

«УТВЕРЖДАЮ»

Академик-секретарь Отделения физических наук РАН

академик

В.А.Матвеев

« » января 2012 года

УДК 539.1.07

ОТЧЁТ

Учреждения Российской академии наук

Института ядерных исследований РАН

по направлению

**Участие в глобальных мегапроектах фундаментальной
физики**

за 2011 год

тема 01201050400

Научный руководитель: директор ИЯИ РАН академик Матвеев В.А.

Москва 2012

Ответственные исполнители:

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

Лаборатория физики элементарных частиц Отдела физики высоких энергий (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. В.Н.Болотов)

Лаборатория физики электрослабых взаимодействий Отдела физики высоких энергий (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. Ю.Г.Куденко)

Лаборатория электронных методов детектирования нейтрино Отдела лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики (заведующая лабораторией чл.-корр. РАН О.Г.Ряжская)

Заместитель директора по научной работе д.ф.-м.н. Л.Б.Безруков

Лаборатория релятивистской ядерной физики Отдела экспериментальной физики (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. А.Б.Курепин)

Лаборатория фотоядерных реакций (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. В.Г.Недорезов)

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

Исследования по проектам были частично поддержаны Целевыми программами РАН: Физика нейтрино и нейтринная астрофизика, Физика элементарных частиц и фундаментальная ядерная физика, РАН-ЦЕРН, Высокопроизводительные вычислительные системы и телекоммуникации; грантами Президента Российской Федерации, грантами РФФИ.

РЕФЕРАТ

Отчет: 145 с., 78 рис., 3 табл., 90 источников.

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЁЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, АДРОННЫЕ СТРУИ, КАЛИБРОВКА КАЛОРИМЕТРОВ. АНТИМАТЕРИЯ, ГРАВИТАЦИЯ, ПОЗИТРОН, ПОЗИТРОНИЙ, АКСИОН, ДИПОЛЬНЫЙ МОМЕНТ, СКРЫТЫЙ СЕКТОР, ФОТОН, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРИНО, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР

Объектом исследования являются процесс рождения и возможность экспериментального наблюдения тяжелого майорановского нейтрино и дополнительных калибровочных бозонов в эксперименте CMS, исследование столкновения релятивистских ядер в эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе, исследование параметров нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой, исследование редких распадов частиц и новых методов регистрации нейтрино.

Цель работы:

Набор экспериментальных данных в физических сеансах измерений при энергии сталкивающихся пучков протонов до 7 ТэВ. Анализ данных эксперимента CMS с целью выделения событий рождения тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов в эксперименте CMS, 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.

Калибровка адронного калориметра установки CMS при помощи изолированных треков от заряженных частиц, которые после рождения проходят через трековую часть установки.

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 2010-2011 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 2010-2011 гг. и соответствующих полной светимости БАК 240 пб^{-1} , были получены ограничения на массу правого бозона W_R около 1700 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино 600 ГэВ. Новый нижний предел на массу правого W-бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, в 2,3 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 APD, планируемых для установки в HCAL.

Научно-технический уровень выполненной НИР:

Первые результаты, полученные в эксперименте CMS в физических сеансах измерений при энергии сталкивающихся пучков протонов до 7 ТэВ по поиску тяжёлого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов, при исследовании столкновения релятивистских ядер в эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе, исследовании параметров нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой, исследовании редких распадов частиц и новых методов регистрации нейтрино. уникальны и обозначают передовой рубеж современной науки на мировом уровне.

Содержание

Реферат	3
Введение	6
Основные результаты	11
Экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных свойств и структуры материи в ТэВном масштабе на LHC	11
Изучение фундаментальных свойств антиматерии в гравитационном поле в эксперименте AEGIS в ЦЕРН	50
Новые легкие частицы за пределами Стандартной Модели: поиск солнечных аксионов и фотонов скрытого сектора на установке CAST	67
Поиск кварк-глюонной материи при столкновении ультрарелятивистских ядер – эксперимент ALICE	85
Развитие экспериментальной методики исследования взаимодействий мюонных нейтрино и идентификации рождения тау-нейтрино в детекторе OPERA	91
Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН – эксперимент NA61	94
Исследование ультра редкого распада заряженных каонов $K^- \rightarrow \pi^- \nu \bar{\nu}(\text{bar})$ на установке NA62 SPS CERN	95
Информационно-вычислительное обеспечение исследований с использованием технологий ГРИД	96
Разработка измерителя продольного распределения заряда в сгустках для Linac-4 ЦЕРН	97
Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)	103
Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI	110
Исследование коллективных эффектов и ненуклонных степеней свободы в ядрах и переходных процессах в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами (проект NICA MPD)	110
Исследование редких распадов элементарных частиц	111
Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях KEK и J-PARC	120
Проект Коллапс и физика нейтрино на больших подземных сцинтилляционных установках	121
Поиск двойного безнейтринного бета распада ^{76}Ge (эксперимент GERDA)	122
Разработка и создание альтернативных (оптического, гидроакустического, радиоволнового и радиоастрономического) методов детектирования космических нейтрино ультравысоких и экстремально высоких энергий (1015-1021 эВ и выше) (НЕСТОР-САДКО-РАМАНД-РАМХАНД-МЛФД)	124
Исследование электромагнитных взаимодействий ядер	132
Заключение	135
Список научных публикаций и докладов	139

Введение

Сотрудники Института принимали участие в глобальных мегапроектах фундаментальной физики в рамках внутрироссийского и международного сотрудничества, где проводились следующие научные исследования.

Моделирование физических процессов для детектора «Компактный мюонный соленоид» на Большом адронном коллайдере.

Исследование редких распадов элементарных частиц. Обработка статистического материала, записанного на установке ИСТРА. Продолжение изучения распада $K^- \rightarrow e^- \gamma$. Набор статистических материалов на установке ОКА. Подготовка проекта КЛОД: моделирование и изготовление прототипов детекторов установки, испытание на пучках ускорителя ИФВЭ.

Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов: Измерение вероятностей редких распадов положительных каонов с испусканием фотонов в эксперименте E949. Поиск тяжёлых нейтрино в распадах остановленных положительных каонов. Подготовка нового эксперимента по измерению редких распадов остановленных положительных каонов.

Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях KEK и J-PARC: Проведение Монте Карло моделирования ближнего детектора ND280 на основе нейтринных генераторов NUANCE и Neut и оптимизация детектора мюонов высоких энергий. Исследование редких процессов с испусканием фотонов. Продолжение набора статистики и проведение измерений по поиску осцилляций мюонных нейтрино в электронные нейтрино. Измерение параметров нейтринного пучка вблизи мишени и измерение сечений взаимодействия нейтрино с ядрами в диапазоне энергий около 1 ГэВ. Получение первых результатов по измерению параметров осцилляций мюонных нейтрино. Измерение нейтринных компонент off-axis нейтринного пучка.

Разработка стриповых сцинтилляционных детекторов, полученных методом экструзии, со спектросмещающими волокнами для нейтринных детекторов большого объёма. Разработка и создание прототипа сегментированного активного нейтринного детектора для экспериментов с короткой базой. Разработка и тестирование фотоприемников расширенной квантовой чувствительностью для регистрации сцинтилляционного света в диапазоне волн 550-700 нм. Создание компактных детекторов заряженных и нейтральных частиц на основе пластиковых сцинтилляторов и микропиксельных фотодиодов.

Электронные методы детектирования нейтрино:

- Поиски нейтринного излучения от коллапсов звёзд в Галактике на детекторе КОЛЛАПС АНС и на детекторе LVD.

- Подземный нейтринный комплекс Гран–Сассо - непрерывная эксплуатация LVD (3 башни); сканирование эмульсий детектора ОПЕРА и обработка экспериментальных данных; обработка экспериментальных данных LVD по мониторингу пучка от ускорителя в ЦЕРНе; получение характеристик потока нейтронов, генерируемых мюонами с помощью установки LVD.

Нейтринные телескопы. Участие в коллаборациях GERDA, DoubleChooz,, металло-органические сцинтилляторы: Завершение монтажа установки GERDA, участие в эксплуатации установки, создание в ИЯИ центра по хранению данных, обработка полученных данных. Завершение монтажа установки DoubleChooz и начало ее эксплуатации. Исследование возможности поиска двойного бета распада ^{100}Mo и ^{150}Nd с помощью сцинтилляционной методики.

Исследования по релятивистской ядерной физике:

Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC (CERN): Проведение физических измерений с использованием T0 детектора: проведение измерений множественности рожденных частиц; мониторингирование и определение светимости; определение плоскости реакции; измерение времени-пролета рожденных частиц; диагностика пучка. Изготовление запасных электронных модулей для детектора T0. Проведение работ по модернизации T0 детектора. Анализ данных, полученных в тестовых измерениях прототипа FARICH-детектора на пучке пионов ускорителя PS (CERN), в ноябре 2010 г. Оптимизация характеристик аналоговой и цифровой электроники. Изготовление многослойного аэрогелевого радиатора. Проведение тестовых измерений на пучке пионов ускорителя PS (CERN) в мае-июне 2011 г. с большим набором статистики. Моделирование событий ультрапериферических взаимодействий ядер свинца при энергии 2.76 ТэВ на нуклон с помощью модели RELDIS для точной оценки аксептанса ZDC-калориметров и сопоставление теории с первыми экспериментальными данными ALICE 2010 года. Подготовка публикации по электромагнитным взаимодействиям ядер в рамках коллаборации и отдельной теоретической работы.

Исследование коллективных эффектов и ненуклонных степеней свободы в ядрах и переходных процессах в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами: Измерение выхода нейтральных пионов на ядрах на внутреннем пучке Нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ. Разработка, проведение испытаний и оптимизация параметров прототипа адронного калориметра под нулевым углом ZDC при энергиях коллайдера NICA на пучках Нуклотрона и T10 ускорителя PS(CERN), разработка электроники.

Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия): Исследования выходов дилептонных пар на установке HADES в реакции с тяжелыми ядрами – Au+Au при энергии налетающих ядер серебра 1.25 ГэВ на нуклон. Подготовка к сеансу, обеспечение работоспособности и калибровки переднего 300 канального сцинтилляционного годоскопа, по определению плоскости реакции. Продолжение работы по сборке, моделированию и экспериментальному исследованию отклика 960- канального электромагнитного калориметра на основе свинцового стекла. Продолжение работы по моделированию возможностей установки HADES для исследований при 8 ГэВ на нуклон на FAIR.

Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI: Моделирование для определения возможности исследования рождения состояний чармония. Разработка, проведение испытаний и оптимизация параметров прототипа адронного калориметра под нулевым углом PSD при энергиях коллайдера CBM на пучках Нуклотрона и T10 ускорителя PS(CERN).

Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях на CERN SPS (эксперимент NA61): Продолжение набора экспериментальных даны по выходам заряженных адронов с большим поперечным импульсом в протон-протонных взаимодействиях. Подготовка и проведение физического сеанса по исследованию выходов заряженных пионов и каонов на фрагментированном пучке ядер углерода. Сборка и запуск адронного калориметра фрагментов, который на протяжении 4 последних лет разрабатывается и изготавливается в ИЯИ РАН: сборка в ЦЕРНе, установка на пучке и запуск полномасштабного калориметра из 16 модулей центральной части и 28 модулей внешней части калориметра. Изготовление и тестирование в ИЯИ электроники для 28 модулей внешней части калориметра. Калибровка калориметра на пучке и использование его для измерения энергии спектров в эксперименте на фрагментированном пучке ядер углерода.

Исследование ядро-ядерных взаимодействий на установке CASTOR (CERN CMS): Участие в измерениях на пучке Большого Адронного Коллайдера и анализ экспериментальных данных.

Разработка прототипа позитронно-эмиссионного томографа нового поколения: Исследование амплитудных и временных параметров детекторов на основе новых образцов МЛФД с улучшенными временными свойствами и для различных сцинтилляционных материалов (LSO/LYSO, LFS, PWO). Разработка программного продукта для моделирования взаимодействия ускоренных частиц и ядер с различными веществами и тканями человека для расчета распределений дозы, наведённой радиоактивности и выходов радиоизотопов для ПЭТ-диагностики.

Разработка газовых электронных умножителей (TGEM). Разработка позиционно чувствительных детекторов большой площади для регистрации в диапазоне волн 500-600 нм в рамках коллаборации в CERN R&D 51.

Фоторождение тяжёлых мезонов: Исследование парциальных каналов фоторождения мезонов на ядрах дейтерия и углерода в области энергий фотонов от 600 до 1500 МэВ.

Фоторождение мезонов на лёгких ядрах: Обработка результатов первого измерения спиральной зависимости полного сечения реакции $\gamma n \rightarrow p \pi^- \pi^0$ в диапазоне энергий фотонов от 450 до 800 МэВ. Установка в систему мечения дополнительного анализирующего магнита. Подготовка на этой основе эксперимента по детектированию прямого припорогового фоторождения a_0/f_0 мезонов. Участие в наборе статистики для текущих экспериментов. Модификация поляризованной мишени ИЯФ (Майнц) в дейтронный вариант. Проведение измерений спиновых асимметрий с поперечно

поляризованными дейтронами мишени и циркулярно поляризованным фотонным пучком.

Исследование рождения мезонов на пучках протонов и фотонов при средних энергиях: Теоретический анализ данных по рождению мезонов на протонах. Исследование механизмов рождения каон-антикаонных пар, изучение роли вкладов скалярных мезонов $a_0(980)$ и $f_0(980)$ и эффектов взаимодействия в конечном состоянии K^- с парой протонов.

Изовекторные гигантские резонансы и двойной бета-распад ядер: Развитие полумикроскопического подхода для исследования простейших фотоядерных реакций (полные сечения фотопоглощения и одночастичные фотонуклонные реакции) на основе учета зависящих от скоростей остаточных нуклон-нуклонных взаимодействий для дипольных и квадрупольных изовекторных электрических возбуждений.

Исследование механизмов возбуждения нуклонов и ядер в области энергий до 800 МэВ: Анализ данных по возбуждению мультипольных гигантских резонансов на возбужденных состояниях ядер.

Исследование характеристик запаздывающих нейтронов при фотоделении ядер актинидов: Оптимизация параметров сцинтилляционного спектрометра запаздывающих нейтронов. Изготовление второго спектрометрического канала для уменьшения времени набора экспериментальных данных на пучке ускорителя. Моделирование работы различных вариантов схемы разделения частиц по форме сцинтилляционных импульсов, уточнение функции отклика спектрометра при низких энергиях. Моделирование разделения путем интегрирования зарядов. Приобретения более производительного интеллектуального контроллера КАМАК. Изготовление нового блока запирающего ФЭУ на время пучка ускорителя, что позволит увеличить рабочую интенсивность используемого пучка и сократить время эксперимента на пучке.

Разработка и оптимизация рабочих режимов радиационного комплекса ИЯИ РАН при проведении экспериментальных исследований: Разработка и изготовление оборудования для точного дозиметрического контроля электронного пучка ускорителя ЛУЭ-8-5. Организация и участие в прикладных работах на электронном ускорителе ЛУЭ-8-5. Ремонт системы охлаждения ускорителя.

Разработка прикладных применений наработки в фотоядерных реакциях радиоизотопов для: а) ядерной медицины; б) обнаружения и идентификации скрытых взрывчатых веществ и наркотиков (на основе регистрации (^{12}N и ^{12}B)-активностей) Эксперименты на микротроне РАМ-55. Подготовка демонстрационной установки в ФИАН (Троицк).

Исследование ускорения и накопления при многооборотной инжекции заряженных частиц в магнитную систему кольцевого ускорителя с применением методов математического моделирования: Продолжение работы по моделированию ускорительной секции электронного ускорителя. Начальная стадия работы по

математическому моделированию кольцевого ускорителя и многооборотной инжекции в синхротрон при разностном резонансе с продольной связью.

Исследование радиационно-химического воздействия пучка электронов на водные растворы и суспензии: Продолжение разработок радиационных технологий для ускорения процессов выщелачивания рудных материалов на основе проведенных в 2010 году экспериментов. Оптимизация основных параметров процесса радиационно-химического воздействия на исходный продукт.

Разработка детектора рентгеновского и гамма излучения на основе нового поколения камер компании Andor Tehnology: Внедрение методики диагностики остеопороза совместно с компанией ООО «Медицинский центр ХуанДи». Разработка программного обеспечения для цифровой обработки медицинских рентгеновских изображений суставов. Участие в изготовлении мониторов гамма и рентгеновского излучения.

Участие в международных проектах глубоководных нейтринных телескопов NESTOR (Греция) и ANTARES (Франция). Главной целью является развитие новых экспериментальных методов нейтринной астрономии (астрофизики) сверхвысоких энергий:

- гидроакустического метода глубоководного детектирования нейтрино в Мировом океане (**САДКО**, совместно с ИПФ РАН, МГУ);
- радиоволнового метода детектирования нейтрино сверхвысоких и экстремально высоких энергий, взаимодействующих с антарктическим льдом (**РАМАНД**, совместно с ААНИИ, РАЭ);
- радиоастрономического метода детектирования космических лучей экстремально высоких энергий (нейтрино, протонов и др.), взаимодействующих с поверхностными слоями Луны (**РАМХАНД**, совместно с ПРАО ФИАН);
- участие в разработке и создании глубоководного оптического нейтринного телескопа в Средиземном море (**НЕСТОР**) (совместно с АО ИО РАН),
- разработка высокочувствительных приборов на основе полупроводниковых микропиксельных лавинных фотодиодов – **МЛФД** для регистрации световых квантов, гамма излучения, нейтронов и заряженных частиц (совместно с ОИЯИ, З.Я. Садыгов).

Основные результаты

Экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных свойств и структуры материи в ТэВном масштабе на LHC

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 Института ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН) в 2011 г. совместно с сотрудниками университета штата Миннесота (США) в рамках минимальной лево-право симметричной модели (ЛПСМ) было проведено 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 W_R и Z' , а также семейства тяжелых нейтрино N майорановского типа. Распады W_R и N с массами вплоть до 3,5 ТэВ и 2,3 ТэВ соответственно могут быть обнаружены на установке CMS на уровне достоверности 5σ уже на начальном этапе работы при интегральной светимости БАК порядка $L_t = 30 \text{ фб}^{-1}$. Были выбраны оптимальные условия для возможного наблюдения сигналов от распадов W_R и N при достигнутой светимости и с учетом наиболее важных источников фона для этих процессов. Предварительные результаты этих исследований были доложены на многих совещаниях коллаборации CMS и опубликованы в виде внутренних препринтов.

За последние 25 лет успехи эксперимента и теории привели к созданию СМ – современной теории элементарных частиц. Эта модель прекрасно описывает физику всех известных взаимодействий: слабых, электромагнитных и сильных во всем диапазоне энергий, достижимых на современных ускорителях. Несмотря на такой успех, модель, тем не менее, нуждается в дальнейшем расширении и обобщении. Например, модель в ее нынешнем виде не в состоянии предсказать массы фермионов, объяснить

происхождение и состав темной материи, установить источник происхождения семейств фермионов и т.д.

Исследование свойств нейтрино является одним из путей, которые могут привести к пониманию новой физики и, тем самым, к необходимой модификации СМ. Эти исследования в значительной мере были стимулированы недавним открытием явления нейтринных осцилляций. Эксперименты с атмосферными (SuperK в Японии), солнечными (SAGE на Баксане, SNO в Канаде и GALLEX в Италии) и реакторными (KamLand в Японии) нейтрино получили яркие и надежные указания на то, что нейтрино имеет малую массу, и, следовательно, на необходимость расширения СМ до более полной теории, включающей массу нейтрино. В рамках минимальной СМ нейтрино является строго безмассовой частицей.

Одна из новых глубоких проблем, возникших в связи с открытием массивности нейтрино, связана с загадкой: почему нейтрино является настолько легким, почему оно гораздо легче заряженных фермионов? Для ответа на этот вопрос можно, например, попытаться расширить СМ и ввести массу нейтрино на электрослабом уровне. Однако все такие попытки не очень привлекательны. Например, введение правого нейтрино, являющегося синглетом группы $SU(2) \otimes U(1)$, позволяет ввести массу нейтрино «руками», аналогично тому, как это сделано для заряженных лептонов и кварков. Однако при этом трудно понять, почему эта масса настолько меньше других масс.

Наиболее привлекательными являются модели, которые содержат массивные нейтрино. Так, например, тяжелые нейтрино с массами $M_N > M_Z$ возникают в теориях великого объединения, в моделях с дополнительными измерениями и моделях типа Little Higgs, а также в лево–право симметричных моделях. Например, в моделях Little Higgs лептонные дублеты расширены путем добавления к каждому семейству одного дираковского нейтрино, могущего иметь массу вплоть до $M_D \approx 1$ ТэВ при условии, что оно связано с правым нейтрино, преобразующимся как синглет относительно $SU(3)$. Таким образом, в моделях этого класса массы обычных нейтрино генерируются естественным образом за счет смешивания легких и тяжелых лептонов порядка V/M_D , где $V = 246$ ГэВ.

Малая масса нейтрино может также генерироваться, например, с помощью механизма «see-saw». Этот механизм основан на майорановской массе - в нем тяжелое майорановское нейтрино смешивается с обычным нейтрино или, другими словами,

проводит очень малое время в виде легкого нейтрино. Такой механизм генерирует массы порядка $Y^2 V^2 / M_N$, где Y – юкавская константа связи, и позволяет объяснить, почему нейтрино имеет столь малую массу, существенно отличающуюся от масс заряженных лептонов. Однако в минимальной «see-saw» схеме $Y \approx 1$, поэтому для генерации малых масс тяжелое нейтрино должно быть ультратяжелым, $M_N \approx 10^{13}$ ГэВ, что исключает экспериментальную проверку таких моделей. Тем не менее, расширенные модели «see-saw» могут включать $M_N \approx 1$ ТэВ или легче, если существует скрытая симметрия, подавляющая вклад $Y^2 V^2 / M_N$.

