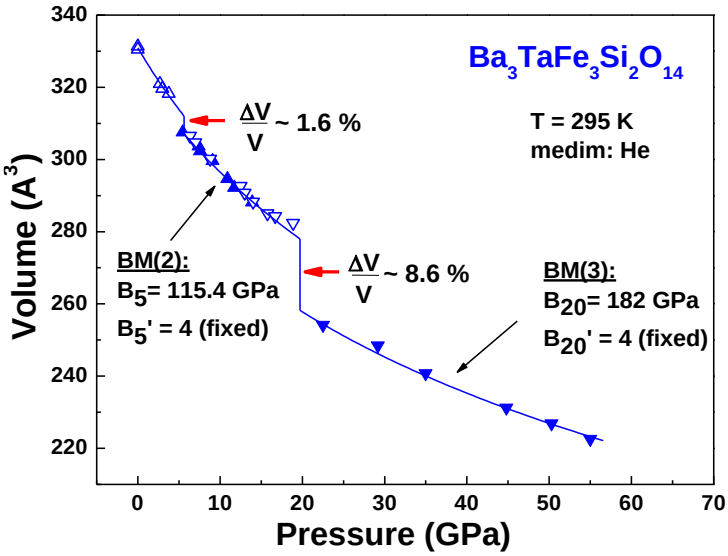


Рис. 2. Зависимость объема элементарной ячейки V от давления в лангасите Ba3TaFe3Si2O14 в области первого структурного перехода при P ~ 5 ГПа и в области второго перехода при P ~ 20 ГПа. Показана аппроксимация экспериментальных точек (треугольники) уравнениями состояния в форме Бёрча-Мурнагана (сплоншная линия). Среда, передающая давление неон и гелий.

Литература

[1]. И.С. Любутин, А.Г. Гаврилюк, Ю.А. Давыдова, А.Г. Иванова, И.А. Троян, С.Н. Сульянов, С.С. Старчиков, С.Н. Аксенов, К.В. Глазырин, "Уравнение состояния и структурные фазовые переходы в железосодержащем лангасите Ba3TaFe3Si2O14 при высоких гидростатических давлениях", Письма в ЖЭТФ, т. 100, вып. 12, стр. 904 (2014).

[2]. A. G. Gavriliuk, I. S. Lyubutin, S. S. Starchikov, A. A. Mironovich, S. G. Ovchinnikov, I. A. Trojan, Yuming Xiao, Paul Chow, S. V. Sinogeikin, V. V. Struzhkin, " The magnetic P-T phase diagram of langasite Ba3TaFe3Si2O14 at high hydrostatic pressures up to 38 GPa", Appl. Phys. Lett. 103(16), 162402 (2013).

2014 год – публикации в журналах:

1 A. G. Gavriliuk, S. N. Aksenov, R. A. Sadykov, V. P. Filonenko, " Physics of aging of nanophase alloys: Mössbauer investigation of nanocrystalline iron-copper pseudoalloy ", Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 8(6), 1216-1220 (2014)

2 Jungho Kim, Viktor V. Struzhkin, Sergey G. Ovchinnikov,Yu. Orlov, Yu. Shvyd'ko, M. H. Upton, D. Casa, Alexander G. Gavriliuk and S. V. Sinogeikin, "Pressure-induced spin transition and evolution of the electronic excitations of FeBO3: Resonant inelastic x-ray scattering results", EPL 108, 37001 (2014).

3 И.С. Любутин, А.Г. Гаврилюк, Ю.А. Давыдова, А.Г. Иванова, И.А. Троян, С.Н. Сульянов, С.С. Старчиков, С.Н. Аксенов, К.В. Глазырин, "Уравнение состояния и структурные фазовые переходы в железосодержащем лангасите Ba3TaFe3Si2O14 при высоких гидростатических давлениях", Письма в ЖЭТФ, т. 100, вып. 12, стр. 904 (2014).

2014 год - доклады на конференциях:

1 И. С. Любутин, А. Г. Гаврилюк, С. С. Старчиков, П.Г. Наумов, Б.В. Милль, "Структура и магнитные свойства нового семейства мультиферроиков на основе кристалла лангасита при нормальном и высоком давлении", 12-я Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», ИФВД РАН, Троицк, Московская обл., 19 июня 2014 г. Тезисы докладов стр. 8. (Устный).

2 И. С. Любутин, А. Г. Гаврилюк, С. С. Старчиков, П. Г. Наумов, С. А. Пикин, Ю. А. Давыдова, К. В. Фролов, Б. В. Милль, "Магнитные свойства кристаллов железосодержащих лангаситов при нормальном и высоком давлении", VI - Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии (BICMM-2014)». Иркутск, Большое Голоустное, Август 19-23, 2014. Тезисы стр. 29-30. (Устный)

3 Lyubutin I. S., Naumov P. G., Gavriliuk A. G., Trojan I. A., Davydova Yu. A., Starchikov S. S., Mironovich A. A., Aksenov S. N., Tkachev A. V., and Gippius A. A., “Magnetic properties of new multiferroics Ba3MFe3Si2O14 studied by Mossbauer spectroscopy and NMR”, XIII Международная конференция “Мёссбауэровская спектроскопия и её применения (ICMSA-2014)”. г. Суздаль, 11-15 октября 2014, Abstracts p. 23. (Пленарный, приглашённый)

4 И. С. Любутин, А. Г. Гаврилюк, «Синхротронные исследования материалов в экстремальных условиях высоких давлений, высоких и криогенных температур», Совещание и Молодежной конференции по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах (РНСИ-КС-2014), г. Санкт-Петербург, Старый Петергоф, в Санкт-Петербургском Госуниверситет, физическом факультете, 27-31 октября 2014, Сборник Тезисов стр. 21. (Пленарный, приглашённый)

19.2.2 Разработка новых функциональных материалов

Руководитель работ: зав.сектором Р.А.Садыков

Продолжены работы по разработке композитных термоэлектрических преобразователей энергии на основе цериевых и иттербиевых интерметаллидов. В качестве ключевых материалов композитов рассмотрены интерметаллиды YbAl3 и CeNi. Прооведены измерения транспортных свойств, на основе экспериментальных данных рассчитаны значения добротности и фактора мощности в зависимости от массовой доли термоэлектрического материала в составе композита.

Публикации:

Термоэлектрические композитные материалы на основе промежуточно-валентных цериевых и иттербиевых систем, Д.Н. Трунов, Е.С. Клементьев, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные, нейтронные исследования, н. 1 (2014) с. 39.

Методами рентгеноструктурного анализа ина дифрактометре и методами теоретико – группового анализа фазовых переходов STADI MP проводились исследования аллотропных модификаций бора, синтезированных под давлением Екимовым Е.А. (ИФВД). По результатам работы в 2014 году был сделан доклад на конференции.

Начата подготовка к эксперименту по изучению кристаллической структуры глассформера – пропиленкарбоната при низких температурах.

Доклады на конференциях:

Устный доклад на конференции РНСИКС-2014, 27-31 октября 2014, Санкт-Петербург, Старый Петергоф Рекордный объёмный коллапс при фазовом переходе в валентно-нестабильной системе. Клементьев Е, Цвященко А, Лебедь Ю., Зубавичус Я., Козленко Д., Бобриков И., Балагуров А.

Устный доклад на VIII Конференции «Физика сильно сжатого вещества»,12 декабря 2014г., г.Москва, г. Троицк Е.А. Екимов, Ю.Б. Лебедь, В.П. Сиротинкин «Синтез борсодержащих фаз при высоких давлениях и температурах, структура и свойства стабильных и метастабильных состояний».

19.2.3 Радиационное материаловедение

Руководитель работ: с.н.с. ЛНИ А.А. Семенов

Продолжены работы по исследованию кинетики радиационных дефектов в металлах при температурах вакансионного распухания. Результаты опубликованы:

A.A. Semenov and C.H. Woo, “Modeling void development in irradiated metals in the phase-field framework” . – J. Nucl. Mater., 2014, Vol. 454, p. 60-68.

19.3 Развитие экспериментальной техники для исследования материалов тепловыми и эпитепловыми нейтронами

Руководитель работ: с.н.с. В.Л. Кузнецов

В 1-ом, 2-ом и 3-ем циклах реактора ИБР-2м наша группа в составе В.Л. Кузнецова, Е.В.Кузнецовой от ЛНИ ИЯИ РАН и П.В. Седышева от ЛНФ ОИЯИ проводила исследования дифракции нейтронов на монокристалле бромида калия.

В экспериментах на импульсном реакторе ИБР-2м длительность нейтронной вспышки составляла 210 мкс, а пролетная база – 28,3 м. В качестве детекторов нейтронов использовались счетчики СНМ-18. Пролетная база и время нейтронной вспышки определялось по спектру нейтронной дифракции от поликристаллического железа.

Измерения проводились в геометрии Лауэ (на прохождение нейтронов) и в геометрии Брэгга (на их отражение). В работе [1] было отмечено, что представляет интерес исследование перехода дифракции нейтронов из геометрии Лауэ в геометрию Брэгга. Кроме того, монокристалл бромида калия представляет особый интерес для исследований, потому что в броме-81 существует p - волновой резонанс, в котором обнаружено нарушение P - четности на уровне 2·10-2 [2]. В свою очередь, вклад P -нечетной части амплитуды может повлиять на условия дифракции нейтронов в монокристалле [3-5].

В результате проведенных экспериментов было обнаружено, что при падении пучка нейтронов в геометрии Лауэ, часть нейтронов дифракции вылетает из боковой поверхности монокристалла, как в геометрии Брэгга. При падении пучка нейтронов на кристалл KBr в геометрии Брэгга, часть нейтронов дифракции вылетает из задней поверхности монокристалла, как в геометрии Лауэ. Выделение геометрии падения нейтронов и вылета из кристалла нейтронов дифракции осуществлялось с помощью кадмиевых пластин толщиной 0.4 мм. Измерения проводились с двумя кристаллами KBr разных размеров и во всех трех циклах работы реактора ИБР-2м (с целью выявления повторяемости эффекта).

На рисунке 1 представлен типичный результат измерений времяпролетных спектров нейтронов дифракции при падении пучка нейтронов в геометрии Лауэ.

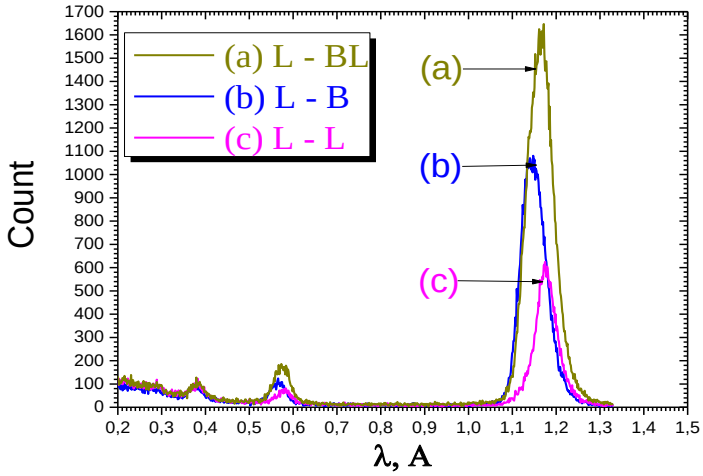


Рис.1. Голубой спектр (140118141003_00_D_00000_X_-4C) – геометрия Лауэ, время набора 10000 стартов. Сиреневый спектр (140118181159_00_D_00000_X_-4Cd) – нейтроны падают по Лауэ, а вылетают из боковой грани монокристалла (как в геометрии Брэгга), время набора 10000 стартов. Оливковый спектр (140118185917_00_D_00000_X_-4Cd) – геометрия падения пучка нейтронов Лауэ, нейтроны выходят из кристалла с боковой и задней поверхности, время набора 10000 стартов.

На рисунке 2 представлен типичный результат измерений времяпролетных спектров нейтронов дифракции при падении пучка нейтронов в геометрии Брэгга.

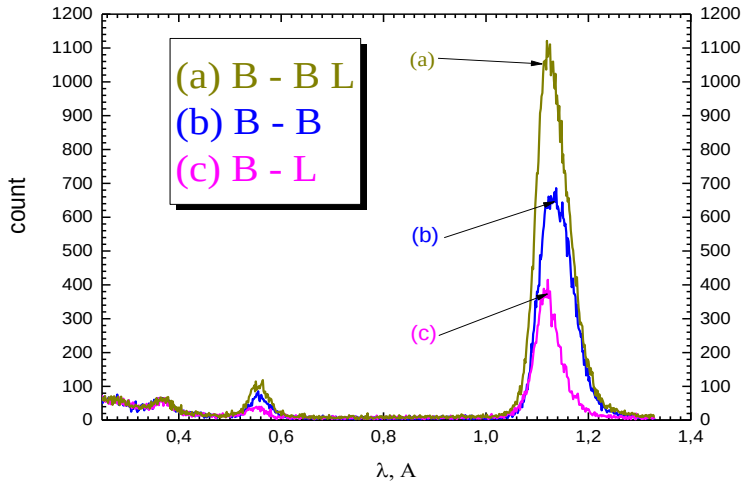


Рис. 2. Дифракция по Брэггу. Синяя линия – спектр (140119174536_00_D_00000_X_+10_Cd) нейтронов дифракции при закрытом кадмием заднем торце кристалла, время набора 5015 стартов. Сиреневый спектр (140119181632_00_D_00002_X_+10_Cd) – нейтроны падают по Брэггу, а вылетают из задней грани монокристалла (как в геометрии Лауэ), время набора 5005 стартов. Оливковый спектр (140119184126_00_D_00001_X_+10_Cd) – геометрия падения пучка нейтронов по Брэггу, нейтроны выходят из кристалла с боковой и задней поверхности, время набора 5005 стартов.

На обоих рисунках сиреневый спектр – это спектр, которого, по крайней мере, теоретически, для совершенного монокристалла быть не должно.

При исследовании дифракции нейтронов на монокристалле бромида калия на 30-метровой пролетной базе установки ИБР-2м ЛНФ ОИЯИ во время проведения 1-го, 2-го и 3-го циклов 2014 года были определены параметры пучка нейтронов и был обнаружен заметный эффект расщепления рефлексов (1-го и 2-го порядка) в области p-волнового резонанса 81Br при дифракции нейтронов на монокристалле KBr. Причем, незначительное изменение угла Брэгга приводило к сильному расщеплению рефлексов.

По материалам, полученным во всех трех циклах работы реактора ИБР-2, были сделаны два доклада (устный и стендовый) на 22-ом Международном Семинаре по Взаимодействию Нейтронов с Ядрами 28 мая (XXII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, May 26-30, 2014 «Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure and Related Topics»).

Наблюдение перехода Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу.

Поскольку во всех трех циклах работы реактора ИБР-2 было обнаружено интересное явление: переход Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу при дифракции нейтронов на монокристаллах KBr, то изучению этого эффекта были посвящены 5-й, 6-й, 7-й и 8-й циклы работы реактора ИБР-2м.

Падающий пучок нейтронов имел поперечное сечение 4×40 мм и расходимость $4 \cdot 10^{-3}$ радиана. Перед монокристаллом устанавливалась пластина из кадмия или из борированного полиэтилена, чтобы нейтроны не попадали на боковую поверхность монокристалла. За монокристаллом так же устанавливалась такая же пластина, которая закрывала боковую поверхность монокристалла в геометрии дифракции нейтронов по Лауэ, или закрывала торец монокристалла, при наблюдении перехода Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу. На рисунке 3 представлены времяпролетные спектры двух геометрий.

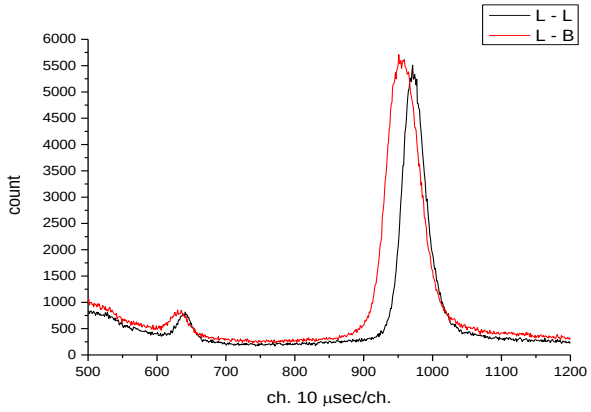


Рис.3. Черная линия – дифракция нейтронов в геометрии Лауэ, красная линия – переход Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу.