Тяжелые нейтрино с массами порядка электрослабых могли бы рождаться на современных ускорителях, если их константы связи с фермионами и калибровочными бозонами СМ не очень малы, или, например, за счет нестандартных взаимодействий. Обычно полагается, что тяжелые нейтрино являются синглетами СМ и не имеют новых взаимодействий. С другой стороны, в моделях с расширенной калибровочной группой, например, $SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)_{B-L}$, рождение тяжелых нейтрино становится возможным за счет распадов новых калибровочных бозонов.

Таким образом, поиск тяжелых нейтрино является одним из актуальных и, возможно, оптимальных путей, которые могут привести к созданию новой, более полной, теории.

Поиск тяжёлых нейтрино в эксперименте CMS

[Лево-право симметричная модель и сигнатуры процессов](#)

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. Действительно, эта модель включает СМ на масштабе энергий порядка одного тераэлектронвольта и дает естественное объяснение нарушению четности в слабых взаимодействиях при низких энергиях как результат ее спонтанного нарушения при более высоких энергиях. Модель включает дополнительно три тяжелых калибровочных бозона, $W_R^\pm$ и Z' , а также три правых тяжелых майорановских нейтрино,

N_i . 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.

ЛПСМ была предложена для объяснения несохранения четности в слабых взаимодействиях. Хорошо известно, что в СМ калибровочная симметрия нарушена спонтанно. С другой стороны, несохранение четности вводится в лагранжиан непосредственно, так сказать, руками. В противоположность этому, в ЛПСМ четность первоначально сохраняется на уровне лагранжиана и нарушается спонтанно, вместе с калибровочной симметрией.

Возникает естественный важный вопрос: на каком масштабе энергии происходит это нарушение? В течение долгого времени полагалось, что ЛПСМ не является экспериментально интересной, т.к. массы новых калибровочных бозонов W_R и Z' существенно превышают тераэлектронвольт, т.е. находятся далеко за пределами достижимой на ускорителях энергии. Недавнее открытие явлений нейтринных осцилляций снова привлекло внимание к этому классу моделей, в основном по двум причинам: во-первых, правые тяжелые нейтрино, могущие быть партнерами легких нейтрино, являются составной частью моделей, во-вторых, локальная B-L-симметрия, не позволяющая тяжелым нейтрино иметь массы порядка планковских, также является калибровочной симметрией моделей. Это позволяет надеяться, что W_R , Z' и N могут рождаться уже при энергиях БАК.

В т.н. минимальной $SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)$ ЛПСМ обычные левые калибровочные бозоны, их правые партнеры W_R и калибровочный бозон группы $U(1)$ смешиваются, образуя физические заряженные $W^\pm$ и $W'^\pm$, нейтральные Z и Z' калибровочные бозоны и фотон. Взаимодействия этих бозонов описываются константами g_R , g_L и g соответственно. Существующие экспериментальные данные накладывают ограничения на допустимые значения углов смешивания и масс этих частиц. Так, например, угол смешивания нейтральных бозонов составляет величину меньше, чем $O(10^{-4})$, а масса Z' превышает $O(1)$ ТэВ. Довольно сильное ограничение на нижний предел для массы W' , $M(W') > 1,6$ ТэВ, получается из анализа разницы масс K_L-K_S , хотя и с довольно сильной неопределенностью из-за низкоэнергетических КХД-поправок в анализе каонной системы. Верхнее

ограничение на угол смешивания при этом составляет величину порядка 0,013. Результаты прямых поисков W' на Тэватроне дают ограничение на массу бозона $M(W') > 786$ ГэВ в предположении, что массы N лежат в экзотической области, и $M(W') > 650$ ГэВ в предположении, что массы $M(N) < M(W')/2$. Эти ограничения являются более сильными в обобщенных ЛПСМ. Отметим, что тяжелое майорановское нейтрино приводит к процессам с нарушением лептонного числа, ненаблюдаемость которых также позволяет получить некоторые новые ограничения.

Среди нескольких возможных реакций генерации W_R и N в pp -столкновениях наибольший интерес представляют реакции $p+p \rightarrow 2l^\pm + X$ через процесс слияния W_R (а), а также две реакции $p+p \rightarrow W_R + X \rightarrow N_l + l^\pm + X$ (б) и $p+p \rightarrow 2N_l + X$ (в) с последующим распадом тяжелого нейтрино на заряженные лептоны и струи. Реакция типа (а), аналогичная процессу двойного бета-распада, идущему, как известно, с нарушением лептонного числа, имеет преимущество в виде четкой экспериментальной сигнатуры – наличия двух лептонов в конечном состоянии. Однако, как показывают вычисления, сечение этой реакции существенно меньше по сравнению с процессами (б) и (в). Соответствующие диаграммы для этих процессов показаны на рисунке 1.

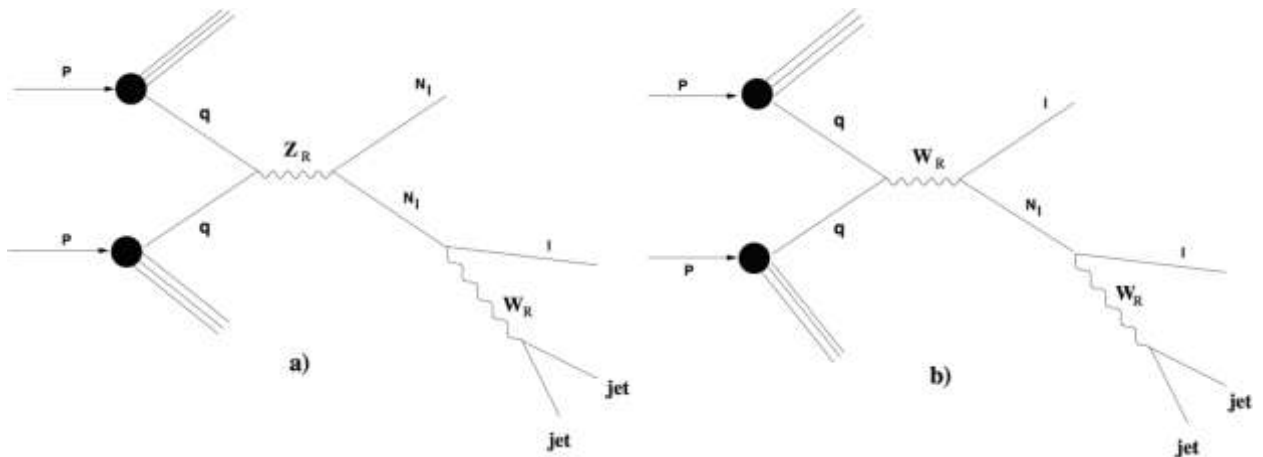


Рисунок 1 - Диаграммы процесса рождения тяжелого нейтрино через Z' -бозон (слева) и W_R -бозон (справа).

Сечения этих реакций зависят от следующих параметров ЛПСМ: значений констант связи g_R , величин масс M_W и M_N , значений СКМ-матрицы смешивания для правого сектора, углов смешивания W_R - W_L и Z - Z' , и значений масс тяжелых нейтрино N_l . В дальнейшем будут использоваться общепринятые предположения относительно этих

параметров: значения констант связи g_R и g_L равны, значения СКМ-матрицы смешивания для левого и правого секторов идентичны друг другу, углы смешивания W_R - W_L и Z - Z' равны. В рамках этих предположений Z' приблизительно в 1,7 раза тяжелее, чем W_R и, следовательно, процессы, идущие через обмен Z' , имеют меньшее сечение. Поэтому в дальнейшем основное внимание уделено изучению процесса $p+p \rightarrow W_R + X \rightarrow N_l + l^\pm + X$, идущего через прямое рождение W_R . Для простоты предполагается, что только нейтрино N_e , связанное с электронным ароматом, может рождаться при энергиях БАК, тогда как другие нейтрино являются более тяжелыми и не доступны на БАК.

Как показано на рисунке 1, правое майорановское нейтрино распадается главным образом на заряженный лептон и на виртуальный бозон W_R , который, в свою очередь, после процесса адронизации кварков распадается на две струи, что приводит к появлению $lljj$ -сигнатуры в конечном состоянии. В предположении, что доминирующим является электронный канал распада нейтрино $N_e \rightarrow e W_R \rightarrow e + 2jets$, конечное состояние, очевидно, представляет собой комбинацию двух пар $e_1 e_2$ и $j_1 j_2$. В случае, когда массы N_l вырождены, в конечном состоянии появляются также мюоны и тау-лептоны. Кроме того, сечение реакции $p+p \rightarrow W_R + X \rightarrow N_e + e^\pm + X$ отличается от невырожденного случая на фактор порядка 20% ввиду небольшого отличия в парциальной ширине распада W_R . Таким образом, пренебрегая этим небольшим различием сечений, можно рассматривать в конечном итоге для процесса $p+p \rightarrow W_R + X \rightarrow N_e + e^\pm + X$ только две независимые переменные, а именно, массы M_W и M_N .

Моделирование сигнальных и фоновых событий

Моделирование сигнальных событий и вычисление сечений было выполнено с помощью пакета PYTHIA 6.2, в котором использовались функции распределения партонов программы CTEQ5L. На рисунке 2 показана зависимость полного сечения рождения правого бозона от его массы. Доля положительно заряженных бозонов, рожденных в pp -столкновениях, зависит от его массы и изменяется от 70% при $M_W \approx 1$ ТэВ до 95% при $M_W \approx 10$ ТэВ. Таким образом, при больших массах рождаются преимущественно W_R^+ . На рисунке 3 показана зависимость произведения полного сечения рождения W_R и доли распадов W_R на электрон и нейтрино N_e в зависимости от массы M_N для различных значений масс W_R . 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.

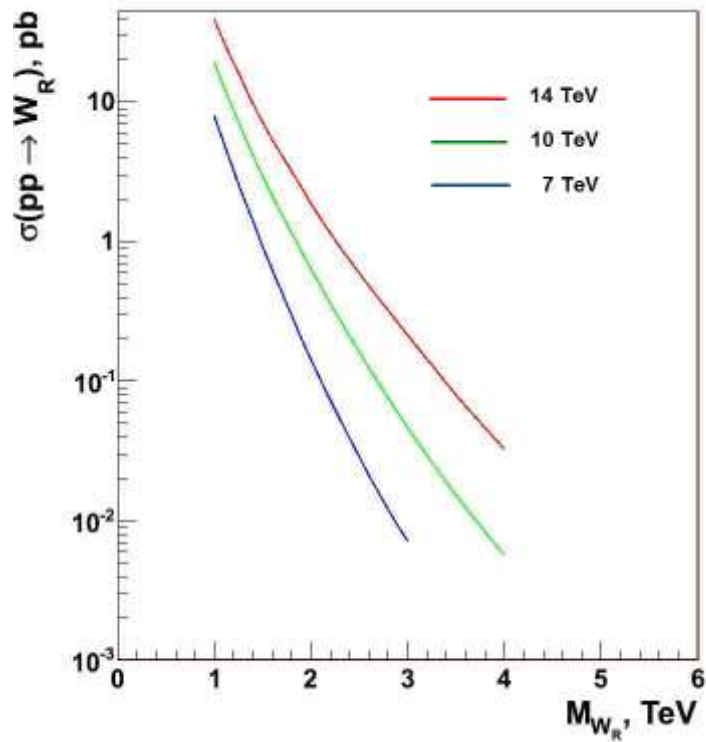


Рисунок 2 - Зависимость полного сечения от массы W_R -бозона для разных энергий пучка.

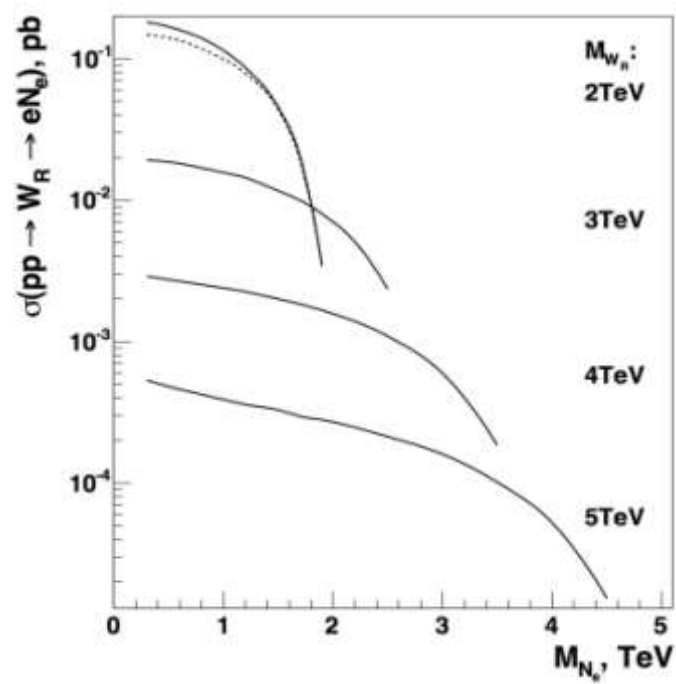


Рисунок 3 - Зависимость произведения полного сечения рождения W_R и доли распадов W_R на электрон и нейтрино в зависимости от массы тяжелого нейтрино для различных значений масс W_R .

Моделирование сигнальных событий от распадов W_R и N_e было выполнено с использованием программы полного моделирования и реконструкции событий в детекторе CMS CMSSW. Основные особенности предварительного отбора и анализа событий были следующими:

- для электронного канала предварительно отбирались и реконструировались события, удовлетворяющие условиям отбора по триггеру L1, т.е. наличие в событии одного или двух электронов. Эффективность отбора событий по триггеру L1, соответствующих регистрации в электромагнитном калориметре одновременно двух электронов с поперечной энергией $E_t > 20$ ГэВ, была близка к 100%. При этом эффективность регистрации этих событий по триггеру более высокого уровня HLT была также близка к 100%. Для мюонного канала отбирались события с хотя бы одним мюоном. Эффективность этого отбора также около 100%.

- величина поперечной энергии электронов (позитронов) и мюонов $E_t > 20$ ГэВ.

- требование условия наблюдения изолированных электронов в трековом детекторе оказалось очень важным. Согласно этому критерию отбирались только электронные события, сопровождающиеся не более одной частицей с поперечным импульсом более 2 ГэВ, локализованные в конусе радиусом 0,3 вокруг электронного трека. Полное моделирование событий показало, что отказ от этого критерия отбора существенно затрудняет правильную реконструкцию электронов при наличии в событии адронных струй. Для мюонов применялось аналогичное условие на изолированность треков.

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. Характеристики двух струй $(j_1 j_2)$, имеющих максимальный поперечный импульс, использовались в дальнейшем для определения кинематики и вычисления эффективных масс в событии. Эффективность отбора истинных сигнальных событий составила при этом

около 90%. На следующем этапе анализа отбирались события, удовлетворяющие следующим критериям:

- наличие в конечном состоянии только двух изолированных электронов (мюонов) с инвариантной массой более чем 200 ГэВ;
- инвариантная масса обеих комбинаций $e_1e_2j_1j_2$ ($\mu_1\mu_2j_1j_2$) находится в определенном энергетическом диапазоне.

При реконструкции инвариантной массы M_N^{cand} использовалась комбинация со вторым по энергии лептоном $e_2j_1j_2(\mu_2j_1j_2)$.

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 $L_t = 30 \text{ фб}^{-1}$.

В качестве источников фона рассматривались следующие процессы.

Фон от КХД, который важен только для событий с двумя электронами, так как при реконструкции высокоэнергетичных струй существует вероятность восстановить их как электрон. Для событий с мюонами этот фон не важен. Так как сечение такого процесса на девять порядков превышает сечение сигнального процесса, то полное прямое моделирование этого процесса связано с огромными затратами компьютерного времени и, таким образом, практически невозможно. Изучение фона от КХД проводилось при помощи метода «fake-rate». Суть метода состоит в следующем: сначала изучается вероятность для детектора CMS и его программного обеспечения реконструировать струю как электрон, а затем в сгенерированных КХД-событиях произвольным образом две струи заменяются электроном. Зависимость вероятности восстановления струи как электрона от энергии в событиях с двумя противоположно направленными струями рассчитана при помощи генератора PYTHIA 8. Данный фон хорошо описывается экспоненциальной функцией.

Процесс рождения двух t -кварков является одним из наиболее важных фоновых процессов. Сечение этого процесса примерно на три порядка превосходит сечение

сигнального процесса при $M_W = 1,2$ ТэВ и $M_N = 0,5$ ТэВ. Оценка числа фоновых событий была проведена двумя методами: моделированием с помощью программы PYTHIA и с использованием программы FASTSIM. Этот пакет дополнительно учитывает спиновые корреляции между t -кварками, а также использует код TAUOLA для генерации распадов тау-лептонов. Согласие результатов позволяет надеяться на то, что оценка этого фона получена корректно. Этот фон также хорошо описывается экспоненциальной функцией. Кроме того, данный фон можно независимо оценить из электрон-мюонного канала.

Сечение реакций с рождением Z_H и W_H достаточно мало и этот тип фона сравнительно легко подавляется с использованием описанных выше критериев. Значение массы бозона Хиггса, используемое при моделировании, составляло 190 ГэВ.

Другой важный источник фона связан с процессом $pp \rightarrow Z + \text{jets} + \dots$. Так как сечение этого процесса примерно на пять порядков превосходит сечение сигнального процесса при $M_W = 1,2$ ТэВ и $M_N = 0,5$ ТэВ, полное моделирование этого процесса практически невозможно в связи с большими затратами компьютерного времени. Для уменьшения этого времени моделирование было проведено при помощи генератора Alpgen с использованием дополнительного отбора по минимальному поперечному импульсу на уровне генерирования событий, который не оказывал существенного влияния на оценку числа событий этого фона для данной полной светимости. Было показано, что этот тип фона эффективно подавляется с помощью критериев, аналогичных используемым для подавления фона Z_W . Например, требование $M_{ee} > 200$ ГэВ существенно подавляет этот фоновый процесс.

Процесс рождения Z_W , сечение которого по порядку величины совпадает с сечением сигнального процесса при значениях масс $M_W = 1,2$ ТэВ и $M_N = 0,5$ ТэВ, тоже является фоновым. Ввиду того, что лептонные пары от сигнальных событий имеют существенно большие значения инвариантной массы, требование $M_{ee} > 200$ ГэВ также существенно подавляет этот фоновый процесс.

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 $e_1 e_2 j_1 j_2$ 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. Отметим, что поиски пика в распределении эффективных масс для событий - кандидатов на распад нейтрино следует проводить после отбора этих событий по эффективной массе $M(e_1 e_2 j_1 j_2) > 1$ ТэВ. Для области масс $M_W < 1,5$ ТэВ следует отбирать события, удовлетворяющие условию $M(e_1 e_2 j_1 j_2) > 0,5$ ТэВ. На рисунке 4 показано двумерное распределение инвариантных масс в плоскости $(M_{e_1, e_2 j_1 j_2}; M_{e_1 e_2 j_1 j_2})$ для реконструированных фоновых событий при условии, что электрон e_1 имеет наибольшее значение E_{τ} . Видно, что уровень фона возрастает при сближении масс M_N и M_W .

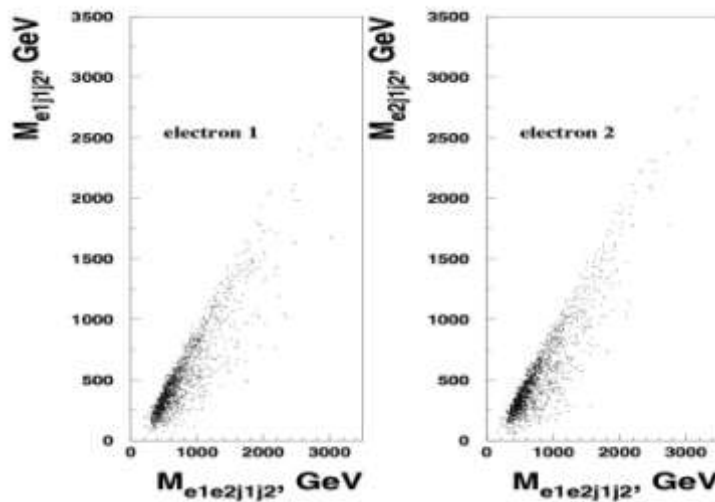


Рисунок 4 — Двумерное распределение инвариантных масс для реконструированных фоновых событий.

Уровень подавления фона на примере W_R с массой 1,2 ТэВ и N_e с массой 500 ГэВ в зависимости от используемых условий отбора показан в таблице 1 для электронного канала и в таблице 2 - для мюонного. Данные соответствуют начальной стадии работы детектора CMS и полной светимости $L_t = 100$ фб⁻¹. Эволюция числа фоновых событий в электрон-мюонном канале для оценки фона от двух t -кварков показана в таблице 3.

Таблица 1 - Эволюция числа сигнальных и фоновых событий в зависимости от примененных критериев отбора событий для электронного канала.

Step	Signal LRRP1	$t\bar{t}$	Z jets $e\bar{e}$	W jets e	QCD	WW jets	WZ jets	Others
Events in CMS	6.72	16200	167000	10^6	$2.8 \cdot 10^{10}$	4300	1800	1600
Simulated	2000	627000	2539000	2078000	$7.7 \cdot 10^7$	120000	114000	145000
Primary selection	4.86	133	413	1.5	33	2.1	5.5	3.9
Two isolated $e^\pm$	4.7	44.7	360	0.5	2.5	0.7	4.4	3.25
M_{ll} cut	4.4	5	2.7	0	0	0.13	0.06	0.025
$M_{WR}^{cand} > 500 \text{ GeV}$	4.4	3.2	2.2	0	0	0.13	0.06	0.032
Under 2D peak	3.28	0	0	0	0	0	0	0.004

Таблица 2 – Эволюция числа сигнальных и фоновых событий в зависимости от примененных критериев отбора событий для мюонного канала.