Самое простое объяснение наблюдаемого эффекта – двойниковость монокристалла.

Чтобы проверить эту гипотезу, монокристалл был повернут на 1800 вокруг вектора рассеяния. На рисунке 4 представлены времяпролетные спектры эти измерений. Видно, что характер спектров не изменился. Это означает, что такая картина может наблюдаться либо в деформированном монокристалле, либо за счет слабого нейтрон-ядерного взаимодействия.

Если монокристалл деформирован, то повернув монокристалл на 1800 вокруг оси, перпендикулярной вектору рассеяния, мы должны наблюдать противоположное расположение рефлексов. Результаты этих измерений представлены на рисунке 5. Они подтверждают гипотезу о деформированном монокристалле.

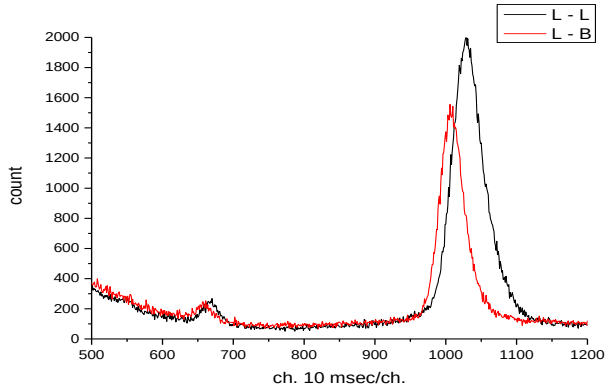


Рис.4. Монокристалл повернут на 1800 вокруг вектора рассеяния. Черная линия – дифракция нейтронов в геометрии Лауэ, красная линия – переход Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу.

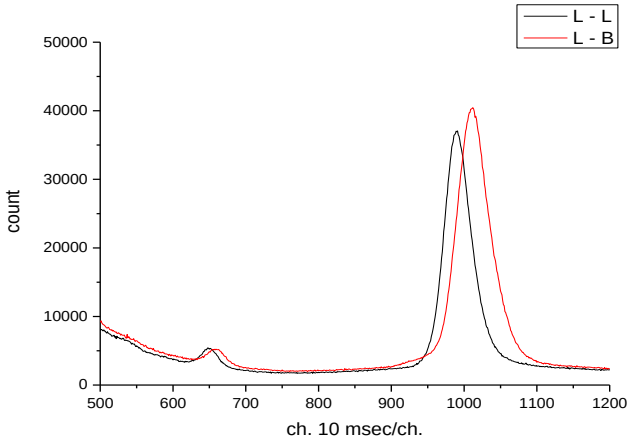


Рис.5. Монокристалл повернут на 1800 вокруг вертикальной оси, перпендикулярной вектора рассеяния. Черная линия – дифракция нейтронов в геометрии Лауэ, красная линия – переход Лауэ дифракции в дифракцию по Брэггу.

Подобная картина наблюдалась на трех монокристаллах бромида калия, изготовленных в разное время и имеющие различные размеры: 90×45×9 mm3; 90×90×9 mm3; 60×60×14 mm3.

Результаты проведенных исследований были доложены на семинарах ЛНИ ИЯИ РАН и ЛНФ ОИЯИ, а также на двух НТС ЛНФ.

Были сделаны два доклада, устный (30’) и стендовый, на 22-ом Международном Семинаре по Взаимодействию Нейтронов с Ядрами 28 мая (XXII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, May 26-30, 2014 «Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure and Related Topics»).

По материалам, полученным в семи циклах работы реактора ИБР-2, подготовлен к публикации препринт.

Будет опубликована статья «Исследование дифракции нейтронов на монокристалле KBr» В. Л. Кузнецова, Е. В. Кузнецовой, В. С. Литвина в журнале ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2015, № 2, с. 1–5.

Литература к разделу:

Ю.Г. Абов, Н.О. Елютин, А.Н. Тюлюсов. Ядерная физика, т.65, №11, с.1989-2034, (2002)

В.П. Алфименков УФН, т.144, вып.3, (1984) с.361

Д.Ф. Зарецкий, В.К. Сироткин, ЯФ, т.40, стр.1256, (1984)

В.Г. Барышевский, ЯФ, т.58, стр.1558, (1995)

V.G. Baryshevsky, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 23 (1997) 509-515

9.4 Исследования с помощью комплекса нейтронографических установок на импульсных источниках нейтронов ИН-06 и РАДЭКС ИЯИ РАН

Рассмотрены структурные особенности нанокристаллов, синтезированных при высоких давлениях из смеси нанопорошков. Эта система представляет из себяпсевдосплаввзаимонерастворимых фаз элементов Fe и Cu (а также пор, занимающих несколько объёмных процентов). Целью исследования является демонстрация квази-стабильности нанокристаллов, а также изучение факторов препятствующих их старению. Мёссбауэровские и рентген-дифракционные исследования показали сильную зависимость фазового состава нанокристаллическогоFe-Cuпсевдосплава от давления компактирования и от времени старения. Обнаружено, что как давление, так и время старения ухудшают изначальную фазовую гомогенность Fe-Cuпсевдосплава. Было показано, что помимо обычных параметров, таких как размер частиц, плотность и фазовый состав нанокристаллических веществ необходимо учитывать предысторию каждого образца: продолжительность времени, температурные условия и давление при синтезе, так как они оказывают существенное влияние на физические свойства нанофазных компактов. Было показано, что сильное разупорядочение железа в медной матрице, выявленное в мёссбауэровском эксперименте, существенно зависит от величины приложенного давления.

Список работ, направленных в печать в 2014 г.:

A. G. Gavriliuk, S. N. Aksenov, R. A. Sadykov, V. P. Filonenko. Physicsofagingnanophasealloys: MÖssbauerinvestigationofnanocrystallineiron-copperpseudoalloy. //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2014, №12, с. 16-20.

19.5 Измерение нейтронных сечений с использованием метода по времени замедления нейтронов в свинце

Для получения данных о нейтронных сечениях предназначен спектрометр по времени замедления нейтронов в 100 тоннах сверхчистого свинца (СВЗ-100). Установка СВЗ-100 является установкой коллективного пользования. Обслуживание установки осуществлялось группой сотрудников Лаборатории нейтронных исследований Института ядерных исследований. – 17 сотрудников ЛНИ, включая 7 научных. В измерениях и обработке результатов принимают участия сотрудники ГНЦ РФ ФЭИ и ОИЯИ.

Исследовалось влияние материалов мишенного устройства на временное разрешение спектрометра СВЗ-100.

Разработана методика нормировки сечений взаимодействия нейтронов с ядрами различных веществ с использованием теплового потока нейтронов получаемого в графитовой призме.

Исследовалась активация оборудования используемого при подаче протонного пучка на установку СВЗ-100.

Продолжалась разработка узла контроля входного протонного пучка на мишень спектрометра по времени замедления нейтронов. Определены параметры радиационного фона при различных величинах потерь тока линейного ускорителя перед мишенью установки СВЗ-100.

Публикации:

1. А. А. Алексеев*, А. А. Бергман, А. И. Берлев, Э. А. Коптелов, А. С. Егоров, Б.Ф.Самылин, Б.И.Фурсов, В. С. Шорин // «Промежуточная структура в сечении подбарьерного деления 241Am» // ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2014, том 77,№5, с. 579–582

2. А. А. Алексеев, А. А. Бергман, А. И. Берлев, Э. А. Коптелов, А. С. Егоров, Б.Ф.Самылин, Б.И.Фурсов, В. С. Шорин //"Нейтронное сечение деления и резонансные параметры 241Am".// Атомная энергия, 2014, т.116 №6, с.345-349.

19.6 Исследование трансмутации ядерных материалов и разработка технологии подкритических систем на пучках заряженных частиц

Руководители работы: д.ф-м.н. Коптелов Э.А., д.ф-м.н. Соболевский Н.М.

Соисполнители: ОИЯИ, Консультации с представителями НИЦ «Курчатовский институт», ИБРАЭ РАН, ГНЦ ФЭИ, ГНЦ ИТЭФ.

Важнейший результат работы по Программе в 2014 году представлен в статье [1]. Трансмутация долгоживущих радиоизотопов, в частности минорных актинидов, в жидкосолевых установках, считается перспективным направлением в ядерной энергетике. В работе [1] выполнен расчет параметров мишенного узла жидкосолевой электроядерной установки. Расчет проводился методом Монте-Карло с использованием транспортных кодов MCNPX и SHIELD, а также путем решения уравнения переноса методом дискретных ординат программой KATRIN. Поскольку экспериментальные данные для установок такого типа отсутствуют, необходимо использовать разные методы расчета и разные компьютерные программы для получения более надежных оценок. Рассчитанные по трем программам интегральные параметры мишенного узла (полный выход нейтронов, средняя энергия нейтронов, полное энерговыделение) отличаются не более чем в 2 раза. Дифференциальные параметры могут различаться на порядок. Полученные результаты служат исходной точкой для дальнейших расчетно-теоретических исследований жидкосолевых электроядерных установок.

В работе [2] проводится сравнение дважды дифференциальных спектров нейтронов и протонов при взаимодействии ядра золота с энергией 4.5 ГэВ/нуклон с ядром железа, рассчитанных по программам Geant4, MCNPX и SHIELD. Работа выполнена для оценки источников радиационной опасности при проектировании ускорительного комплекса NICA.

Публикации:

реферируемые журналы (включая работы, принятые к печати)

1 Ю.Е.Титаренко, В.Ф.Батяев, К.В.Павлов, А.Ю.Титаренко, В.И.Рогов, В.М.Живун, Т.В.Кулевой (ГНЦ РФ-ИТЭФ, г. Москва); Н.М.Соболевский (ИЯИ РАН, г. Москва); А.М.Волощенко (ИПМ РАН, г. Москва);А.Н.Диденко, С.М.Полозов, А.Б.Колдобский, (НИЯУ МИФИ, г. Москва), П.Н.Алексеев, П.А.Фомиченко, А.А.Дудников, В.А.Невиница, А.А.Седов, А.А.Фролов, А.С.Лубина, А.Л.Баланин, С.А.Субботин, А.С.Субботин

(НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва); А.Ю.Станковский, Герд ванденЭйнде (Центр ядерных исследований SCK/CEN, Бельгия), С.Г.Машник (LANL, США). Анализ параметров мишенного узла жидкосолевой подкритической электроядерной установки. Атомная Энергия 117 (2014) 19-25.

2 A.Krylov, M.Paraipan, N.Sobolevsky, G.Timoshenko, V.Tret'yakov. GEANT4, MCNPX, and SHIELD Code Comparison Concerning Relativistic Heavy Ion Interaction with Matter. Phys.Part.Nucl.Lett. 11 (2014) 847-850 (ПисьмавЭЧАЯ).

Доклады на конференциях и школах:

1 A.Andreev, R.Ilic, E.Konobeevsky, L.Latysheva, N.Sobolevsky, G.Solodukhov, S.Zuyev. Optimization of a Photoneutron W-Be-Source of Thermal Neutron. Poster talk at 64th Int. Conf. NUCLEUS 2014, 1 – 4 July 2014, Minsk, Belarus.

2 А.В.Андреев, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, Л.Н.Латышева, М.В.Мордовской, Н.М.Соболевский, Г.В.Солодухов, Р.Д.Илич. Источник нейтронов на основе электронного ускорителя ЛУЭ-8-5, фотонейтронноймW-Be мишени и замедлителя-формирователя нейтронного спектра. Доклад на Международной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН, 17-21 Ноября 2014, МИФИ, Москва.

19.7 Разработка высокоэффективных твердотельных детекторов нейтронов

Руководители работы: Садыков Равиль Асхатович

Проведены разработки и изготовление:

Кольцевого детектора тепловых нейтронов на основе сцинтилляционных счетчиков.

Разработка и моделирование детектора с временной фокусировкой на основе сцинтилляционных счетчиков.

Произведена закупка системы считывания и регистрации с помощью пластин для нейтронной радиографии.

Изготовлена и испытана система сбора информации с блоком регистрации на основе сцинтилляционных детекторов на дифрактометре по времени пролета «Геркулес». Имеется публикация:

СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, В. Н. Марин, С. И. Поташев, Д. Н. Трунов, А. С. Поташев, С. Н. Аксенов, А. А. Афонин, В. С. Литвин, А. А. Алексеев, А. С. Кононыхин, Р. А. Садыков ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2014, № 5, с. 1–4

Успешно проведена защита диссертации В.С. Литвина на степень к.ф.м.н. в 2014г. «НЕЙТРОННЫЙ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР-МАЛОУГЛОВОЙ СПЕКТРОМЕТР «ГОРИЗОНТ» С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ РАССЕЯНИЯ НА ИСТОЧНИКЕ ИН-06 ИЯИ РАН» по специальности 01.04.01-приборы и методы экспериментальной физики

Представлен доклад:

В.С. Литвин, В.Н. Марин, А. И. Ивашкин,С.Х. Караевский, Д.Н. Трунов, С.Н. Аксенов, А.А. Столяров, Р.А. Садыков «Двухкоординатные сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе твердотельных фотоумножителей и световодов» Совещание по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах «РНСИКС-2014», 27-31 октября 2014, Санкт-Петербург, Старый Петергоф

19.8 Разработка время-пролетных спектрометров неупругого рассеяния нейтронов на нейтронном комплексе ИЯИ РАН

Руководители работ: Э.А. Коптелов, Е.С. Клементьев

Важнейшие результаты, полученные в 2014 г:

- были разработаны модели для вторичных спектрометров – узлов установок после образца для спектрометров Глобус и Гибрид;

- было определено требуемое пространственное разрешение детекторных систем, соответствующее требуемому разрешению в обратном (импульсном) пространстве для исследования элементарных возбуждений в твердых телах;

- проведено Монте-Карло моделирование нейтронного транспорта и оптимизация геометрических и нейтронно-оптических параметров;

- разработан проект компактного нейтронного фильтра для системы анализатора-детектора с рекордным эффективным телесным углом;

- разработана новая методика разделения парциальных вкладов в спектр магнитных возбуждений;

- определен магнитный вклад от f- и d-электронных подсистем в спектр возбуждений кобальтитов редкоземельных ионов, определен магнитный формфактор для данных соединений.

- разработана модель для спектра решеточных возбуждений промежуточно-валентной системы CeNi.

- планы по развитию нейтронной спектроскопии в ИЯИ РАН сделаны комплементарными планам по развитию нейтронных спектрометров на реакторе ПИК (ПИЯФ), для каждого из нейтронных центров выбраны наиболее выигрышные ниши.

Публикации:

- реферируемые журналы (включая работы, принятые к печати):

1 “Possible undercompensation effect in the Kondo insulator (Yb,Tm)B12”, Alekseev, P.A., Nemkovski, K.S., Mignot, J.-M., Clementyev, E.S., Ivanov, A.S., Rols, S., Bewley, R.I., Filipov, V.B., Shitsevalova, N.Yu., Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 2014, 89 (11), 115121;

2 “Coexistence of long range magnetic order and intervalent state of Eu in EuCu2(Si (x) Ge1-x)(2): Evidence from neutron diffraction and spectroscopic studies”, Alekseev, P.A. , Nemkovski, K.S., Kozlenko, D.P., Menushenkov, A.P., Yaroslavtsev, A.A., Gribanov, A.V., Clementyev, E.S., Pantaleig, C., Klobes, B., Hermannh, R.P., JETP LETTERS, 2014, Volume: 99 Issue: 3 Pages: 164-168.

3 Thermoelectric composite materials based on intermediate-valence cerium and ytterbium intermetallic compounds, Trunov, D.N., Clementyev, E.S., 2014, Journal of Surface Investigation, 2014, 8 (1), pp. 35-39.