Step	Signal LRRP1	$t\bar{t}$	Z jets $\mu\mu$	W jets μ	QCD	WW jets	WZ jets	Others
Initial	6.72	16200	167000	10^6	$2.8 \cdot 10^{10}$	4300	1800	1600
Simulated	2000	627000	2310000	2073000	$2.1 \cdot 10^7$	120000	114000	145000
Primary selection	4.38	126	380	21	40	1.8	5.5	3.9
Two isolated $\mu^\pm$	3.5	38	290	3.2	13	0.42	4	2.7
M_{ll} cut	3.3	4	2.5	0.5	0	0.1	0	0.016
$M_{WR}^{cand} > 500 \text{ GeV}$	3.3	2.5	2.1	0.5	0	0.034	0	0.013
Under 2D peak	1.47	0.024	0	0	0	0	0	0

Таблица 3 - Эволюция числа сигнальных и фоновых событий в зависимости от примененных критериев отбора событий для электрон-мюонного канала.

Step	$t\bar{t}$	Z jets	W jets	QCD	WW jets	WZ jets	Others
Primary selection	220	800	31	65	3.2	10.7	7.7
$e - \mu$ pair	85	1.8	17	8	1.3	0.3	0.07
M_{ll} cut	8	0.13	0.5	0.8	0.13	0.09	0.008
$M_{WR}^{cand} > 500 \text{ GeV}$	5	0.068	0.5	0.8	0.065	0.08	0

Благодаря своей природе майорановская частица может распадаться либо как дираковская частица, либо как дираковская античастица. Так как эти два конечных состояния различны, интерференция между ними отсутствует. Предположим, что тяжелое нейтрино N_1 предпочтительно связано с заряженным лептоном, несущим l-аромат. Тогда,

если N_l является дираковским нейтрино, оно всегда будет распадаться в состояние с заряженным лептоном противоположного знака, тогда как если оно является майорановским нейтрино, половина его распадов будет сопровождаться лептонами одинакового знака. Такие лептоны обладают четкой экспериментальной сигнатурой, которая представляет большой интерес для поиска тяжелого нейтрино майорановского типа, так как обеспечивает эффективную перекрестную проверку в случае обнаружения сигнала. Единственным источником фона в этом случае являются лептоны одинакового знака от событий типа Z_h и W_h . Однако сечения рождения таких событий довольно небольшие, что делает поиски тяжелого майорановского нейтрино в канале с двумя лептонами одинакового знака практически свободным от фона. Проблему может представлять неправильная реконструкция знака заряженного лептона. Предварительное изучение этого вопроса показало, что события с неправильным знаком могут быть эффективно подавлены при использовании дополнительного отбора на число «хитов» в треке. Так, например, требование наличия более чем 6 «хитов» дает подавление более чем в три раза, оставляя эффективность событий с правильным знаком на уровне 90%.

Результаты первого этапа эксперимента

За 2010-2011 гг. детектором CMS было набрано 5 fb^{-1} удовлетворяющих триггеру экспериментальных данных, из них 240 pb^{-1} обработаны, остальные данные находятся в стадии обработки. В электрон-мюонном канале экспериментально обнаружены события, удовлетворяющие всем критериям отбора, которые хорошо согласуются с предсказаниями СМ. Распределение таких событий показано на рисунке 5. В электронном и мюонном каналах зарегистрирован пик от распада Z-бозона. Рисунки 6 и 7 демонстрируют его для электронного и мюонного распадов соответственно. Наблюдается хорошее согласие с моделированием методом Монте-Карло. Количество КХД-струй, реконструированных как электроны, также хорошо согласуется с результатами моделирования (рисунок 8).

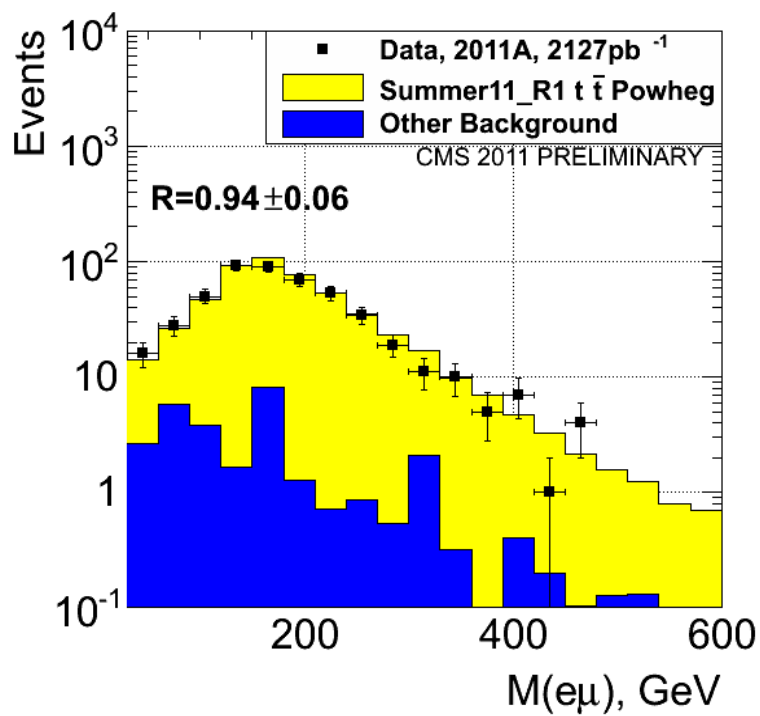


Рисунок 5 – Распределение событий в электрон-мюонном канале.

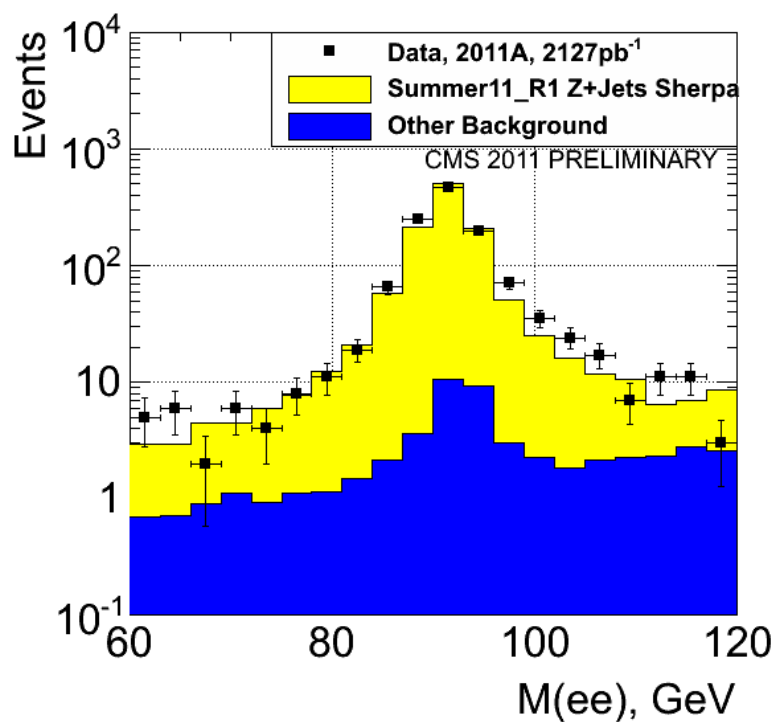


Рисунок 6 - Реконструированная масса Z-бозона в электронном канале.

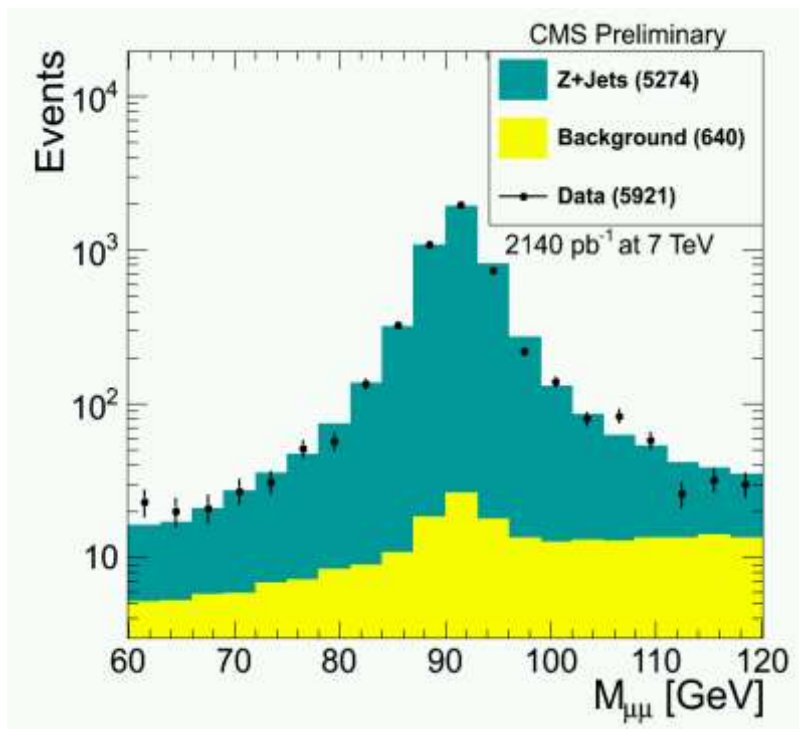


Рисунок 7 - Реконструированная масса Z-бозона в мюонном канале.

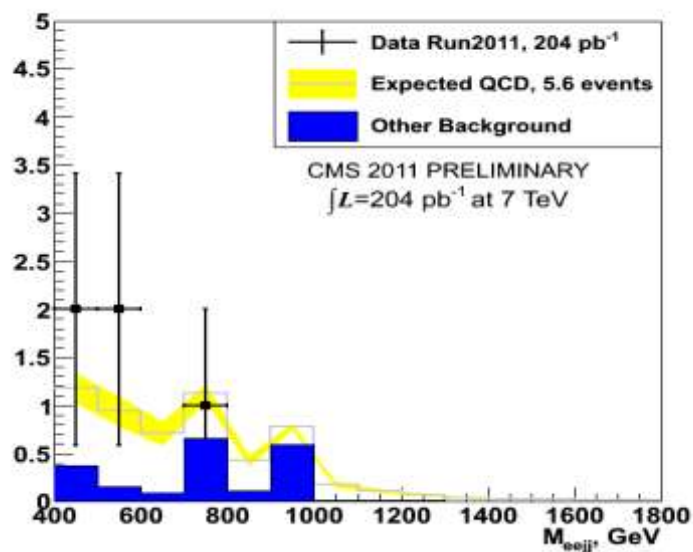


Рисунок 8 – Распределение по инвариантной массе четырех объектов для электронов одинакового знака с целью проверки фона от КХД.