4 “Спектры каналов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника нейтронов ИН-06 Института ядерных исследований РАН», А.А. Алексеев, Р.А. Садыков, В.С. Литвин, Е.С. Клементьев, С.Н. Аксенов, Д.Н. Трунов, Н.М. Соболевский, С.Ф. Сидоркин, Э.А. Коптелов, Поверхность. Рентгеновские, синхротронныеинейтронныеисследования»/“ Journal of Surface Investigation, X-Ray Synchrotron and Neutron Techniques” (2015) n1. (в печати).

- конференции:

1 48-ая Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния, 10-15 марта 2014 г., Санкт-Петербург, Россия, Обзор современных методик неупругого рассеяния, спектрометры реактора ПИК, Е.С. Клементьев.

2 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), August 6-13, 2014, Buenos Aires, Argentina, Anomalous properties of the volume-collapsed cubic CeNi phase, E. Clementyev, A. Tsvyaschenko, S. Popkov.

3 Совещание по изучению динамики вещества методами неупругого нейтронного рассеяния «СПЕКТРИНА - 2014», 19-20 июня 2014 г., г Гатчина, Россия, Спектрометры на реакторе ПИК, концепция, Е.С. Клеменьев.

4 Совещание по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах **РНСИ-КС-2014, 27-31 октября 2014 г., Санкт-Петербург, Россия,** Рекордный объемный коллапс при фазовом переходе в валентно-нестабильной системе, Е.С. Клементьев, А.В. Цвященко, Ю.Б. Лебедь, Я.В. Зубавичус, Д.П. Козленко, И.А. Бобриков, А.М. Балагуров/

5 Совещание по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах **РНСИ-КС-2014, 27-31 октября 2014 г., Санкт-Петербург, Россия,** Спектрометры на реакторе ПИК. Концепция, Е.С. Клементьев.

6 The International Joint School "Smart Nanomaterials and X-ray Optics 2014: Modeling, Synthesis and Diagnostics", September 22-25, 2014, Kaliningrad, Russia, X-Ray spectroscopy and neutron intermultiplet spectroscopy: strong and weak sides I the study of valence-unstable systems, E.S. Clementyev.

7 Научная сессия НИЯУ «МИФИ» 2014, Возможный эффект Кондо-недокомпенсации в спектре магнитных возбуждений Yb1-xTmxB12 , Алексеев П.А., Немковский К.С, Миньо Ж.-М., Клементьев Е.С., Лазуков В.Н., Иванов А.С, Шицевалова Н.Ю.

8 Научная сессия НИЯУ «МИФИ» 2014, Исследования магнитных возбуждений в EuCu2Si2 , Алексеев П.А., Трунов Д.Н., КлементьевЕ.С., Подлесняк А.А.

9 XII Курчатовская молодежная научная школа, Москва, 28-31 октября 2014 г., П.А. Алексеев, Д.Н. Трунов, Е.С. Клементьев А.А. Подлесняк, «Исследования магнитных возбуждений в EuCu2Si2».

Научно-популярная публикация о развитии и перспективах методики неупругого рассеяния нейтронов в РФ:

10 «Спектрина - 2014 - первое в истории страны научное мероприятие по неупругому рассеянию нейтронов», Е.С. Клементьев, газета «Гатчинская правда», 25 июля 2014 г., http://gatchina24.ru/gtn-pravda/2014/07/25/Spektrina_2014.html.

- подготовка дипломных (бакалаврских, магистерских) работ:

Квалификационная работа на соискание учёной степени бакалавра по специальности Прикладная математика и физика, Д. Чернышова, "Динамика решетки систем на основе f-элементов" (Москва, МФТИ - ИЯИ РАН, защита 02.07.2014, научный руководитель Е.С. Клементьев) по исследованию динамики решетки интерметаллидов на основе церия, защищена с оценкой «отлично».

19 Список публикаций ЛНИ за 2014 год

публикации в журналах

1 A.Krylov, M.Paraipan, N.Sobolevsky, G.Timoshenko, V.Tret'yakov. GEANT4, MCNPX, and SHIELD Code Comparison Concerning Relativistic Heavy Ion Interaction with Matter, Phys. Part. Nucl. Lett. 11 (2014) 847-850 (Письма в ЭЧАЯ).

2 Ю.Е.Титаренко, В.Ф.Батяев, К.В.Павлов, А.Ю.Титаренко, В.И.Рогов, В.М.Живун, Т.В.Кулевой (ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва); Н.М.Соболевский (ИЯИ РАН, г. Москва); А.М.Волощенко (ИПМ РАН, г. Москва); А.Н.Диденко, С.М.Полозов, А.Б.Колдобский, (НИЯУ МИФИ, г. Москва), П.Н.Алексеев, П.А.Фомиченко, А.А.Дудников, В.А.Невиница, А.А.Седов, А.А.Фролов, А.С.Лубина, А.Л.Баланин, С.А.Субботин, А.С.Субботин (НИЦ «Курчатовский ин т», г. Москва); А.Ю.Станковский, Герд ван ден Эйнде (Центр ядерных исследований SCK/CEN, Бельгия), С.Г.Машник (LANL, США). Анализ параметров мишенного узла жидкосолевой подкритической электроядерной установки, Атомная Энергия 117 (2014) 19-25.

3 A.Luehr, M.Priegnitz, F.Fiedler, W.Enghardt, N.Sobolevsky, N.Bassler. Dependence of simulated positron emitter yields in ion beam cancer therapy on modeling nuclear fragmentation, Appl. Radiat. Isot. 83B (2014) 165–170.

4 J.Toftegaard, A.Luehr, N.Sobolevsky, N.Bassler. Improvements in the stopping power library libdEdx and release of the web GUI dedx.au.dk., Journal of Physics: Conference Series 489 (2014) 012003.

5 N.Bassler, D.C.Hansen, A.Luehr, B.Thomsen, J.B.Petersen, N.Sobolevsky. SHIELD HIT12A - a Monte Carlo particle transport program for ion therapy research, Journal of Physics: Conference Series 489 (2014) 012004.

6 H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina, W.Trautmann. Theoretical study of projectile fragmentation in the reactions 112Sn+112Sn and 124Sn+124Sn at 1 GeV/nucleon. arXiv:1403.4786v1 [nucl-th]. Submitted to Phys. Rev. C

7 .Ergun, H.Imal, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina. Influence of angular momentum and Coulomb interaction of colliding nuclei on their multifragmentation. arXiv:1408.2840v1 [nucl-th]. Submitted to Phys. Rev. C

8 N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, I.N.Mishustin. Tabulated equation of state for supernova matter including full nuclear ensemble Astrophysical Journal, 789 (2014) 33-44, doi:10.1088/0004-637X/789/1/33

9 J.Steinheimer, T.Lang, H.van Hees, A.S.Botvina, K.K.Gudima, I.N.Mishustin, H.Stoecker, M.Bleicher. Strangeness in Quark Matter J. Phys. Conf. Ser. 509 (2014) 012002

10 Марин В.Н., Поташев С.И., Трунов Д.Н., Поташев А.С., Аксенов С.Н., Афонин А.А., Литвин В.С., Алексеев А.А., Кононыхин А.С., Садыков Р.А. - СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИХ УСТАНОВОК - ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА — 2014,№6,с.37-41.

11 А. А. Алексеев, А. А. Бергман, А. И. Берлев, Э. А. Коптелов, А. С. Егоров, Б.Ф.Самылин, Б.И.Фурсов, В. С. Шорин. "ПРОМЕЖУТОЧНАЯ СТРУКТУРА В СЕЧЕНИИ ПОДБАРЬЕРНОГО ДЕЛЕНИЯ 241Am", ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2014, том 77, №5, с. 579–582.

12 А. А. Алексеев, А. А. Бергман , А. И. Берлев, Э. А. Коптелов, А. С. Егоров, Б.Ф.Самылин, Б.И.Фурсов, В. С. Шорин. "Нейтронное сечение деления и резонансные параметры 241Am". Атомная энергия, 2014, т.116 №6, с.338-344.

13 В.Л. Кузнецов, Е.В. Кузнецова, В.С. Литвин. Исследование дифракции нейтронов на монокристалле KBr. ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ № 2 (2015) 1–5

14 A.G. Gavriliuk, S.N. Aksenov, R.A. Sadykov, V.P. Filonenko. ”Physics of aging of nanophase alloys: Mössbauer investigation of nanocrystalline iron-copper pseudoalloy”, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 12, стр. 16-20 (2014).

15 Jungho Kim, Viktor V. Struzhkin, Sergey G. Ovchinnikov,Yu. Orlov, Yu. Shvyd'ko, M. H. Upton, D. Casa, Alexander G. Gavriliuk and S. V. Sinogeikin, "Pressure-induced spin transition and evolution of the electronic excitations of FeBO3: Resonant inelastic x-ray scattering results", EPL 108, 37001 (2014).

16 И. С. Любутин, А. Г. Гаврилюк, Ю. А. Давыдова, А. Г. Иванова, И. А. Троян, С. Н Сульянов, С. С. Старчиков, С. Н. Аксенов, К. В. Глазырин, "Уравнение состояния и структурные фазовые переходы в железосодержащем лангасите Ba3TaFe3Si2O14 при высоких гидростатических давлениях", Письма в ЖЭТФ, т. 100, вып. 12, (2014). Flip of spin helix chirality and ferromagnetic state in Fe1−xCoxGe compounds

17 S. V. Grigoriev, S.-A. Siegfried, E. V. Altynbayev, N. M. Potapova, V. Dyadkin, E. V. Moskvin, D. Menzel, A. Heinemann, S. N. Axenov, L. N. Fomicheva, and A. V. Tsvyashchenko PHYSICAL REVIEW B 90, 174414 (2014)

18 A.A. Semenov and C.H. Woo, "Modeling void development in irradiated metals in the phase-field framework" . – J. Nucl. Mater., 2014, Vol. 454, p. 60-68.

доклады на конференциях

1 J.Norbury, N.Sobolevsky. Fluxes of particles and nuclear fragments behind aluminum screen under GCR and SEP irradiation: Comparison HZETRN-SHIELD, 2nd NASA and FSA Technical Interchange Meeting. SINP MSU, Moscow, July 30-31, 2014.

2 A.Andreev, R.Ilic, E.Konobeevsky, L.Latysheva, N.Sobolevsky, G.Solodukhov, S.Zuyev. Optimization of a Photoneutron W-Be-Source of Thermal Neutron, Poster talk at 64th Int. Conf. NUCLEUS 2014, 1–4 July 2014, Minsk, Belarus.

3 А.В.Андреев, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, Л.Н.Латышева, М.В.Мордовской, Н.М.Соболевский, Г.В.Солодухов, Р.Д.Илич. Источник нейтронов на основе электронного ускорителя ЛУЭ-8-5, фотонейтронной W-Be мишени и замедлителя-формирователя нейтронного спектра, Доклад на Сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", 17-21 ноября 2014, МИФИ.

4 A.Botvina. Statistical approach for supernova matter and nuclear multifragmentation

Talk at the ATHENA Brussels workshop on Astrophysics, January 27-28, 2014, Universite Libre de Bruxelles, Belgium. http://exp-astro.physik.uni-frankfurt.de/meetings/athena-brussels-meeting/hprogram-new.php

5 A.Botvina. Hypernuclei and hypermatter in relativistic heavy-ion reactions. Invited talk at the International SPHERE workshop, Prague, Czech Republic, September 9-11, 2014. http://rafael.ujf.cas.cz/sphere2014/presentations/Botvina_SPHERE_2014.pdf

6 A.Botvina. Production of hypernuclei from excited nuclear residues in relativistic ion collisions, Talk at the DPG Annual meeting - Frankfurt 2014, Frankfurt am Main. http://www.dpg-verhandlungen.de/year/2014/conference/frankfurt/static/hk63.pdf

7 A.S.Botvina. Production of hypernuclei from excited nuclear residues in relativistic ion collisions: New opportunities for AFTER@LHC, Invited talk at the International Workshop "Probing the Strong Interaction at A Fixed Target ExpeRiment with the LHC beams", Les Houches School, January 12 - 17 , 2014, Les Houches, France. https://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confId=8591

8 В.С. Литвин, В.Н. Марин, А.И. Ивашкин, С.Х. Караевский, Д.Н. Трунов, С.Н. Аксенов, Р.А. Садыков, В.Г. Недорезов. Двухкоординатные сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе твердотельных фотоумножителей и световодов. - Совещание по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах «РНСИ-КС-2014» - 27-31 октября 2014 г., Санкт-Петербург, Старый Петергоф. - устный секционный доклад

9 И. С. Любутин, А. Г. Гаврилюк, С. С. Старчиков, П.Г. Наумов, Б.В. Милль, "Структура и магнитные свойства нового семейства мультиферроиков на основе кристалла лангасита при нормальном и высоком давлении", 12-я Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», ИФВД РАН, Троицк, Московская обл., 19 июня 2014 г. Тезисы докладов стр. 8. (Устный)

10 И. С. Любутин, А. Г. Гаврилюк, С. С. Старчиков, П. Г. Наумов, С. А. Пикин, Ю. А. Давыдова, К. В. Фролов, Б. В. Милль, "Магнитные свойства кристаллов железосодержащих лангаситов при нормальном и высоком давлении", VI - Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии (BICMM-2014)». Иркутск, Большое Голоустное, Август 19-23, 2014. Тезисы стр. 29-30. (Устный)

11 Lyubutin I. S., Naumov P. G., Gavriliuk A. G., Trojan I. A., Davydova Yu. A., Starchikov S. S., Mironovich A. A., Aksenov S. N., Tkachev A. V., and Gippius A. A., “Magnetic properties of new multiferroics Ba3MFe3Si2O14 studied by Mossbauer spectroscopy and NMR”, XIII Международная конференция “Мёссбауэровская спектроскопия и её применения (ICMSA-2014)”. г. Суздаль, 11-15 октября 2014, Abstracts p. 23. (Пленарный, приглашённый)

12 И. С. Любутин, А. Г. Гаврилюк, «Синхротронные исследования материалов в экстремальных условиях высоких давлений, высоких и криогенных температур», Совещание и Молодежной конференции по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах (РНСИ-КС-2014), г. Санкт-Петербург, Старый Петергоф, в Санкт-Петербургском Госуниверситет, физическом факультете, 27-31 октября 2014, Сборник Тезисов стр. 21. (Пленарный, приглашённый)

13 E.V. Kuznetsova, V.L. Kuznetsov, P.V. Sedyshev. Neutron diffraction in KBr single crystal. Investigation of diffraction in single crystal KBr Устный доклад на:Seminar XXII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-22, Dubna, May 27-30, 2014, Dubna.

14 V.L. Kuznetsov, E.V. Kuznetsova, P.V. Sedyshev. Investigation of diffraction in single crystal KBr Стендовый доклад на: Seminar XXII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-22, Dubna, May 27-30, 2014, Dubna

15 Устный доклад на конференции РНСИКС-2014, 27-31 октября 2014, Санкт-Петербург, Старый Петергоф Рекордный объёмный коллапс при фазовом переходе в валентно-нестабильной системе. Клементьев Е, Цвященко А, Лебедь Ю., Зубавичус Я., Козленко Д., Бобриков И., Балагуров А.

16 Устный доклад на VIII Конференции «Физика сильно сжатого вещества»,12 декабря 2014г., г.Москва, г. Троицк Е.А. Екимов, Ю.Б. Лебедь, В.П. Сиротинкин «Синтез борсодержащих фаз при высоких давлениях и температурах, структура и свойства стабильных и метастабильных состояний».

Препринты.

1 H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina, W.Trautmann. Theoretical study of projectile fragmentation in the reactions 112Sn+112Sn and 124Sn+124Sn at 1 GeV/nucleon. arXiv:1403.4786v1 [nucl-th].

2 A.Ergun, H.Imal, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina. Influence of angular momentum and Coulomb interaction of colliding nuclei on their multifragmentation. arXiv:1408.2840v1 [nucl-th].

3 А.А.Алексеев, А.А.Бергман, А.И.Берлёв, Э.А.Коптелов, Б.Ф.Самылин, Б.И.Фурсов, В.С.Шорин, "Исследования подбарьерного деления ядер на нейтронном спектрометре по времени замедления в свинце СВЗ-100: Pu-240(n,f). Препринт ИЯИ РАН 1391/2014, октябрь 2014, Москва.

4 А.А.Алексеев, В.И.Иванов, "Использование процедуры свёртки сечений нейтрон-ядерных реакций со спектром нейтроно вдля оценки возможности проведения экспериментов на спектрометре СВЗ-100". Препринт ИЯИ РАН 1394/2014 НОЯБРЬ 2014, Москва

20 Лаборатория медицинской физики

Руководитель работ д.ф.-м.н. С.В.Акулиничев.

Прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся материалов, ядерная медицина.

Разработка новых методов дистанционной лучевой терапии.

Разработка технологии производства радиационного источника на основе иттербия-169 для брахитерапии.

Разработка методов радиотерапии новообразований мозга сложных локализаций. Совместно с ОУК.

Разработка нового источника с иттербием для высокодозовой брахитерапии. Совместно с ОУК.

20 Реферат

В области дистанционной лучевой терапии особые перспективы связаны с протонной лучевой терапией новообразований в виде самостоятельного лечения или в сочетании с конвенциальной радиотерапией. Протоны обладают важнейшим преимуществом – они останавливаются в заданной точке в тканях, где и выделяют основную часть ионизирующей энергии, разрушающей клетки опухоли. Целью работ в отчетном году было разработать автоматизированную систему для расчета этих формирующих устройств с заданной точностью и без человеческого управления процессом выбора оптимальной конструкции и расчета устройств. Таким образом, создается возможность для быстрой предлучевой подготовки лечения новообразований, включая множественные новообразования, при соблюдении высокого качества лучевой терапии.

Использование в брахитерапии иттербиевых источников взамен источников на основе кобальта и иридия позволяет снизить радиационное повреждение здоровых органов, т.е. повысить конформность радиотерапии. Возможность массового производства источников с изотопом Yb-169 с использованием наиболее рентабельной лазерной технологии в настоящее время имеется только в РФ благодаря уникальным технологиям лазерного разделения изотопов иттербия, впервые в мире реализованным в России. Целью работ в этом направлении является научная проработка всех этапов технологической цепочки производства иттербиевых источников от наработки стартового материала до активации готового источника и измерения его радиационных свойств.

В процессе выполнения НИР были получены следующие основные результаты:

1. Был впервые разработан программный комплекс на основе авторского кода Монте-Карло CRNA, позволяющий автоматизировать процесс расчета индивидуальных формирующих устройств для облучения протонами новообразований мозга, а также других органов.

2. Проведенные расчеты показали высокую точность дозовых распределений (суммарная погрешность в пределах 5%), получаемых с использованием рассчитанных таким образом индивидуальных формирующих устройств, например гребенчатых фильтров для модуляции по энергии протонного пика Брэгга.

3. Были проведены работы по развитию технологии лучевой терапии новообразований мозга на конвенциальных установках ИЯИ РАН (ускоритель электронов СЛ-75 и рентгенотерапевтический аппарат).

4. С участием Больницы РАН в г. Троицка в отчетном году получили высокотехнологичное лучевое лечение 40 пациентов, из них 20 пациентов - на ускорителе электронов с использованием инновационных разработок сотрудников ИЯИ РАН: 3D – планирование с использованием томографа, фиксация головы пациента термопластиковыми масками, коллимация пучка фотонов и т.д. Была установлена высокая эффективность проведенного лучевого лечения пациентов - у всех пациентов наблюдался контроль опухоли при отсутствии постлучевых осложнений.

5. Проведены сравнительные расчеты методами Монте-Карло и полуаналитическими методами дозовых распределений в среде от иттербиевых источников и от иридиевых источников, являющихся конкурентами новых иттербиевых источников.

6. Установлено, что при облучении мягких тканей терапевтические свойства иридиевых и иттербиевых источников близки. Но при этом биологическая защита из тяжелых металлов, например из вольфрама, на несколько порядков эффективнее при экранировании иттербиевых источников, чем при экранировании иридиевых источников. Это имеет ключевое значение для массового внедрения новых источников в отечественную медицину, поскольку позволяет проводить лечение в любом медицинском учреждении.

7. Была установлена потенциальная применимость иттербиевых источников не только в высокодозовой брахитерапии (активность источника составляет несколько Ки), но и в низкодозовой брахитерапии (НДБ, активность источника составляет несколько мКи), взамен обычно используемых источников с I-125. Было показано, что иттербиевые источники обладают клиническими преимуществами для НДБ за счет более интенсивного подведения дозы к очагу.

8. Анализ, проведенный в отчетном году, показал большие перспективы

использования источников с иттербием при реализации технологии «циклического» введения высокоактивных источников (т.н. Pulse Dose Rate –PDR) в брахитерапии. Этот вид брахитерапии обладает преимуществами как ВДБ, так и НДБ и рассматривается в России и за рубежом как очень перспективный метод лечения ряда распространенных видов опухолей.

20 Введение

Среди методов физики, используемых в современной медицине, все возрастающее значение имеют методы, основанные на ядерных технологиях. Более половины онкологических больных сейчас излечиваются с использованием дистанционной или контактной радиотерапии (в виде самостоятельного или сочетанного лечения). Причем часть пациентов, получивших такое лечение, постоянно возрастает в развитых странах. А ту или иную форму лучевой диагностики (рентгеновская компьютерная томография, ПЭТ, ОФЭКТ и др.) проходит почти каждый пациент, страдающий онкологическими или другими тяжелыми заболеваниями. Исследования, направленные на развитие новых технологий ядерной медицины и лучевой терапии, являются приоритетной частью плана работ научных центров и университетов развитых стран от ЦЕРНа в Женеве до большинства местных университетов. Вложения средств в исследования по ядерной медицине и лучевой терапии рассматриваются в развитых странах как необходимый вклад в улучшение качества жизни населения.

Уникальные характеристики линейного ускорителя протонов Института ядерных исследований РАН в г. Троицке (Рис.1) дают возможность вести фундаментальные и прикладные исследования по ядерной и нейтронной физике, производить большинство изотопов медицинского назначения и проводить протонную терапию новообразований любой локализации [1]. В настоящее время ускоритель обеспечивает пучки протонов с энергией от 100 до 220 МэВ (в проекте - до 600 МэВ) со средним током до 100 мкА (в перспективе – до 0,5 мА). В настоящее время это единственный сильноточный ускоритель протонов средней энергии в РФ. Диапазон энергий ускорителя является оптимальным для протонной терапии и при этом позволяет производить радиоизотопы, которые затруднительно получать на реакторах или обычных протонных ускорителях низких энергий (например, Sr82 или Pd103) . Пучки протонов ускорителя в Троицке имеют все основные характеристики с оптимальными для протонной терапии значениями (диапазон энергий, частота и длительность импульсов, эммитанс). Кроме того, центр в Троицке позволяет проводить сочетанную лучевую терапию опухолей на ускорителях протонов и электронов в двух соседних процедурных помещениях. Исходя из опыта других ядерных

центров и существующих тенденций в современной медицине, а также учитывая возможности имеющегося ускорителя протонов, сформировалась и реализуется программа исследований ИЯИ РАН для медицины. Одними из основных направлений этой программы исследований является протонная терапия, конформная лучевая терапия и внедрение новых источников для брахитерапии.

20 Основные результаты исследований

С использованием уникального оборудования Комплекса протонной терапии ИЯИ РАН в отчетном году были получены следующие основные научные результаты.

- Был впервые разработан программный комплекс на основе авторского кода Монте-Карло CRNA, позволяющий автоматизировать процесс расчета индивидуальных формирующих устройств для облучения протонами новообразований мозга, а также других органов. Этот программный комплекс позволяет получить оптимальную конструкцию индивидуальных формирующих устройств с заданной точностью в автоматическом режиме. Проведенные расчеты показали достаточно высокую точность дозовых распределений (суммарная погрешность в пределах 5%), получаемых с использованием рассчитанных таким образом индивидуальных формирующих устройств, например гребенчатых фильтров для модуляции по энергии протонного пика Брэгга. На Рисунке 1 показана рассчитанная автоматически конструкция гребенчатого фильтра (слева) и соответствующее ей глубинное дозовое распределение для пучка протонов с энергией 160 МэВ (справа), для облучения новообразования в голове размером 2 см по направлению пучка протонов (справа). Из правого рисунка следует, что для данного случая отклонение интенсивности дозы облучения в пределах очага не превышает 3%. Это свидетельствует о высоком качестве методов расчета формирующих устройств и о соответствии этих устройств терапевтическим требованиям.

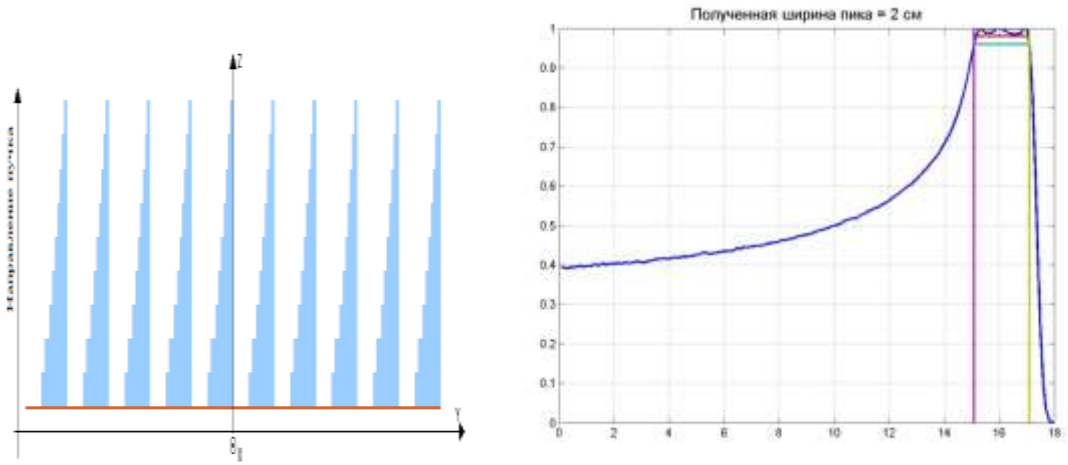


Рисунок 1: гребенчатый фильтр (слева) и соответствующее глубинное дозовое распределение.

- Были продолжены работы по развитию технологии лучевой терапии новообразований мозга на конвенциальных установках ИЯИ РАН (ускоритель электронов СЛ-75 и рентгенотерапевтический аппарат). С участием Больницы РАН в г. Троицка в отчетном году получили высокотехнологичное лучевое лечение 40 пациентов, из них 20 пациентов - на ускорителе электронов с использованием инновационных разработок сотрудников ИЯИ РАН: 3D –планирование с использованием томографа, фиксация головы пациента термопластиковыми масками, коллимация пучка фотонов и т.д. Была установлена высокая эффективность проведенного лучевого лечения пациентов - у всех пациентов наблюдался контроль опухоли при отсутствии постлучевых осложнений.

В области методов контактной радиотерапии были получены следующие результаты.

- Проведены сравнительные расчеты методами Монте-Карло и полуаналитическими методами дозовых распределений в среде от иттербиевых источников и от иридиевых источников, являющихся конкурентами новых иттербиевых источников. Пример результатов таких расчетов показан на Рисунке 2 (слева), где изображены радиальные распределения дозы в воде в зависимости от расстояния от точечного источника активности 5 Ки: левая синяя кривая – для источника Yb-169, левая красная кривая – для источника Ir-192, правая пара кривых – те же результаты для нормированных распределений. Установлено, что при облучении мягких тканей терапевтические свойства иридиевых и иттербиевых источников близки. Но при этом биологическая защита из тяжелых металлов, например из вольфрама, на несколько порядков эффективнее при экранировании иттербиевых источников, чем при экранировании иридиевых источников –

на правом графике внизу сравнивается ослабление излучения от иттербия и иридия в зависимости от толщины защитного слоя вольфрама. Это имеет ключевое значение для массового внедрения новых источников в отечественную медицину, поскольку позволяет проводить лечение в любом медицинском учреждении.

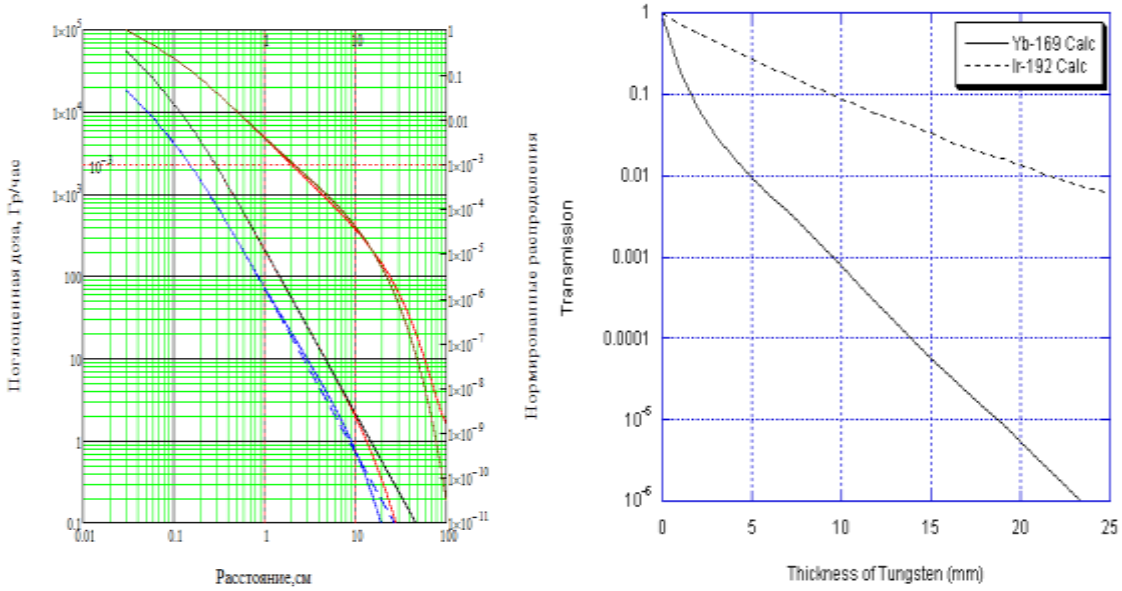


Рисунок 2: распределения дозы в воде

- Еще одним научным результатом в отчетном году было обнаружение потенциальной применимости иттербиевых источников не только в высокодозовой брахитерапии (активность источника составляет несколько Ки), но и в низкодозовой брахитерапии (НДБ, активность источника составляет несколько мКи), взамен обычно используемых источников с I-125. Было показано, что иттербиевые источники обладают клиническими преимуществами для НДБ за счет более интенсивного подведения дозы к очагу.

- Анализ, проведенный в отчетном году, показал большие перспективы использования источников с иттербием при реализации технологии «циклического» введения высокоактивных источников (т.н. Pulse Dose Rate –PDR) в брахитерапии. Этот вид брахитерапии обладает преимуществами как ВДБ, так и НДБ и рассматривается в России и за рубежом как очень перспективный метод лечения ряда распространенных видов опухолей. Основным препятствием на пути внедрения этого вида брахитерапии были трудности с биологической защитой при использовании источников с иридием. При использовании новых источников с иттербием эти проблемы не возникают ввиду более мягкого излучения иттербия.

20 Заключение

Для протонной лучевой терапии были разработаны методы для автоматизированного расчета на основе программ Монте-Карло и изготовления формирующих устройств, позволяющие повысить качество и конформность лучевой терапии. С использованием формирующих устройств были получены трехмерные дозовые распределения высокого качества в мишенях размерами до 5 см (отклонение дозы не более 5 %). Это говорит о применимости предложенных методов протонной лучевой установки для лечения новообразований мозга большого диапазона размеров и локализаций. Проведение расчетов по новой собственной программе по методу Монте-Карло показало согласие расчетных параметров с экспериментальными данными и возможность точного расчета прохождения протонами всего пути от ускорителя до мишени облучения. Кроме того, в отчетном году были получены важные результаты по повышению качества конвенциальной лучевой терапии с использованием тормозных фотонов, получаемых на ускорителях электронов. Улучшенные характеристики фотонного дозового распределения медицинского ускорителя электронов и усовершенствование системы фиксации головы пациентов позволили провести с высоким качеством лучевую терапию новообразований.