Распределение по количеству первичных взаимодействий и распределение по инвариантной массе четырех объектов на предварительной стадии отбора представлены на рисунке 9. Хорошее согласие между теоретическими предсказаниями и

наблюдаемыми данными говорит о правильном понимании всех важных процессов, происходящих при высоких энергиях.

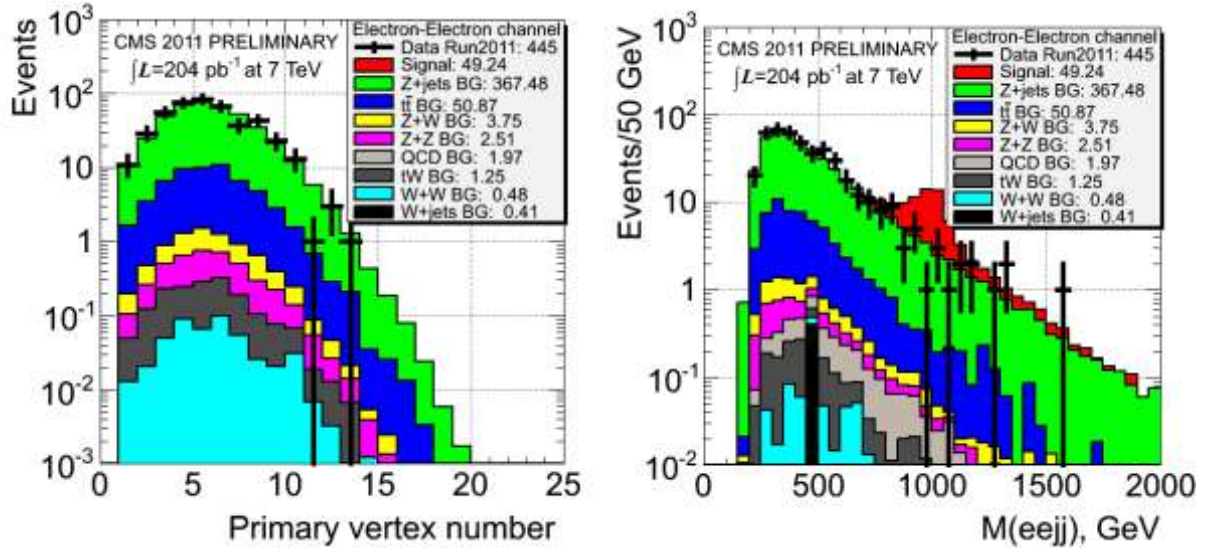


Рисунок 9 – Распределения по количеству первичных взаимодействий (слева) и по инвариантной массе четырех объектов (справа) в электронном канале.

События, прошедшие через все стадии отбора, представляют собой интересную картину, представленную на рисунке 10. Для мюонного канала видно небольшое превышение количества наблюдаемых данных над предсказываемым фоном, что дает надежду на обнаружение новой физики в ближайшее время. Одно из таких событий продемонстрировано на рисунке 11.

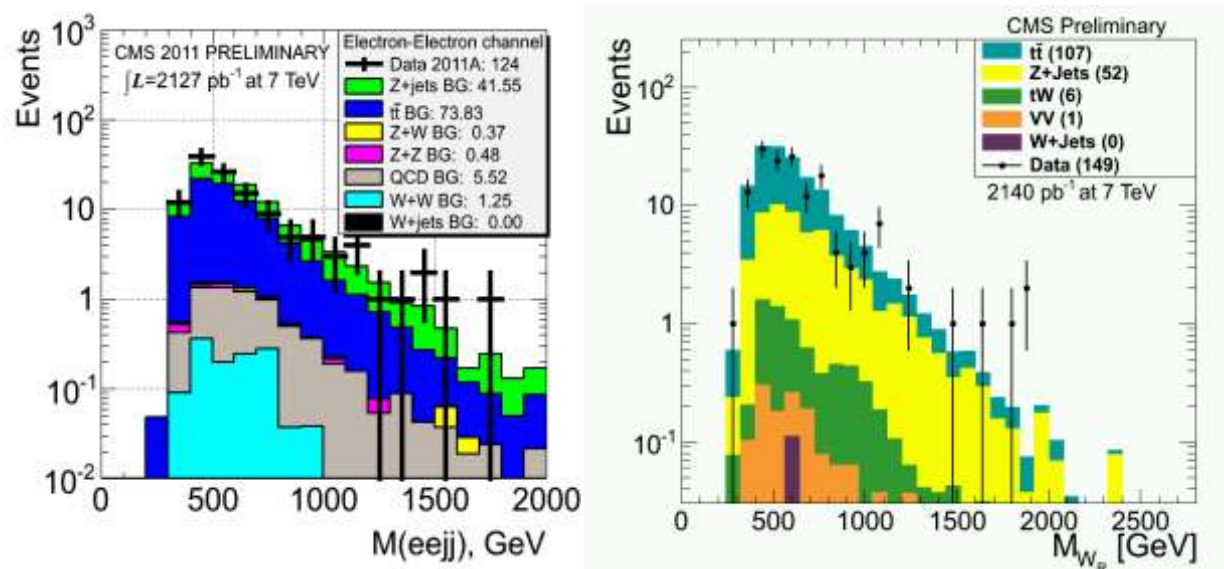


Рисунок 10 - Распределение событий по инвариантной массе четырех объектов после всех стадий отбора в электронном (слева) и мюонном (справа) каналах.

На рисунке 12 показаны графики наблюдаемого предела сечения рождения тяжелого нейтрино и правого W-бозона в зависимости от их масс. На рисунке 13 показаны области, где существование новых частиц в рамках ЛПСМ уже исключено. Достигнуто существенное улучшение (примерно в 3 раза) поставленных Теватроном пределов на массы тяжелых новых частиц. Поведение соответствующих этим массам сечений приведено на рисунке 14.

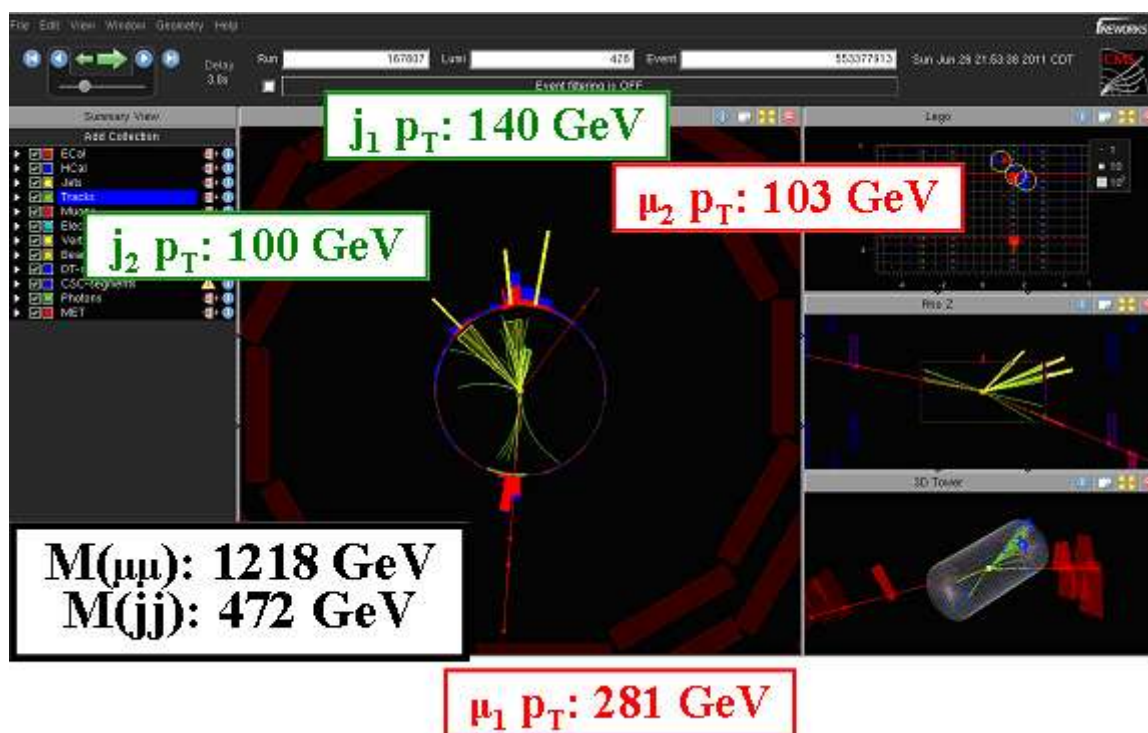


Рисунок 11 - Одно из событий, наблюдаемых в детекторе CMS, которое, возможно, указывает на физику вне рамок СМ.

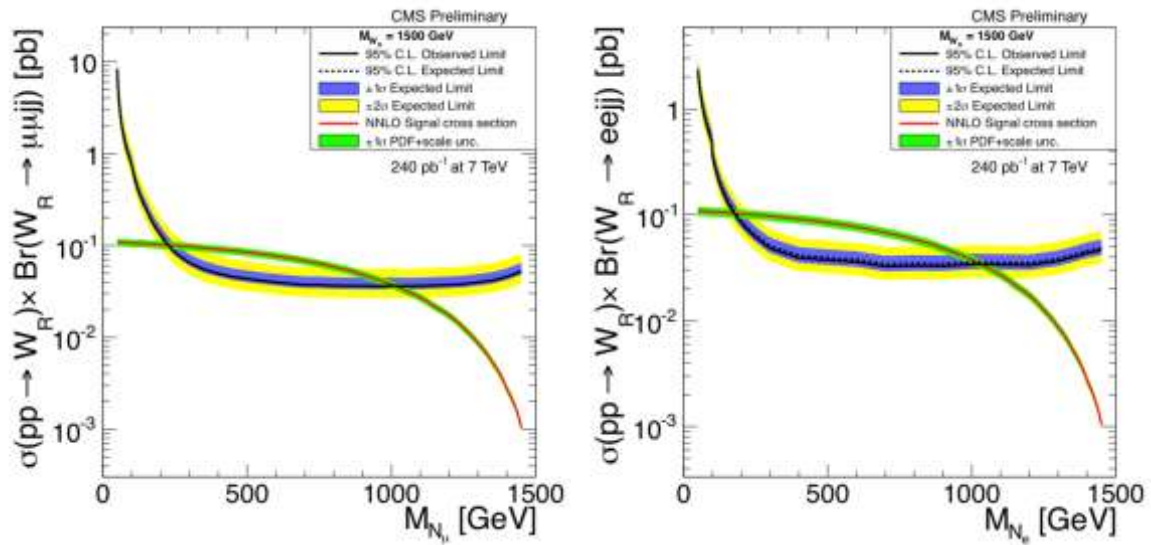


Рисунок 12 - Верхний наблюдаемый (черная сплошная кривая) и ожидаемый (черная пунктирная кривая) пределы на сечение рождения тяжелого правого нейтрино и W-бозона в электронном (слева) и мюонном канале (справа) в зависимости от значений масс майорановского нейтрино N.