В отчетном году были получены важные научные результаты по разработке и производству с использованием лазерных технологий новых источников с иттербием для использования в брахитерапии опухолей. Были исследованы основные этапы в технологии изготовления важнейшей части новых источников для ВДБ, внутренних контейнеров источников, от лазерного выделения стартового изотопа иттербия -168 до лазерного заварки заполненных изотопным материалом титановых контейнеров источников. Были проведены расчеты по методу Монте-Карло для оценки радиационных свойств новых источников и их эффективности при лечении распространенных опухолей, в том числе и с использованием технологии циклического введения источников. По ходу выполнения работ были решены важные научные задачи: была получена рекордная плотность керамических сердечников источников и были экспериментально проверены радиационные свойства новых источников путем их облучения нейтронами на установках Нейтронного комплекса ИЯИ РАН. Проделанная в отчетном году работа является важным этапом на пути внедрения новой технологии лечения социально значимых заболеваний.

Данные результаты являются результатами мирового уровня в области медицинской физики.

20 Список основных публикаций (2014 г.)

1. S.V.Akulinichev and V.I.Derzhiev, “New design of ytterbium sources”, Radiotherapy &Oncology (Elsevier) v. 110 Suppl.1, page 2 (2014).
2. С.В.Акулиничев, «Перспективные исследования по ядерной медицине в ИЯИ РАН», УФН, Выпуск 11 (2014), в печати.
3. С.В.Акулиничев, «Перспективы применения ускорителей протонов и ионов для радиотерапии», материалы Конференции ТКМФ-6 (2014).
4. С.В.Акулиничев, В.Н.Васильев, В.И.Держиев, Ю.К.Гаврилов, Д.А.Коконцев, В.М.Скоркин, С.А.Чаушанский, И.А.Яковлев «Иттербий –перспективный радиоизотоп для брахитерпаии» Материалы Конференции ТКМФ-6 (2014).
5. С.В.Акулиничев, В.И.Держиев, С.А.Чаушанский, А.А. Антанович, В.П.Филоненко, «Новый иттербиевый источник для брахитерапии с керамическим сердечником», Материалы Конференции ТКМФ-6 (2014) . Направлено в журнал «Медицинская физика».

Заключение

Все работы, предусмотренные государственным заданием на 2014 год, выполнены. Получен целый ряд новых результатов высокого мирового уровня, из которых можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

На основании анализа данных Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ200 за 5 лет наблюдений установлены ограничения на потоки нейтрино солнечного происхождения от предполагаемого источника аннигиляции реликтовых частиц тёмной материи и на вероятность их рассеяния в Солнце. (Тема 15.3)

В результате поиска анизотропии направлений прихода космических лучей с энергиями выше 57 ЭэВ по данным 5 лет наблюдения обсерватории Telescope Array с участием ИЯИ РАН обнаружена область на небесной сфере радиусом 20 градусов, в которую попадает 19 из всех известных 72 событий. (Тема 15.2)

В международном эксперименте OPERA (Гран Сассо, Италия), с участием российских учёных ИЯИ РАН, обнаружено четвёртое событие-кандидат на появление тау нейтрино в пучке мюонных нейтрино, направляемом из ЦЕРНа. (Тема 15.1)

На основе анализа большой выборки источников гамма-квантов показано, что труднообъяснимых особенностей восстановленных спектров этих источников можно избежать, предположив аномально высокую прозрачность Вселенной для гамма-излучения высоких энергий. (Тема 15.2)

Впервые дано объяснение ядерного глория эффекта, или эффекта обратной фокусировки, обнаруженного экспериментально в ОИЯИ (Дубна) и ИТЭФ (Москва) в 70-е и 80-е годы, и состоящего в увеличении дифференциального сечения рождения кумулятивных частиц вблизи направления строго назад. Объяснение дано аналитически в рамках механизма многократных взаимодействий. Предсказан такой же эффект для кумулятивных гиперонов, каонов и других частиц. (Тема 15.4)

В нейтринном эксперименте с длинной базой T2K с участием ИЯИ РАН впервые получено ограничение на величину CP нечётной дираковской фазы. (Тема 15.1)

Впервые доказано, что сформулированное ранее соотношение между квантовыми поправками в суперсимметричных теориях справедливо во всех порядках теории возмущений при использовании конкретного перенормировочного предписания. (Тема 15.1)

Сотрудники эксперимента CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе с участием ИЯИ РАН на основе данных 2012 года с полной интегральной светимостью 19.7Фб$^{-1}$ получили рекордные ограничения на параметры моделей, в частности, масса

правого W бозона исключена вплоть до 3 ТэВ для массы тяжёлого нейтрино равной половине массы правого W-бозона. Получены также рекордные ограничения на массы суперсимметричных частиц на основе обработки экспериментальных данных CMS эксперимента 2012 года с полной энергией 8 ТэВ и интегральной светимостью 20 Фб$^{-1}$. (Тема 15.1)

В 2014 году завершена первая фаза эксперимента по поиску безнейтринного двойного бета-распада с помощью германиевых детекторов, обогащённых по изотопу ^{76}Ge, помещённых в пассивную защиту из жидкого аргона, очищенного от радиоактивных примесей до высокой степени чистоты, проект GERDA. Получен верхний предел для периода искомого полураспада $2.1\cdot10^{25}$ лет на уровне достоверности 90%. Результат является наилучшим по сравнению с другим современными экспериментами по поиску двойного безнейтринного бета распада. Полученное значение не подтверждает стоящий на повестке дня в течение 10 лет интригующий результат группы Клапдора, сообщившей о наблюдении этого распада с периодом полураспада $1.2\cdot10^{25}$ лет. (Тема 15.1)

С участием ИЯИ РАН с помощью детектора LVD получена экспериментальная величина выхода нейтронов $N=(16\pm4)\times10^{-4}$ n/μ/(г·см$^{-2}$), генерированных мюонами космических лучей в железе, дополнительно установленном внутрь структуры установки. (Тема 15.1)

На уникальном сильноточном линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН проведено пять сеансов, направленных на разработку технологии получения радиоизотопов, наладку нейтронного комплекса, на исследования и модернизацию ускорительного комплекса. Общая продолжительность сеансов в 2014 году составила 1812 часов. Наработка ускорителя составила свыше 90000 мкА·часов при среднем токе пучка до 120 мкА и энергии 143 МэВ. (Тема 15.6)

По данным работы нейтринных телескопов ИЯИ РАН: АСД (Артёмовской научной станции) и российско-итальянской установки LVD (Гран Сассо, Италия) в течение 37 лет (1977 - 2014) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 16.07 года на 90% уровне достоверности. (Тема 15.2)

В результате международного эксперимента, выполненного коллаборацией A2 на пучке поляризованных фотонов от ускорителя MAMI с использованием поляризованной протонной мишени, созданной учёными ОИЯИ и ИЯИ РАН, впервые определены все четыре спиновые поляризуемости протона, которые описывают воздействие внешнего электромагнитного поля на спиновую структуру протона. Определение этих

фундаментальных структурных констант дает новую фундаментальную информацию о строении ядерной материи на уровне нуклонных степеней свободы. (Тема 15.1)

Завершена обработка данных, полученных в двух сеансах измерений на внутреннем пучке Нуклотрона (ОИЯИ) по исследованию аномальной зависимости от энергии выхода пи-мезонов с использованием пробежного телескопа. В результате анализа данных по времени пролёта и по потерям энергии выполнена идентификация пионов и протонов. Измерено отношение выходов пионов к протонам. (Тема 15.1)

Создан прецизионный магнитный соленоид для позитронного накопителя установки AEGIS (CERN), предназначенной для измерения ускорения свободного падения атомов антиводорода в поле Земли - проверки принципа эквивалентности материи и антиматерии. В текущем году соленоид был запущен в эксплуатацию для проведения первых тестовых измерений и установлен в накопитель позитронов. Достигнута требуемая величина неоднородности магнитного поля – не более 0.1 %, и была получена рекордная интенсивность накопленных позитронов, близкая к проектной величине. (Тема 15.7)

В эксперименте по изучению вариаций космических лучей во время гроз на Баксанской нейтринной обсерватории получено прямое доказательства существования нового типа медленного пробоя в атмосфере. В отличие от коротких и ярких высотных разрядов типа спрайтов и джетов новый тип разряда имеет длительность несколько минут или даже десятков минут. Разряд предположительно создается убегающими электронами в припороговом режиме. Однако, в отличие от пробоя на убегающих электронах он является аналогом не искрового разряда, а тлеющего или коронного (обладает признаками обоих). (Тема 15.2)

Учёными ИЯИ РАН разработан и изготовлен передний адронный калориметр, который является важнейшей детекторной системой в эксперименте NA61 (CERN) по поиску критической точки фазового перехода из состояния обычной ядерной материи в состояние кварк-глюонной плазмы. В текущем году успешно выполнена модернизация аналоговой электроники считывания, системы температурной стабилизации и системы управления и контроля этого калориметра. Калориметр полностью подготовлен к физическому сеансу на пучке ядер аргона, который состоится в начале 2015г. (Тема 15.4)

В области разработки и внедрения элементов и узлов ускорительной техники в 2014 году выполнены работы по проектам (Тема 15.6):

Разработка оборудования диагностики пучка для ЛУ-20 и HILAC комплекса NICA ОИЯИ;

Разработка, изготовление, поставка и наладка двух измерителей формы сгустков (BSM) для линейного ускорителя Лос-Аламосского центра LANSCE;

Разработка, изготовление, лабораторные испытания, поставка и наладка измерителя продольного распределения заряда в сгустках для канала транспортировки из ускорителя Linac-4 в бустер (ЦЕРН, Швейцария);

Оптимизация, разработка и исследование ускоряющих структур и схем фокусировки участков нормально проводящего сильноточного линейного Ускорителя (ЛУ) отрицательных ионов водорода в диапазоне энергий от 18 МэВ до 400 МэВ для проекта ОМЕГА (ФБГУ ГНЦ ИФВЭ);

Разработка технического проекта модернизации источника ионов водорода в каскаде ускорителей ЛУ-30 и У-1.5 (ФБГУ ГНЦ ИФВЭ);

Исследование и разработка систем резонатора фотоинжектора для формирования сгустков электронов сверхвысокой яркости (STFC, Великобритания).

Совместно с РНЦ РХТ (С-Петербург) проведены работы по изучению выхода рубидия-82 из генератора 82Sr/82Rb с исходной активностью 160 мКи в разных режимах медицинской эксплуатации. В результате, достигнуты рекордные характеристики генератора и продемонстрирована возможность эффективной ПЭТ-диагностики в течении длительного времени (78 дн.) не только кардиологических, но и ряда онкологических заболеваний.

Совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова разработана методика получения медицинских терапевтических α-активных радионуклидов актиния-225 и одновременно - радия-223, включающая облучение металлической ториевой мишени на ускорителе ИЯИ РАН протонами средних энергий и радиохимическое выделение актиния и радия с помощью экстракционной хроматографии.

Получен патент на способ наработки радиоизотопов для целей ядерной медицины (совместно с ФИАН им.П.Н. Лебедева). Экспериментально показано (совместно с НИИЯФ МГУ им.Ломоносова), что на ускорителях электронов с энергией 55 МэВ и средним током пучка ~ 40 мкА. в результате облучения мишени из NaOH толщиной 10 г/см2 в течение времени ~ 5.5 час возможно получение радиоизотопа фтора-18 в водном растворе с полной активностью ~ (40÷60) мКи и удельной активностью ~ (2÷3) мКи/мл.

В результате исследований получены следующие важные результаты.

Тема № 15.1 **физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология.**

По результатам работы установки ТАУ-2 за 590 дней найдены сезонные и суточные вариации периода полураспада альфа-активного ядра 214Po.

Поиск массы электронного антинейтрино. На установке «Троицк ню-масс» в 2014 году проведено два сеанса измерений по рассеянию электронов низкой энергии на изотопах водорода. Выполнены работы по модернизации вакуумной и высоковольтной систем.

Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX. Завершён полугодовой сеанс набора статистики для столкновений ядер золота по золоту с энергией по 100 ГэВ на нуклон. По материалам уже собранных данных в 2014 году подготовлено и опубликовано 12 статей в журнале Physical Review.

Изучение редких распадов B-мезонов в эксперименте LHCb. После обработки полного набора данных эксперимента LHCb получено наиболее точное значение в мире величины CP нарушающей фазы: -0.010+- 0.039 rad в Bs0 секторе, что совпадает с предсказаниями Стандартной модели. Также улучшена точность измерения угла g унитарного треугольника матрицы смешивания.

Велась разработка новой модели переходов нейтрон-антинейтрон в поглощающей среде. Получено ограничение на период осцилляций нейтрон-антинейтрон в вакууме.

Обнаружено горячее пятно на карте космических лучей с энергиями выше 57 ЭэВ по данным 5 лет наблюдений наземной решетки Telescope Array. Исследован ансамбль всех источников гамма-излучения с энергией выше 100 ГэВ. Показано, что наблюдаемые Fermi LAT и черенковскими гамма-телескопами спектры не содержат экспоненциального подавления, ожидаемого даже в наиболее консервативных моделях инфракрасного фона.

Проведён слепой поиск гамма-пульсаров, использующий только данные Fermi LAT. В результате слепого поиска, построен каталог из 25 гамма-пульсаров, только 9 из которых зарегистрированы также в радиодиапазоне.

Показано, что лоренцева симметрия (или несколько ее копий) с необходимостью возникает в унитарной теории в двух пространственно-временных измерениях как следствие изотропной масштабной инвариантности и конечной скорости распространения сигналов.

Получены редукционные формулы Лемана - Симанзика - Циммермана в некоммутативной теории поля.

В модели Кулагина-Петти выполнены расчеты сечений рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах в области энергий нейтринного эксперимента LBNE.

В рамках моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии предложено объяснение недавно обнаруженного избытка гамма-лучей с энергией 3.5 кэВ из Андромеды и ряда кластеров галактик.

Поиск массы электронного антинейтрино. Проведена оценка влияние начального состояния молекулярного трития на точность определения эффективной массы электронного антинейтрино. Подготовлено предложение по использованию Аргона-37 для изучения накопления зарядов в объёме спектрометра.

Тема № 15.2 **нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.**

В эксперименте T2K впервые обнаружены осцилляции мюонных нейтрино в электронные и получено первое указание на максимальное CP нарушение в лептонном секторе. Впервые измерена вероятность распада $K+ \rightarrow \pi+\nu\nu$.

Завершено создание сцинтилляционных детекторов для ближнего нейтринного детектора в рамках проекта LAGUNA-LBNO.

Проведен первый сеанс на пучке каонов в эксперименте NA62 в ЦЕРНе и завершена разработка и тестирование нового триггерного детектора этого эксперимента.

Совместно с научно-исследовательским центром «Демокритос» в Афинах в рамках действующего межправительственного соглашения о научно-технологическом сотрудничестве между Россией и Грецией разработан проект о создании компонентов глубоководного нейтринного телескопа в Средиземном море и новых эффективных технологий и технических средств для многоцелевых исследований морской среды.

Проведены гидроакустические исследования, связанные с проектом, а именно: в ИЯИ РАН испытан лабораторный образец компактной лазерной установки для глубоководных измерений термоупругих свойств воды. Подготовлен (совместно с ПРАО ФИАН) проект, нацеленный на развитие радиоастрономического метода детектирования космических нейтрино и протонов (ядер) экстремально высоких энергий, «бомбардирующих» Луну, с применением радиотелескопов на Земле (в частности, сооружаемого в Австралии и Южной Африке гигантского радиотелескопа SKA).

Для создаваемой в России программы «ФОТОНИКА» совместно с ОИЯИ (Дубна) предложен проект «Разработка сверхчувствительных и быстродействующих полупроводниковых матричных лавинных фотоприемников и создание на их основе оптических систем обнаружения и распознавания удаленных объектов».

Разработан и изготовлен прототип газового детектора с низким порогом для регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Выполнены расчеты в обоснование разрабатываемой методики регистрации антинейтрино от реактора.

Закончена работа по выявлению эффекта фотон-фотонного поглощения в спектрах блазаров по данным космического гамма-телескопа "Ферми". На уровне 3 сигма выявлен эффект поглощения гамма-квантов излучением дважды ионизованного гелия и на уровне 6 сигма - излучением Лайман-альфа водорода. Результаты опубликованы в "Astrophysical Journal".

Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ. Продолжался поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд на БПСТ, претендентов на кластер нейтринных сигналов от не обнаружено. Верхняя граница на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике равна 0.077 в год на 90% доверительном уровне за чистое время наблюдения на БПСТ 29.71 года (с 30 июня 1980 года по 16 декабря 2014 года). Исследование анизотропии и вариаций космических лучей 10^{11} – 10^{20} эВ.

Получено прямое доказательства существования нового типа медленного пробоя в атмосфере. Наблюдение атмосферы над установкой двумя видеокамерами установленными на расстояниях 1 км и 75 км позволило зарегистрировать свечение в стратосфере совпадающее по времени с возмущениями интенсивности космических лучей. Разряд, свечение которого зарегистрировано на уровне чувствительности 10-7 л, предположительно создается убегающими электронами в припороговом режиме. Однако, в отличие от пробоя на убегающих электронах он является аналогом не искрового разряда, а тлеющего или коронного (обладает признаками обоих).

Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO. По измерению вариаций природных нейтронных потоков во время гроз был получен результат: ни в одной из гроз как в Москве, так и в горах, за 2011-2014 гг. не было зафиксировано превышения потока тепловых нейтронов над фоновым потоком. Более того, было зафиксировано понижение потока тепловых нейтронов на несколько часов, связанное, как мы полагаем, с большим количеством выпавших осадков.

В вариациях природных нейтронных потоков присутствуют периоды в диапазоне десятков минут, характерные для собственных колебаний Земли (12, 15, 35, 43, 54 мин.), а также сезонные и лунно-месячные периоды. По программе изучения ШАЛ разработанным в ИЯИ РАН методом регистрации генерируемых в них нейтронов в 2014 г. была обеспечена бесперебойная работа одного высокогорного кластера из эн-детекторов (PRISMA-YBJ) в Тибете на высоте 4300 м над уровнем моря и проведен анализ полученной информации за 15 мес. работы установки. Показано, что спектр ШАЛ по числу нейтронов имеет степенной вид в ПэВ-ной области первичных энергий.

Тема № 15.3 **разработка и создание нейтринных телескопов в низкофоновых подземных лабораториях и глубоко под водой для исследования природных потоков нейтрино и других элементарных частиц**.

Галлий-германиевый нейтринный телескоп Баксанской нейтринной обсерватории.

1) получена величина скорости захвата нейтрино с энергией выше 233 кэВ на ядрах 71Ga в ГГНТ за период измерений с 1990 по 2014 год, которая составляет 64.4+3.6-3.7 SNU, что с учетом MSW эффекта соответствует полному современному потоку приходящих на Землю pp-нейтрино (6.1+- 0.84)*10^{10} ν_e/(см^2 сек);

2) в рамках подготовки условий для выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино создана специальная облучательная установка с каналом для ввода источника и размещением галлиевой мишени в двух независимых зонах;

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

1) создана методика изготовления стартовой мишени из 3500 г хрома-50 97% обогащения для наработки в реакторе СМ-3 радионуклида 51Cr активностью 3МКи, выполнены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по исследованию возможности изготовления мишеней из компактного металлического хрома и изготовлены прототипы хромовых мишеней методом электроискровой резки заготовок.

2) созданы калориметрический и гамма-спектрометрический методы для измерения активности высокоинтенсивных нейтринных источников на основе радионуклида 51Cr с точностью порядка 1%.

Тема № 15.4 **физика атомного ядра, динамика ядерных и фотоядерных реакций, физика радионуклидов и тяжёлых ионов**.

Впервые дано объяснение ядерного глория эффекта ("света Будды" кумулятивных частиц) в рамках теории многократных взаимодействий.

Впервые определены спиновые поляризуемости протона γE1E1, γM1M1, γE1M2, γM1E2, которые описывают воздействие внешнего электромагнитного поля на спиновую структуру протона. Эксперимент выполнен на пучке поляризованных фотонов с энергией до 800 МэВ и поляризованной протонной мишени в рамках коллаборации МАМИ – ОИЯИ – ИЯИ.

Определение новых структурных констант дает новую фундаментальную информацию о строении ядерной материи на уровне нуклонных степеней свободы. В эксперименте по исследованию реакции d + 2H → 2He + n + n обнаружена структура во временном спектре нейтронов, подтверждающая полученную ранее при моделировании зависимость формы спектра от энергии квазисвязанного nn-состояния.

В сеансе декабря 2014 г. на нейтронном канале РАДЭКС ММФ опробована новая система сбора информации на основе цифровых сигнальных процессоров, отлажена методика исследования реакции nd-развала в геометриях квазисвободного рассеяния и SPACE-STAR.

Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях. Для изучения кластерной структуры высоковозбужденных состояний в ядрах 6Li и 6He совместно с научной группой Межуниверситетского ускорительного центра (IUAC, Нью-Дели, Индия) подготовлен проект исследование на пучках 6Li в IUAC и пучке нейтронов канала РАДЭКС в ИЯИ РАН.

Для исследований таких состояний в реакции 6He +1H→p+t+t проведено облучение ядерных фотоэмульсий на пучке гало-ядер 6He с энергией 150 МэВ в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Определены точность и область применимости приближенного выражения сечения реакции срыва остова гало-ядра. Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров.

Модернизирована низкофоновая камера с «пассивной» и «активной» защитой с прецизионным гамма-спектрометром из особочистого германия и системой сбора информации на основе цифровых сигнальных процессоров. С использованием камеры проведены измерения плотности потока тепловых нейтронов в измерительной полости фотонейтронного W-Be источника нейтронов по активации образца Cu-64, которая составила ~10^7 нейтрон/см^{2}с при среднем токе электронов 10 мкА.

Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8. Совместно с ЛНИ создана компьютерная модель фото-нейтронного W-Be-источника тепловых нейтронов. С учетом результатов моделирования изготовлен, установлен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 и опробован фото-нейтронный W-Be-источник нейтронов с внутренней полостью для облучения образцов тепловыми нейтронами и каналами для вывода тепловых и быстрых нейтронов из источника.

Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы. Изучались проявления оболочечных эффектов в нейтронных сечениях. Получено указание на появление нетрадиционного магического числа в свойствах ядра 6830Zn38. Исследованы эффекты проявления подоболочки N = 28–38 для других ядер.

Тема № 15.5 **нейтронная физика, технология интенсивных источников нейтронов, исследование конденсированных сред, радиационное материаловедение**.

Проведено численное моделирование и оценка возможностей повышения эффективности нейтронных исследований процессов нейтрон-ядерных взаимодействий и

структурных исследований конденсированных сред на импульсных источниках нейтронов при доступных параметрах нейтронных потоков.

Тема № 15.6 **физика и техника сильноточных ускорителей на средние и промежуточные энергии**.

Проведено пять сеансов работы ускорителя общей продолжительностью 1812 часов, направленных на разработку технологии получения радиоизотопов и наработку радиоизотопов, а также на исследования и модернизацию ускорительного комплекса. Проведен комплекс работ по модернизации ускорителя и каналов транспортировки пучка экспериментального комплекса, что позволило обеспечить успешную проводку пучка с энергией 209 МэВ на установку РАДЭКС по модернизированному каналу. Завершено выполнение хоздоговорных работ по разработке ускорителей, а также разработке и изготовлению элементов ускорителей с двумя российскими и двумя зарубежными ускорительными центрами.

Тема № 15.7 **прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, электроядерная трансмутация делящихся териалов, ядерная медицина**.

Для решения проблемы контроля многофакторного радиационного воздействия при ядерных и радиационных авариях разработан метод оценки вклада бета доз при сочетанном гамма-бета облучении в режиме реального времени. Метод основан на корреляционной связи доз гамма и бета излучений при авариях на ЯЭУ, предпосылкой к чему служат причинные связи образования источников излучений в случае аварий на ядерных реакторах. Сформулированы требования к ДАПП (дозиметрической аппаратуре профессионального применения) и методам испытаний приборов, предназначенных для пожарных и ликвидаторов последствий аварий. Получен и поддерживается ИЯИ патент №137628 «Имитатор-тренажёр дозиметра-радиометра», зарегистрированный 20.02.2014.

5П Фундаментальные науки – медицине.

Разработка методов радиотерапии новообразований мозга сложных локализаций.

Создана авторская программная система, позволяющая на основе методов Монте-Карло в автоматическом режиме рассчитывать конструкцию индивидуальных формирующих устройств для протонной терапии с заданной точностью. Точность формирующих устройств, полученных с помощью данной программной системы, находится на мировом уровне.

Разработка нового источника с иттербием для высокодозовой брахитерапии.

С использованием расчетов по Монте-Карло установлены преимущества новых источников с иттербием для различных направлений в брахитерапии: низкодозовая брахитерапия, выскодозовая брахитерапия, импульсная (или циклическая) брахитерапия.

24П Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов. Структура и динамика наноструктур и наноматериалов: исследования с помощью комплекса нейтронографических установок на импульсных источниках нейтронов ИН-06 и Радэкс ИЯИ РАН.

Рассмотрены структурные особенности нанокристаллов, синтезированных при высоких давлениях из смеси нанопорошков. Эта система представляет из себя псевдосплав взаимонерастворимых фаз элементов Fe и Cu (а также пор, занимающих несколько объёмных процентов). Целью исследования является демонстрация квазистабильности нанокристаллов, а также изучение факторов, препятствующих их старению. Было показано, что сильное разупорядочение железа в медной матрице, выявленное в мёссбауэровском эксперименте, существенно зависит от величины приложенного давления.

10П Фундаментальные свойства материи и астрофизика.

1. Нейтринная и ядерная астрофизика.

1.1 Мониторинг нейтринного излучения Солнца.

В 2014 году проводился ежемесячный мониторинг нейтринного излучения Солнца, выполнено 12 измерений скорости захвата солнечных нейтрино на ГГНТ. Величина скорости захвата солнечных нейтрино на галлии в 2014 году составила 61.2 +12.1/ -11.4 SNU. Продолжались работы по модернизации химико-технологических процессов извлечения на ГГНТ: была изготовлена установка отдувки германия с использованием эжекторной системы барботажа и система улавливания германия на насыпной колонке. Для повышения чувствительности ГГНТ в рамках работ по увеличению массы мишени ГГНТ выполнены работы по регенерации экстракционных растворов, в результате чего активная часть мишени телескопа в 2014 году была увеличена на 6% (3100 кг).

1.2 Калибровочный эксперимент на двухзонной галлиевой мишени.

Были разработаны принципиальные схемы для измерения активностей интенсивных источников с использованием проточного лабиринтного калориметра, германиевого детектора GEM20P4-70 и сцинтилляционного детектора NaI. Вся аппаратная часть дополнительной счетной системы телескопа полностью укомплектована и находится в постоянной опытной эксплуатации с целью исследования ее счетных характеристик при длительной эксплуатации в штатном режиме.

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

Выполнен набор и первичный анализ данных кластера в составе 5-ти гирлянд оптических модулей за примерно 200 суток его работы; осуществлен мониторинг значений гидрооптических параметров и уровня собственного свечения водной среды в расширенном (по сравнению с НТ200) диапазоне глубин в районе постановки нейтринного телескопа НТ1000; выполнено численное моделирование отклика установки в конфигурации 2014 г. на черенковское излучение вторичных ливней с энергией выше 10 ТэВ от потока нейтрино астрофизической природы с параметрами спектра соответствующими данным эксперимента IceCube, а также выполнено моделирование отклика установки на мюоны и ливни от фоновых потоков атмосферных мюонов и атмосферных нейтрино; выполнен анализ данных кластера, имеющий целью получение углового распределения атмосферных мюонов и сравнение полученных результатов с теоретическими предсказаниями; выполнен предварительный анализ данных, накопленных при эксплуатации кластера, по программе поиска нейтрино от гамма-всплесков.

1.4 Коллапс и физика нейтрино на больших подземных сцинтилляционных установках.

Установлен предел на частоту коллапсов звезд в нашей Галактике на трех детекторах ИЯИ РАН с идентичным сцинтиллятором – АСД, БПСТ, LVD - ~ 0.0064 1/год на 90% доверительном уровне. Разработана методика совместного анализа экспериментальных данных установок, и проведен совместный поиск редких нейтринных событий за 2012 год. Статья по результатам работы принята в печать журнала Известия РАН. Сер. физ.

1.5 Международные проекты по физике нейтрино.

а. Безнейтринный двойной бета распад.

Разработана схема маломасштабной установки для очистки обогащенного германия. Начат монтаж пилотной установки с целью проверки возможностей выбранного метода очистки. Поиск двойного безнейтринного бета распада Ge-76 (Международный проект GERDA). Закончена первая фаза эксперимента. Используемые в анализе данные были получены с полной экспозицией 21,6 кг.год. событиях от фона. На основании этих данных получен верхний предел для периода полураспада 76Ge – 2,1·10^25 лет (90%). Полученное значение является наилучшим на мировом уровне. Выполнена вся подготовительная работа и начата вторая фаза эксперимента с 30-ю новыми германиевыми детекторами 8-ю используемыми ранее. Весь обогащенный германий для эксперимента (по изотопу Ge-76) поставлен Российской группой.

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

Разработан водный детектор нейтрино, являющийся частью ближнего детектора эксперимента T2K. Проведены тесты прототипов счетчиков для мюонного детектора, на основе экструдированных пластиков, которые показали хорошие параметры Завершено создание всех активных элементов, 9000 детекторов, прототипа магнитного нейтринного детектора. Совместно с университетом Женевы начата сборка первых модулей детектора, ведется подготовка к тестам на пучке в ЦЕРН. По проекту 11П "Лагуна" проведена работа по оптимизации эксперимента с длинной базой с одним и двумя пучками. Получена чувствительность к иерархии масс нейтрино и CP-нечетной фазе для случая интенсивного нейтринного пучка из ЦЕРН в Пихасалми с базой 2300 км и двух нейтринных пучков с базами 2300 и 1100 км. Показано, что 2 нейтринных пучка существенно повышают чувствительность эксперимента к CP нечетной фазе за счет использования первого и второго осцилляционных максимумов. Начата разработка нейтринных детекторов массой около 300 тонн на базе нейтринной платформы в ЦЕРН.

в. Изучение космических лучей сверхвысоких энергий международной коллаборацией «Telescope array».

- Исследованы автокореляции направлений прихода космических лучей сверхвысоких энергий, их корреляции с распределением вещества в локальной части Вселенной и корреляции с положением активных галактик. Обнаружено «горячее пятно» на карте космических лучей ультравысоких энергий. Горячее пятно может быть первым указанием на положение ближайшего к нам источника космических лучей предельно высоких энергий.

- Разработаны статистические методы анализа химического состава широких атмосферных ливней в зависимости от адронных моделей и химического состава, в частности, для ливней вызванных первичными фотонами и нейтрино. Получены ограничения на долю фотонов при высоких энергиях используя данные собранные установкой. Продолжается разработака метода анализа квазигоризонтальных ливней для получения ограничений на поток нейтрино сверхвысоких энергий.

- Построен спектр космических лучей на основе данных собранных за соответствующий период.

- Проведен поиск новой физики в космических лучах сверхвысоких энергий, получены ограничения.

- Проведено три дежурства на установке в штате Юта.

г. Измерение сечений взаимодействия нейтрино с ядрами углерода.

Измерены отношения полных и дифференциальных сечений глубоко-неупругого рассеяния нейтрино заряженным током на ядрах углерода, железа и свинца к сечениям, измеренным на ядрах сцинтиллятора (CH). Измерено, также, сечение когерентного рассеяния нейтрино и антинейтрино заряженным током на ядрах углерода.

д. Исследование нейтринных осцилляций в потоках нейтрино от реакторов.