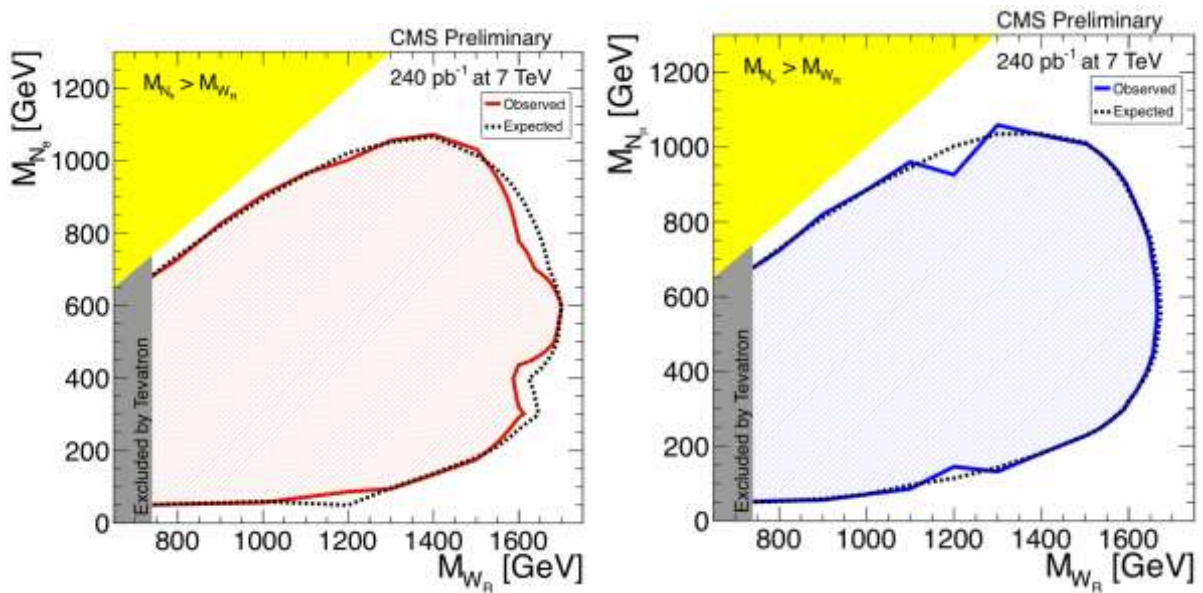


Рисунок 13 - Границы уже исключенных значений масс W_R и майорановского нейтрино N в электронном (слева) и мюонном (справа) каналах.

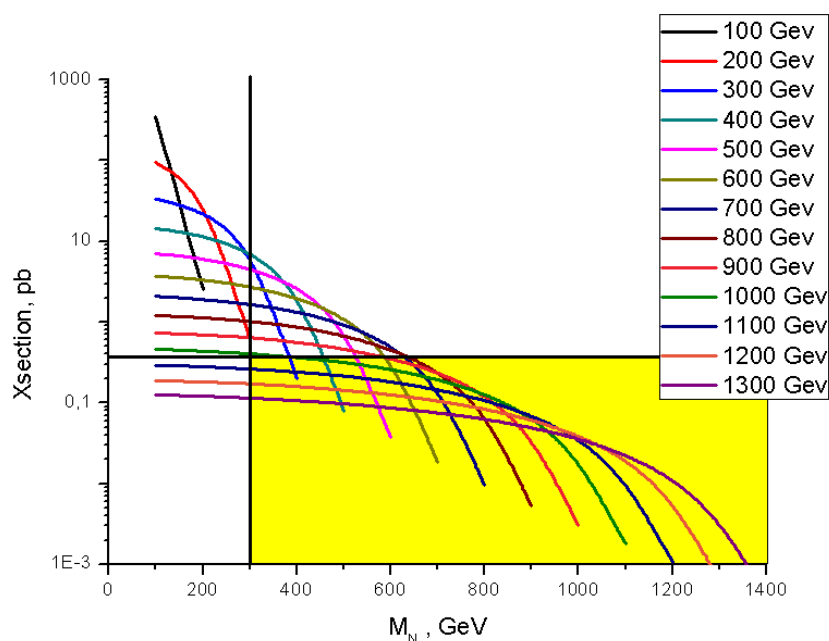


Рисунок 14 - Зависимость сечения от масс нейтрино для различных масс W-бозона.

Значимость S открытия событий, содержащих новые частицы W_R и N_e , можно определить, используя следующее соотношение: $S = 2(\sqrt{(N_s + N_b)} - \sqrt{N_b}) > 5$, где N_s и N_b есть, соответственно, число сигнальных и фоновых событий, которые удовлетворяют условиям отбора, представленным в таблице 1 для обеих переменных $Me_1e_2j_1j_2$ и $Me_1e_2j_1j_2$. Соответствующая граница возможных значений масс W_R и N_e показана на рисунке 15. Видно, что при полной светимости $L_t = 30 \text{ фб}^{-1}$, соответствующей приблизительно трем годам набора данных при низкой интенсивности, на установке CMS возможно открытие распадов N_e и W_R с массами вплоть до 2,3 и 3,5 ТэВ соответственно.

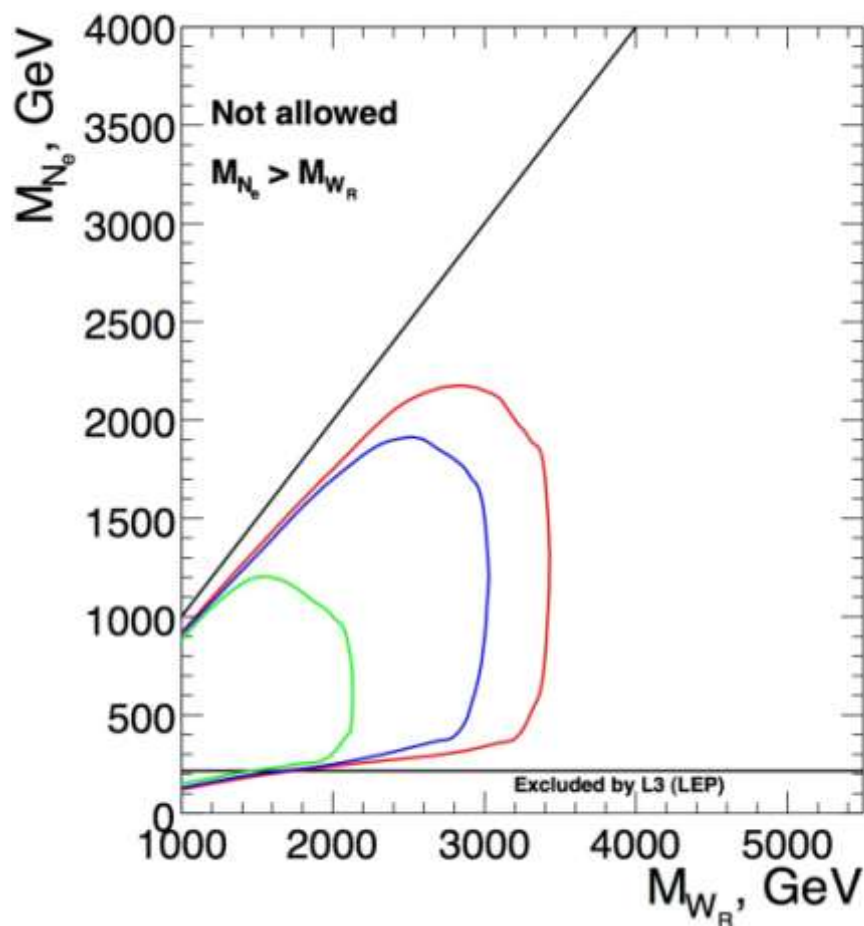


Рисунок 15 - Границы возможных значений масс W_R и майорановского нейтрино N_e для разной интегральной светимости БАК.

Неопределенности в оценках уровня фона достаточно малы ввиду того, что мал уровень самого фона. Граница возможных значений масс W_R и N_e на рисунке 15 определяется, с одной стороны, быстрым падением сечения при сближении масс W_R и N_e и, с другой стороны, падением эффективности реконструкции событий для малых масс N_e . Неточности в энергетической шкале струй порядка 3% приводят к неопределенности фона 5...10%, что уменьшает значимость на 3...10%. Верхняя граница сдвигается при этом на 0,5...3%, тогда как нижняя граница изменяется на 2...4%. Неопределенности в сечениях рождения W_R и N_e были оценены с использованием различных функций распределения плотности партонов. Изменение сечения составило при этом около 6% для всех возможных значений масс W_R и N_e .

Разработка и использование инструмента MCPLOTS

Все современные эксперименты по физике высоких энергий разрабатывают и используют пакеты программного обеспечения для математического моделирования. Необходимость появления таких пакетов была продиктована увеличением сложности экспериментальных задач и структуры экспериментальных установок. Моделирование необходимо для планирования эксперимента и интерпретации его результатов. Моделирование эксперимента в установке CMS состоит из двух основных частей: расчет взаимодействия первичных частиц и расчет отклика детектора на продукты распада первичных частиц.

Программы, которые выполняют моделирование отклика, уникальны для каждого эксперимента, поскольку учитывают именно его особенности. Программы, которые выполняют моделирование столкновения частиц взаимодействия, называются генераторами событий (генераторами Монте-Карло) и являются общими для всех типов экспериментов. Существует множество генераторов событий, которые используют разные подходы для расчета столкновения частиц. Наиболее известные и широко используемые - это Pythia 6, Pythia 8, Herwig++, Sherpa, Alpgen. Поскольку генераторы событий совместно используются всеми экспериментами и от их работы напрямую зависят результаты работы эксперимента, то становится исключительно важным и необходимым их правильная настройка и проверка результатов расчета, что особенно существенно в свете обработки данных установки CMS.

Для того, чтобы выполнить задачи настройки и проверки генераторов событий, был разработан новый инструмент под названием MCPLOTS. Инструмент представляет собой каталог графиков, сравнивающих результаты работы генераторов событий с большим множеством доступных экспериментальных данных, базу данных результатов экспериментов и моделирования и программное обеспечение для запуска генераторов событий и их проверки. Доступ к каталогу реализован в виде веб-сайта <http://mcplots.cern.ch>. Сайт содержит меню, организованное по процессам и наблюдаемым величинам. После выбора наблюдаемой величины можно просмотреть рисунки, где сравниваются результаты работы различных генераторов событий с экспериментальными данными. Для удобства использования инструмента MCPLOTS под рисунком находятся ссылки на соответствующие управляющие файлы для генераторов

событий и ссылки на экспериментальные данные. Это позволяет пользователям каталога легко воспроизвести результаты, представленные на сайте.