Исследование нейтринных осцилляций в потоках нейтрино от реакторов. В 2014 г. в эксперименте Double Chooz была достигнута статистика 17350 событий при измерении только одним дальним детектором. Окончательный результат: sin2(2q13) =0.090+0.032/-0.029. В 2014 году закончена подготовка ближнего детектора: залит сцинтиллятор, установлена пассивная защита, проверена вся электроника.

е. Изучение адронной коипоненты ШАЛ.

Разработанным в ИЯИ РАН методом регистрации генерируемых в ШАЛ нейтронов в 2014 г. проводилось изучение адронной компоненты ШАЛ с помощью созданного в 2013 г. высокогорного кластера из эн-детекторов (PRISMA-YBJ) в Тибете на высоте 4300 м над уровнем моря и проведен анализ полученной информации за 15 мес. работы установки. К настоящему времени проанализированы экспериментальные данные по временному и пространственному распределению регистрируемых нейтронов в ШАЛ, по корреляции между энерговыделением в установке и числом зарегистрированных в ней тепловых нейтронов, а также по спектру ШАЛ по числу тепловых нейтронов. Показано, что спектр ШАЛ по числу нейтронов имеет степенной вид в ПэВ-ной области первичных энергий."

1.6 Низкофоновые эксперименты в БНО.

Набрана статистика за ~6000 час. В результате обработки данных установлено наилучшее ограничение на период полураспада Xe-124 относительно 2K-захвата на уровне T1/2>2.5x10^21 лет (90% у.д.). Измерения продолжаются.

1.7 Поиск массы нейтрино прямым методом в бета–распаде трития.

На установке «Троицк ню-масс» в 2014 году продолжилась модернизация вакуумной и высоковольтной систем, подготовлена заявка на проект для получения разрешения на работу с радиоактивным тритием. Прокалиброваны два высоковольтных делителя для получения требуемой стабильности и линейности напряжения. Проведено два сеанса измерений, в которых исследовано отклонение от адиабатичности для электронов с избыточной энергией до 5 кэВ. Измерен фон; с использованием электронной пушки исследована функция потерь электронов на изотопах водорода H2 и D2 в интервале энергий 14-19 кэВ. В рамках работ по проекту КАТРИН проведена оценка влияние начального состояния молекулярного трития на точность определения эффективной массы

электронного антинейтрино. Подготовлено предложение по использованию Аргона-37 для изучения накопления зарядов в объёме спектрометра.

1.8 "ОГРАН – Опто-акустическая ГРавитационная АНтенна" для поиска и исследования гравитационных волн и слабых сейсмических процессов.

В 2104 году осуществлен монтаж установки ОГРАН в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН. Начаты работы по запуску установки в эксплуатацию. Опубликован результат о чувствительности установки в лаборатории на поверхности Земли.

2. Физика космических лучей.

2.3 Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп.

На ливневой установке «Ковер-2» проведено исследование характеристик адронной компоненты стволов ШАЛ с энергией выше 100 ТэВ. Получены пространственные и энергетические характеристики потоков тепловых нейтронов вблизи стволов ливней. По информации БПСТ за 1978 - 2013 годы проведён поиск мюонных нейтрино откосмичесих гамма-всплесков. Получены новые пределы на поток нейтрино от КГВ. Поиск всплесков космического гамма-излучения от испаряющихся первичных черных дыр (ПЧД) для модели испарения с релятивистскими фазовыми переходами проведен по данным ливневой установки “Андырчи”. Ограничение на концентрацию испаряющихся ПЧД в локальной области галактики для данной модели испарения, полученное по информации за чистое время набора 4.23 года, составляет 7.0*10^{10} пк^{-3} год^{-1} на 99% доверительном уровне.

2.8 Тунка. Эксперимент Тунка.

Установлена и пущена в эксплуатацию первая очередь из 29 оптических станций, покрывающих площадь ~0,25 км2, обсерватории гамма-квантов высоких энергий TAIGA. Первые экспериментальные данные этой установки в совокупности с данными установок Тунка-25 и Тунка-133 позволили получить энергетический спектр первичных космических лучей в широком диапазоне энергий $3x10^{14}$ – 10^{18} эВ, показывающий весьма сложный характер. Установлены также 19 станций сцинтилляционных детекторов, регистрирующих заряженные частицы в составе широких атмосферных ливней.

3 Междисциплинарные исследования.

3.1 Исследование содержания изотопа С14 в углеводородах.

Исследование содержания изотопа С14 в углеводородах. В подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН создана низкофоновая установка для измерения ультранизких концентраций изотопа С14 в углеводородах с помощью жидкого сцинтилляционного детектора. Получены первые результаты измерений содержания С14 в ЛАБе (линейный алкилбензол) на уровне $5\cdot10^{-17}$ С14/С12.

4. Теоретические проблемы физики элементарных частиц и астрофизики.

4.1 Теории фундаментальных взаимодействий вне стандартной модели, физика частиц и космология.

Исследована статистическая анизотропия спектра первичных возмущений Вселенной по данным WMAP за 9 лет наблюдения. Получены ограничения на модели анизотропной инфляции, а также на альтернативные модели ранней Вселенной - модель конформного скатывания и генезиса галилеона.

17 ОФН Активные процессы в галактических и внегалактических объектах. Тёмная материя и тёмная энергия в астрофизике космических лучей.

Исследованы свойства мелкомасштабных сгустков темной материи и рассчитан коэффициент усиления аннигиляционных сигналов в сгустках. В рамках гипотезы зеркальных частиц в качестве кандидатов в темную материю проведено теоретическое исследование астрофизических проявлений существования во Вселенной неориентируемых кротовых нор, при прохождении которых обычная материя превращается в зеркальную и наоборот. Полученные результаты опубликованы в 3-х статьях: В.С. Березинский, В.И. Докучаев, Ю.Н. Ерошенко. "Мелкомасштабные сгустки тёмной материи", УФН, 184, 3-42 (2014); V.I. Dokuchaev and Yu.N. Eroshenko, "Black Hole Atom as a Dark Matter Particle Candidate", Adv. High Energy Phys. Vol. 2014 (2014), Article ID 434539 (2014); V.I. Dokuchaev and Yu.N. Eroshenko, "Non-orientable wormholes as portals to the mirror world", Phys. Rev. D 90, 024056 (2014).

11П Экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных взаимодействий на ускорителях ЦЕРН.

Теоретические исследования новой физики за пределами Стандартной Модели.

Дан обзор современного состояния исследований моделей со стерильными нейтрино. Исследована возможность обнаружения стерильного нейтрино в экспериментах на LHC.

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

Определены пределы на массы правого W-бозона и тяжёлого нейтрино с помощью сигнатуры «2 лептона + 2 струи» на основе экспериментальных данных детектора CMS.

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

В соответствии с планом эксперимента ALICE по модернизации триггерной системы и из-за необходимости детектору T0 работать при выводе пучка с расстоянием 50 и 25 нс между сгустками пучка, за отчетный период выполнены работы по перемещению

электроники детектора T0, проведено измерение временных параметров триггерных сигналов детектора T0 после перемещения электроники детектора и модернизации триггерного модуля для формирования триггерного сигнала LM, выполнено определение светимости в p-Pb столкновениях, проведена подготовка к физическому сеансу 2015-2017 гг. Подготовлен TDR (технический проект) по новому детектору FIT (Fast Interaction Trigger, T0-plus), который заменит детектор T0 (из-за его недостаточного аксептанса) и необходимости создания нового мюонного трекера.

Модернизация и исследование характеристик нового волоконного трекера LHCb.

В рамках модернизации трекера установки LHCb разработаны опытные образцы 64-канальных лавинных фотодиодов с уменьшенным коэффициентом оптической связи. Также изучена температурная зависимость величины гасящего сопротивления ячейки, что позволяет оптимизировать структуру фотодиодов. В рамках модернизации калориметрической системы исследованы загрузочные характеристики и произведена замена ~300 фотоумножителей адронного калориметра.

Разработка конструкции нового годоскопа заряженных частиц. Исследование характеристик прототипов электроники детектора NA62 на тестовых пучках ускорителя и космических мюонах.

Разработана схема нового годоскопа заряженных частиц для эксперимента NA62 (ЦЕРН). Проведены тесты 16 счетчиков с фотоприемниками SensL и усилителями, разработанными в ИЯИ РАН, во время инженерного сеанса NA62. Проведенный анализ показал высокую эффективность детекторов к заряженным частицам и временное разрешение лучше 1 нс. Начато создание 150 сцинтилляционных детекторов и изготовление быстрой электроники для годоскопа NEWCHOD.

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

Выполнена детальная техническая разработка основных узлов установки, проведены ряд тестовых испытаний и расчетов методом Монте-Карло основных процессов, связанных с получением большого количества атомов антиводорода и формированием суперхолодного пучка этих атомов в вакууме, а также проведены начальные работы по монтажу установки в экспериментальном зале. В 2014 г основная часть установки AEGIS впервые запущена в эксплуатацию.

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

Разработана и изготовлена система термостабилизации фотодетекторов, проведена модернизация электроники контроля параметров переднего адронного калориметра установки NA61. Разработан метод калибровки калориметра для анализа данных реакции Be+Be. Результаты доложенв на совещаниях и конференцииях и представлены в отчете НИР.

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

Телескоп для поиска солнечных аксионов продолжил работу по поиску легкого солнечного аксиона в международном центре ЦЕРН. Выполнен набор данных на установке, включающий в себя измерения со сканированием по давлению гелия ^{3}He, наполняющего трубопровод сверхпроводящего магнита. Метод, используемый в установке CAST, позволяет достичь уникальной чувствительности при определении масс и констант связи аксионов находящихся в области уже предсказанных теоретических значений.

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

Поиск событий-кандидатов на появление тау-нейтрино в детекторе OPERA по данным 2011-2012 гг. и коррелированных событий по времени на установках LVD, BOREXINO и OPERA проводился, вследствие отсутствия финансирования по теме, за счёт перераспределения средств из других тем.

Изучение фундаментальных свойств нейтрино в эксперименте ICARUS.

В 2014 году завершено усовершенствование методов реконструкции событий в детекторе ИКАРУС, выполнен анализ результатов, полученных на остановленных космических мюонах в детекторе по поиску нестандартных взаимодействий нейтрино.

LINAC4 - повышение светимости пучка ускорительного комплекса Большого адронного коллайдера.

Завершена сборка измерителя формы сгустка для ускорителя Linac4 в ЦЕРН, успешно проведены комплексные лабораторные испытания, интеграция системы контроля измерителя в систему управления и контроля стенда. Измеритель подготовлен к установке на стенде на выходе RFQ.

Исследование и разработка новых узлов ускорителя «Большой адронный коллайдер».

Выполнена разработка, изготовлены и проведены комплексные испытания предсерийных прототипов систем выводы энергии из сверхпроводящих корректирующих

магнитов. Достигнутые характеристики систем вывода энергии соответствую установленным требованиям.

Модернизация системы регистрации адронного калориметра детектора CMS.

На специализированных экспериментальных стендах выполнены комплексные исследования параметров опытных образцов микропиксельных лавинных фотодиодов SiPM. Проведены запланированные исследования радиационной стойкости различных структур SiPM на пучках нейтронов и протонов.

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

ГРИД-кластер ИЯИ РАН уровня Tier2 российского сегмента глобальной ГРИД-инфраструктуры EGEE/WLCG LHC выполняет задачи экспериментов в ЦЕРН ALICE, CMS, LHCb. На данный момент обеспечен стабильный уровень работы GRID сервисов для проведения физиками анализа данных с экспериментов LHC.

1.1 ОФ Физика элементарных частиц, фундаментальная ядерная физика и ядерные технологии.

Исследования проблем квантовой хромодинамики и свойств элементарных частиц при высоких энергиях.

Сформулирован конформно-инвариантный предел четырехмерной квантовой электродинамики в рамках теоретико-возмущенного разложения по константе связи и изучены следствия конформной симметрии в теории сильных взаимодействий. Получены новые ограничения на потоки нейтрино и мюонов от аннигиляции темной материи, на скорость аннигиляции, спин-зависимое и спин-независимое сечения рассеяния частиц темной материи (WIMP) на протоне, с использованием данных Байкальского нейтринного телескопа НТ-200. Проведено исследование возможного влияния нестандартных взаимодействий нейтрино на сигнал от аннигиляции темной материи в Солнце.

Теоретические исследования модифицированной гравитации, свойств «тёплой» тёмной материи и поиск частиц – кандидатов в тёмную материю.

Показано, что нарушение симметрии Лоренца на транспланковских масштабах приведет к тому, что атмосфера станет прозрачной для фотонов ультравысоких энергий (> ЭэВ). Как следствие, регистрация нескольких фотонов таких энергий установит наиболее сильное ограничение на параметры нарушения Лоренц-инвариантности и модели квантовой гравитации типа Хоравы-Лифшица.

Построено расширение модели статической кротовой норы Айхелбурга-Шайна.

Экспериментальное исследование редких и запрещённых распадов заряженных и нейтральных каонов и пионов.

Проведен сеанс с каонным пучком на установке ОКА. Выполнен анализ данных полулептонных и адронных распадов заряженных каонов. Результаты представлены в трех докладах на сессии Секции ядерной физики ОФН в ноябре 2014 г. Выполнена модернизация адронного калориметра и части аналоговой электроники.

Исследование нарушения дискретных симметрий с использованием интенсивных пучков остановленных положительных каонов.

Проведен анализ данных эксперимента E949. Получены новые модельно-независимые ограничения на распад каона на мюон и три нейтрино, который чувствителен в существованию тёмных фотонов, предсказываемых рядом моделей. Разработан спиральный годоскоп заряженных частиц на основе сцинтилляционных волокон, который будет использоваться в эксперименте по проверке лептонной универсальности в распадах каонов. Запущен в работу калориметр на основе свинцового стекла, проведены первые тесты на пуске каонов.

Поиск конверсии мюона в электрон на ядрах и проверка фундаментальных законов сохранения лептонных чисел.

Проведено измерение с помощью космических мюонов разрешающей способности кристалла LYSO калориметра по энергии с двумя фото детекторами APD (лавинные фото диоды) Hamamatsu S8664-1010, которая составляет величину равную sigmaE/E = 1% для энергии 28 МэВ. Подготовлена система для измерения относительной дисперсии сигнала и темнового тока APD.

Научно образовательный проект по теоретической и экспериментальной физике элементарных частиц.

Дополнены курсы лекций и семинаров для студентов и аспирантов кафедры "Физика частиц и космология" Физического факультета Московского государственного университета, а также кафедры "Фундаментальные взаимодействия и космология" Факультета Проблем Физики и Энергетики Московского физико-технического института. Разработаны новые курсы для кафедры "Экспериментальные методы ядерной физики" Московского инженерно-физического института. Сформулированы научные задачи для дипломных работ студентов и кандидатских диссертаций аспирантов. Оказана финансовая поддержка студентам и аспирантам для участия в международных школах и конференциях, а также поддержка работы студентов и аспирантов в крупных международных экспериментах в ЦЕРНе (Швейцария), БНЛ (США), КЕК (Япония). По теме 10П "5.1 научно-образовательный центр по подготовке молодых научных кадров по физике

нейтрино и нейтринной астрофизике" переработаны планы подготовки кадров высшей квалификации с учетом новых требований к ФГОС по направлению 03.06.01. Институт принял участие в конкурсе КЦП и увеличил количество бюджетных мест в аспирантуре на 2015 год до девяти. В ходе работы по теме два аспиранта, прикрепленных к научно-образовательному центру досрочно защитили диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Информационное обеспечение Программы.

По темам 10П "5.2 информационное обеспечение Программы" и 1.1 ОФ "Информационное обеспечение Программы" осуществлялось информационное обеспечение научных программ Президиума РАН и Отделения физических наук РАН, информационная поддержка проектов, выполняемых в рамках этих программ, Научных и Экспертных Советов и рабочих совещаний. Велись работы по созданию, расширению, актуализации и обновлению разделов и страниц сайтов http://www.neutrino.inr.ru/ и http://www.particles_nuclei.inr.ru/.

Экспериментальные исследования по физике тяжёлых ионов в широком диапазоне энергий.

Проведено моделирование переднего адронного калориметра установки CBM с использованием транспортного кода GEANT4 в CBMRoot для определения центральности и угла плоскости реакции. Разработан прототип системы стабилизации температуры фотодиодов и проведены тестовые измерения. Результаты представлены в Техническом проекте калориметра. Проведен анализ полученных на установке HADES экспериментальных данных по потокам адронов в реакции столкновений ядер золота при энергии налетающих ядер золота 1.23 ГэВ на нуклон. Впервые получены параметры азимутального потока протонов v3 и v4. Получены предварительные результаты по анализу v1 и v2 потоков для K+ мезонов. Проведены работы по реконструкции, сборке и тестированию модулей электромагнитного калориметра.

Поиск сверхузких дибарионных резонансов и измерение длины нейтрон-нейтронного рассеяния на Московской мезонной фабрике ИЯИ РАН.

Для исследования нейтрон-нейтронных и протон-протонных корреляций в трехнуклонных системах (nnp и ppn) велась работа по подготовке и проведению экспериментов на нейтронном канале РАДЭКС в реакциях $n + 2H \rightarrow p + n + n$ и $n + 3H \rightarrow 2H + n + n$. В проведенном в декабре 2014 г. сеансе была опробована система сбора информации на основе цифровых сигнальных процессоров, в тестовом режиме проведены предварительные исследования реакции $n + 2H \rightarrow p + n + n$ в геометриях квазисвободного рассеяния и SPACE-STAR, на нейтронном пучке установлен монитор нейтронов,

оперативная информация с которого была доступна в сети. В эксперименте по исследованию реакции d + 2H → 2He + n + n обнаружена структура во временном спектре нейтронов, подтверждающая полученную ранее при моделировании зависимость формы спектра от энергии квазисвязанного nn-состояния, что позволяет определить эту важную характеристику NN-взаимодействия.

Исследования по физике фотоядерных взаимодействий (изучение спиновых эффектов и ненуклонных степеней свободы атомных ядер).

В 2014 г. проведены прецизионные измерения трех спиновых асимметрий комптоновского рассеяния на протоне в области Δ-резонанса, осуществлен физический запуск установки BGO-OD на ускорителе ELSA, экспериментально с помощью магнитного спектрометра изучены механизмы генерации электромагнитных излучений под действием фемтосекудных тераваттных лазерных импульсов, создана демонстрационная установка для обнаружения взрывчатых и наркотических веществ фотоядерным методом.

Исследование взаимодействия нейтронов с ядрами на импульсных нейтронных пучках.

Завершено сооружение вертикального канала источника «РАДЭКС». Изготовлен пропорциональный счетчик, наполненный дейтериевым газом до давления 2 атм. Проведены измерения времяпролетных спектров на тантале-181 на установке РЭПС. при проводке протонного пучка на нейтронный источник РАДЭКС с 22 по 27 декабря 2014 г. Проведены измерения сечения подбарьерного деления U238 на резонансных нейтронах.

Измерение нейтронных сечений с использованием метода по времени замедления нейтронов в свинце.

Исследовалось влияние материалов мишенного устройства на временное разрешение спектрометра СВЗ-100. Разработана методика нормировки сечений взаимодействия нейтронов с ядрами различных веществ с использованием теплового потока нейтронов получаемого в графитовой призме.

Исследование трансмутации ядерных материалов и разработка технологии подкритических систем на пучках заряженных частиц.

Выполнен расчёт параметров мишенного узла жидкосолевой электроядерной установки. Расчет проводился методом Монте-Карло с использованием транспортных кодов MCNPX и SHIELD, а также путем решения уравнения переноса методом дискретных ординат программой KATRIN. Полученные результаты служат исходной точкой для дальнейших расчетно-теоретических исследований жидкосолевых электроядерных установок.

Разработка высокоэффективных твердотельных детекторов нейтронов.

Проведена разработка и изготовление кольцевого детектора тепловых нейтронов на основе сцинтилляционных счетчиков. Разработка и моделирование детектора с временной фокусировкой на основе сцинтилляционных счетчиков. Произведена закупка системы считывания и регистрации с помощью пластин для нейтронной радиографии. Изготовлена и испытана система сбора информации с блоком регистрации на основе сцинтилляционных детекторов на дифрактометре по времени пролета «Геркулес».

Времяпролётная спектрометрия неупругого рассеяния нейтронов с большим телесным углом на нейтронном комплексе ИЯИ РАН.

Разработаны модели для вторичных спектрометров – узлов установок после образца для спектрометров Глобус и Гибрид; определено требуемое пространственное разрешение детекторных систем, соответствующее требуемому разрешению в обратном (импульсном) пространстве для исследования элементарных возбуждений в твердых телах; проведено Монте-Карло моделирование нейтронного транспорта и оптимизация геометрических и нейтронно-оптических параметров; разработан проект компактного нейтронного фильтра для системы анализатора-детектора с рекордным эффективным телесным углом.

Разработка многодетекторных систем и нейтронного диффрактометра нейтронного комплекса ИЯИ РАН.

Проведены работы по развитию методов и аппаратного оснащения по увеличению плотности потока и регистрации нейтронов на современной элементной базе. С данной целью была разработана новая система регистрации и сделаны закупки ряда блоков в системе VME. Для увеличения плотности потока нейтронов в экспериментах на импульсном нейтронном источнике ИН-06 разработана и изготовлена нейтронооптическая система трапецеидального концентратора на основе многослойно напыленных зеркал. Эффективность сбора нейтронов будет обеспечена разработанным и изготовленным по нашему заказу двухкоординатным позиционно-чувствительным газовым детектором. Разработана технология твердотельного детектора нейтронов на основе ZnS с добавками и изготовлен ряд опытных детекторов, что позволит в дальнейшем заменить газовые детекторы, ставшие малодоступными из-за резко возросшей цены гелия-3.

Исследование спектров быстрых нейтронов в подземных лабораториях.

По данным солнечных измерений SAGE на ГГНТ за период с января 2000 по октябрь 2014 года получено ограничение на поток быстрых нейтронов в подземной лаборатории ГГНТ, Ф < 7.0·10-3 см-2с-1. Несмотря на то, что полученное ограничение хуже величины, которая была получена в прямых измерениях с нейтронным спектрометром, оно получено

независимым способом и с привлечением большего объема даны для анализа может быть улучшено на 2-3 порядка.

Развитие ядерных технологий на протонных пучках Московской мезонной фабрики.

Проведено 5 сеансов работы ускорителя общей продолжительностью свыше 1800 часов с энергией до 209 МэВ и средним током до 120 мкА, наработка в режимах с интенсивным пучком составила свыше 90000 мкА·часов. Выполнен комплекс работ по модернизации систем ускорителя, среди которых можно выделить модернизацию инжектора протонов, в результате которой обеспечена стабильность фазового портрета пучка на выходе инжектора в течение импульса тока пучка и устойчивая работа в режиме с двумя последовательностями импульсов тока пучка с частотой повторения 50 Гц каждая.

Исследование методов и разработка технологии получения медицинских изотопов на сильноточных протонных пучках.

Исследованы различные характеристики генератора рубидия-82, изготовляемого на основе стронция-82 в РНЦ РХТ (С-Петербург) и ARRONAX GIP (Франция) с целью ПЭТ-диагностики кардиологических и онкологических заболеваний в России и Европе.

Исследование и разработка каналов транспортировки сильноточных пучков протонов и отрицательных ионов водорода с минимальными потерями в экспериментальном комплексе ИЯИ РАН.

Выполнена модернизация канала транспортировки пучка от выхода ускорителя до установки РАДЭКС с целью упрощения оптической системы и обеспечения раздельной транспортировки пучков протонов и отрицательных ионов водорода с минимальными потерями. Проведен сеанс по проводке пучка протонов по модернизированному каналу, включая сплиттер-магнит, в результате чего продемонстрирована эффективность принятых решений.

Разработка ускорительного проекта НИКА и подготовка экспериментов с пучками тяжелых ионов низких энергий.

Для испытаний прототипа калориметра ZDC для установки MPD/NICA в ИЯИ РАН был изготовлен модуль адронного калориметра. Ранее на пучке T10 в ЦЕРН были проведены исследования отклика модуля адронного калориметра с выполненным условием компенсации адронной и электромагнитной компоненты при энергиях протонов и пионов 1 – 5 ГэВ. Модуль перевезен в Дубну и будет испытан на пучке Нуклотрона в 2015 г. Завершена обработка данных, полученных в двух сеансах измерений на внутреннем пучке Нуклотрона по исследованию аномальной зависимости от энергии выхода пи-мезонов с использованием пробежного телескопа.

Разработка и создание сцинтилляционных детекторов заряженных частиц для учебно-исследовательских работ в школах и учебных институтах.

В 2014 году проведены тесты новых кремниевых фотоумножителей SensL, показана их высокая чувствительность к голубому и зеленому свету и низкий уровень шумов. Создан рабочий стенд для измерения параметров сцинтилляционных детекторов, используемый для обучения основам экспериментальной работы студентов старших курсов МФТИ и МИФИ.

Важнейшие результаты исследований по международным программам.

Разработка, изготовление и поставка двух измерителей формы сгустка (BSM) для линейного ускорителя Лос-Аламосского центра LANSCE, Тема № 15.6 (ИЯИ РАН, LAMPF-США). Проведены лабораторные испытания в LANSCE, измерители подготовлены к установке на пучке.

Международный проект «Большой адронный коллайдер» - ЦЕРН. Разработка, изготовление, лабораторные испытания, поставка и наладка измерителя формы сгустков для канала транспортировки из ускорителя в бустер CERN, Тема № 15.6 (ИЯИ РАН, ЦЕРН).

Закончены все этапы разработки, изготовление выполнено на 80%, сборка измерителей на канале начнется после поставки комплектующих из ЦЕРН.

Международный проект ускорительного тяжелоионного комплекса FAIR. Измеритель формы сгустков (BSM) с тремя сменяемыми ВЧ дефлекторами и тремя сменяемыми электронными ВЧ трактами для линейных ускорителей GSI и проекта FAIR (линейный ускоритель протонов, ускоритель UNILAC и линейный ускоритель непрерывного действия), Тема № 15.6 (ИЯИ РАН, GSI, Германия). Завершен и принят эскизный проект, результаты разработки технического проекта находятся на стадии согласования.

Международный проект «лазер на свободных электронах» -XFEL. Разработка, изготовление, поставка, монтаж и наладка системы поперечного отклонния мюонного вето, Тема № 15.6 (ИЯИ РАН, European XFEL Германия). Разработаны, изготовлены, элементы системы поперечного отклонения мюонного вето

Международный проект «лазер на свободных электронах» -XFEL. Исследование и разработка систем резонатора фотоинжектора для формирования сгустков электронов сверхвысокой яркости, Тема № 15.6 (ИЯИ РАН, European XFEL Германия). Выполнены исследование и разработка систем резонатора фотоинжектора для формирования сгустков электронов сверхвысокой яркости

Программа нейтринных исследований ЦЕРН. Проведение работ по разработке и созданию ближнего нейтринного детектора по проектам AIDA LAGUNA-LBNO, Тема № 15.3 (ИЯИ РАН, ЦЕРН). Разработан прототип магнитного нейтринного детектора и полностью активного сегментированного детектора нейтрино

Международный проект «Большой адронный коллайдер». Разработка и изготовление аналоговой и контрольной электроники для калориметра фрагментов (PSD) для эксперимента NA61 в CERN, Тема № 15.4 (ИЯИ РАН, ЦЕРН). Разработаны и изготовлены 47 комплектов аналоговой электроники для контроля параметров модулей переднего адронного калориметра эксперимента NA61 в ЦЕРНе.

Соглашение о научном сотрудничестве между ИЯИ РАН и компанией Nuclear Medicine Solutions с участием Лос-Аламосской научной лабораторией (США), Тема № 15.7 (ИЯИ РАН, NMS LANL, США). Проведены исследования в процессе облучения мишеней на ускорителе ИЯИ РАН, отправка облученных мишеней, исследование процессов вскрытия в США для получения стронция-82 для научных и медицинских целей

Соглашение о научном сотрудничестве между ИЯИ РАН и компанией Nuclear Medicine Solutions с участием Лос-Аламосской научной лабораторией (США), Тема № 15.7 (ИЯИ РАН, NMS LANL, США). Исследование режимов облучения мишеней, оптимизация процесса облучения, модернизация систем управления параметрами пучка и оборудования Изотопного комплекса ИЯИ РАН

Соглашение ИЯИ РАН с Французским научно-медицинским центром Арронакс ГИП. Научные исследования и разработки получения и химического выделения Стронция-82 из мишеней металлического рубидия, Тема № 15.7 (ИЯИ РАН, АРРОНАКС-ГИП Франция). Внедрена технология ИЯИ РАН по получению стронция-82, заключено Лицензионное соглашение

Соглашение ИЯИ РАН с Французским научно-медицинским центром Арронакс ГИП и фирмой LEMER PAX. Совместная разработка генератора рубидия-82, контейнера и инжекционной системы для ПЭТ-диагностики, Тема № 15.7 (ИЯИ РАН, АРРОНАКС-ГИП, LEMER PAX, Франция) Разработаны опытные образцы генератора рубидия-82, проведены первые испытания.

Разработка, изготовление и поставка экранов из мю-металла, Тема № 15.3 (ИЯИ РАН, INFN LNS Италия). Выполнены разработка, изготовление и поставка экранов из мю-металла.

Эксперимент поиску двойного безнейтринного бета-распада ядер 76Ge GERDA. Разработка метода очистки отработанных материалов германия, Тема № 15.3 (ИЯИ РАН, Университет г.Тюбинген, Германия, Национальная лаборатория Гран Сассо). Разработка

методов очистки отработанных материалов германия и пилотного образца установки по очистке отработанных материалов германия.

Созданная интеллектуальная собственность.

Тема № 15.1: Подано заявок в РФ, Получено положительных решений по заявкам на выдачу охранных документов РФ или свидетельств о регистрации, Количество охранных документов, действующих в РФ: 4 (Программы ЭВМ).

Тема № 15.2: Количество охранных документов, действующих в РФ: 1 (Изобретения).

Тема № 15.3: Количество охранных документов, действующих в РФ: 2 (Полезные модели).

Тема № 15.4: Подано заявок в РФ: 1 (Изобретения); Количество охранных документов, действующих в РФ: 2 (Изобретения), 2(Полезные модели).

Тема № 15.5: Подано заявок в РФ: 1 (Полезные модели); Количество охранных документов, действующих в РФ: 2 (Изобретения), 3 (Программы ЭВМ).

Тема № 15.6: Подано заявок в РФ, Прекращено действие охранных документов в РФ: 1 (Изобретения); Количество охранных документов, действующих в РФ: 4 (Изобретения).

Тема № 15.7: Подано заявок в РФ: 1 (Изобретения); Количество охранных документов, действующих в РФ: 7 (Изобретения), 1 (Полезные модели); Подано заявок за рубеж: 2 (Изобретения); Получено охранных документов за рубежом, Количество охранных документов, действующих за рубежом: 3 (Изобретения): Продано лицензий по охранным документам РФ: 1 (Изобретения); Продано лицензий по охранным документам за рубежом: 2 (Изобретения).

Проведённые научные мероприятия.

Тема № 15.1: 12-е Марковские чтения, май, Москва, ИЯИ РАН, ФИАН, ОИЯИ, ПИЯФ, 80 участников;

XVIII международный семинар по физике высоких энергий КВАРКИ’2014, июнь, г.Суздаль, 200 участников;

Школа-семинар молодых учёных «Фундаментальные 4взаимодействия и космология», ноябрь, г.Долгопрудный, МФТИ, 120 участников;

VII Черенковские чтения «Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц», апрель, Москва, ФИАН, 100 участников;

XVII Международная Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, сентябрь, Москва, МГУ, 200 участников.

Тема № 15.3: Международные совещания коллаборации «Байкал», июль и декабрь, Дубна, ОИЯИ, 40 участников.

Тема № 15.4: LXIV Международная конференция «ЯДРО-2014», сентябрь, Минск, Институт физики им. Б. И. Степанова, 160 участников.

Все приведенные в отчёте результаты являются новыми и соответствуют мировому уровню. Планируется продолжить исследования в направлениях, определённых государственным заданием на 2015 год.