Модернизация электромагнитного калориметра ECAL

В 2011 г. была проведена модернизация экспериментальной установки для исследования процессов восстановления прозрачности кристаллов, облученных протонными пучками до уровня доз, соответствующих радиационным условиям на БАК. Модернизированная экспериментальная установка, которая располагается на канале Н4 экспериментального зала ЦЕРНа, представлена на рисунке 16.



Рисунок 16 - Модернизированная установка для исследования радиационных свойств кристаллов, облученных на канале Н4.

Внутреннее устройство матрицы показано на рисунке 17. Конструкция обеспечивает доступ к каждому каналу независимо, что позволяет проводить измерения с различными комбинациями облученных и необлученных кристаллов, приемников света и электронных устройств для регистрации сигнала.

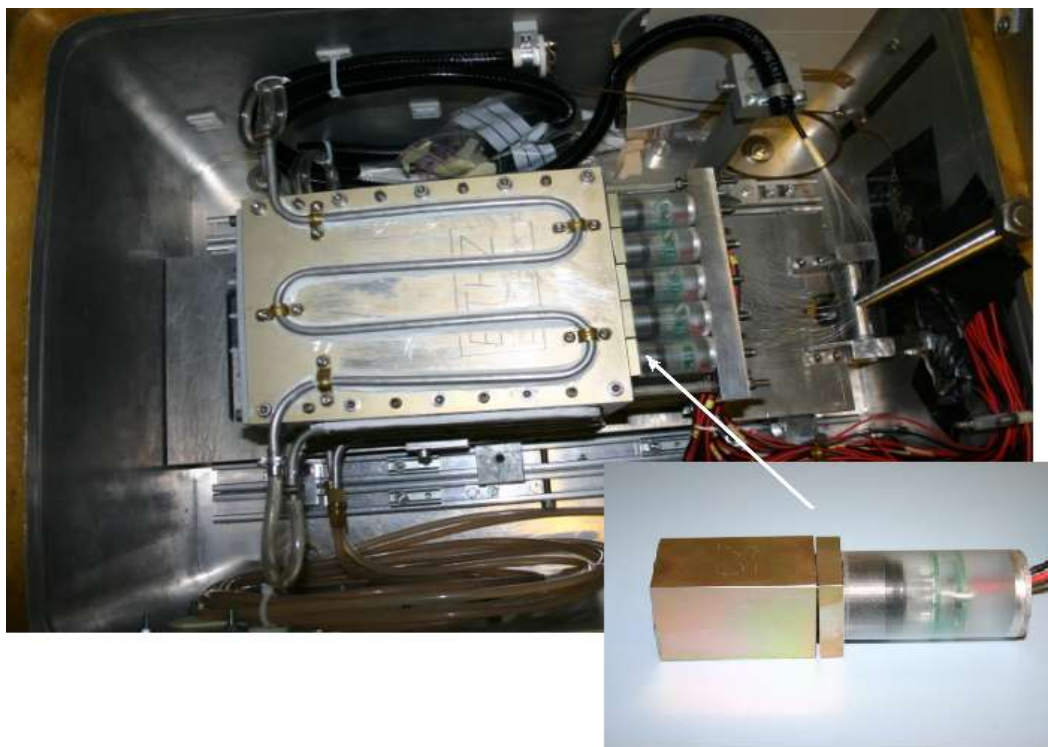


Рисунок 17 - Устройство бокса для размещения экспериментальной сборки.

В течение 2011 г. было проведено три сеанса на канале Н4 экспериментального комплекса. Исследуемые кристаллы в количестве 31 шт. предварительно облучались пучками протонов на ускорителях SPS в ЦЕРНе и ЕТН в Цюрихе (энергия 24 ГэВ, поток частиц 10^{10} протон/см²). Дозы облучения изменялись в широких пределах вплоть до 50% от дозы за 10 лет работы БАК. Далее с данными кристаллами проводились исследования по влиянию различных способов светового (350...750 нм) и термического (30...100°С) воздействия на восстановление их прозрачности.

В результате исследований было установлено влияние различных способов воздействия на кристаллы для ускорения восстановления их оптической прозрачности (рисунок 18) и показано, что применение теплового и оптического отжига одновременно позволяет значительно ускорить восстановление прозрачности кристаллов даже при невысоких температурах порядка 40...50°С. Обработка результатов проведенных испытаний показала, что существует реальная возможность ускорить восстановление оптической прозрачности кристаллов электромагнитного калориметра в процессе его работы.

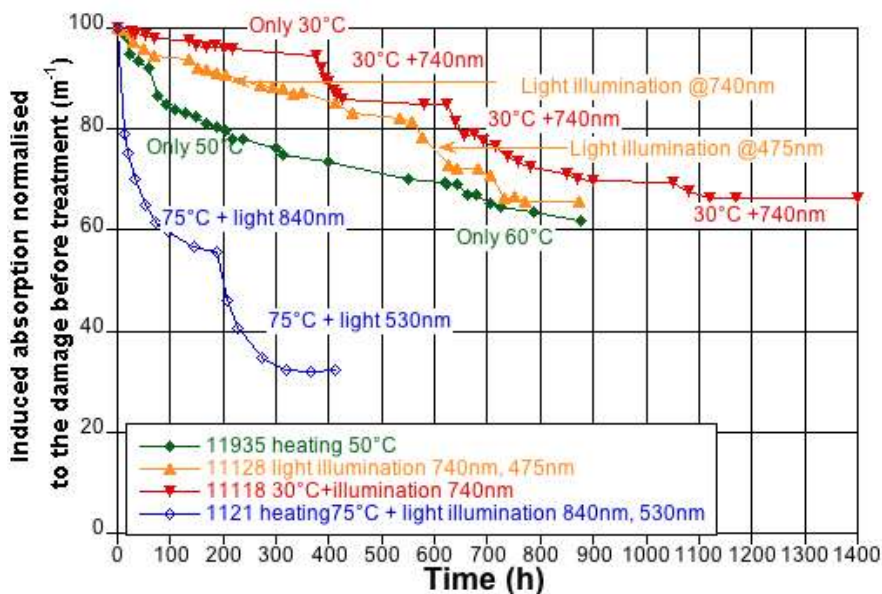


Рисунок 18 – Влияние различных способов воздействия на кристалл для восстановления его оптической прозрачности после облучения протонами.

Контроль работы детекторных систем и качества данных

Группа ECAL DPG (Detector Performance Group – группа характеристик детектора ECAL) ответственна за работу электромагнитного калориметра CMS. В задачи группы входит разработка, оптимизация и поддержка аппаратной части калориметра и соответствующего программного обеспечения. Участие ИЯИ РАН заключается в поддержке одного из модулей программного обеспечения (распаковщик первичных данных) для первичной обработки данных, поступающих с калориметра. Эти данные с калориметра ECAL поступают в так называемом «сыром» формате и требуют распаковки, контроля целостности и нормировки для последующего использования.

Контроль целостности поступающих данных необходим для того, чтобы избежать использования некорректных данных в случае аппаратных проблем электроники детектора. Одной из таких проблем, обнаруженных в этом году, была потеря синхронизации данных в некоторых сеансах работы детектора. Калориметр состоит из нескольких модулей и при каждом столкновении из каждого модуля поступает отдельный блок данных, который маркируется в соответствии с номером столкновения. Далее при сборе информации блоки, соответствующие одному и тому же номеру столкновения, группируются в одно событие. При потере синхронизации блок получает случайный номер, и событие оказывается неполным. Проблема осложняется тем, что в

последующем событиях синхронизация не восстанавливается (рисунок 19) и требуется ручной сброс электроники калориметра для восстановления работы. Поэтому, чтобы предотвратить набор некорректных данных, программный код распаковщика был модифицирован таким образом, чтобы автоматически прерывать сеанс работы детектора, как только пришло первое событие со сбоем синхронизации. Таким образом, была улучшена эффективность набора данных — разница между доставленными и отобранными данными. В частности, были решены проблемы, связанные с обработкой некорректных пакетов данных (с нарушенной синхронизацией):

- корректно обработаны события с пометкой "de-sync" в блоках FED;
- исправлены ошибки TT31 в блоке FED 601;
- добавлен новый код в блок EventFilter/EcalRawToDigi для очередного выпуска CMSSW;
- исправлены исключения InvalidDetId распаковщика ECAL.

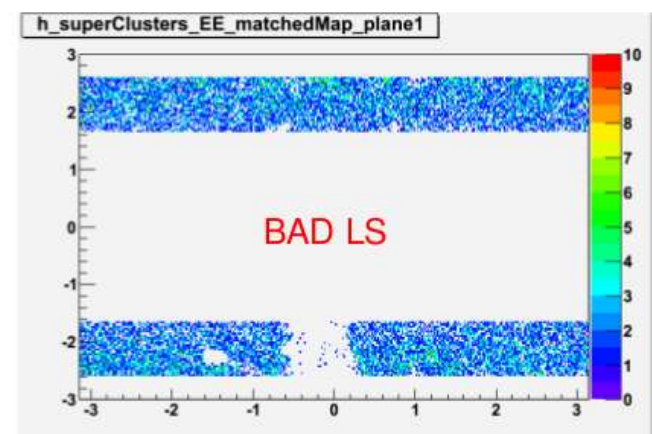
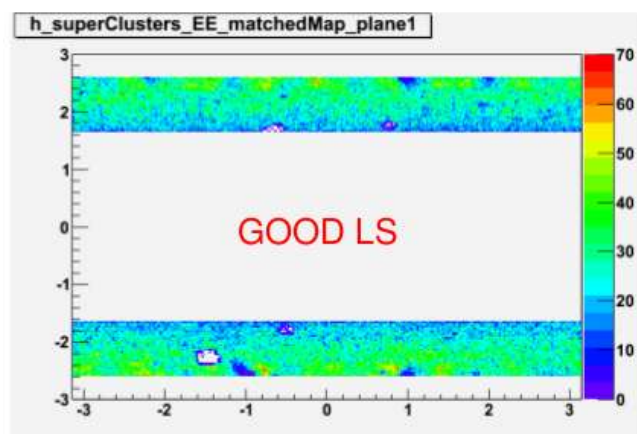
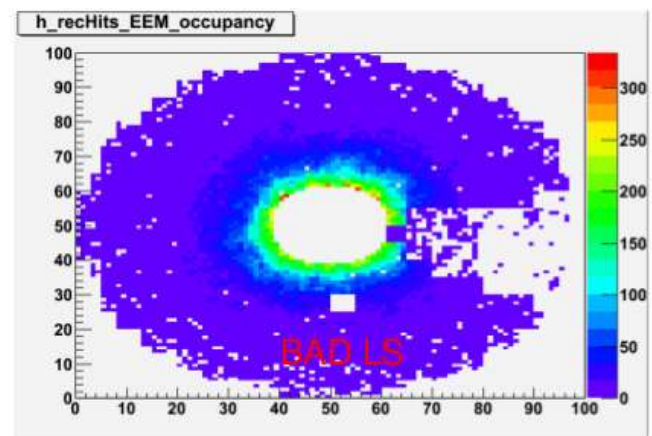
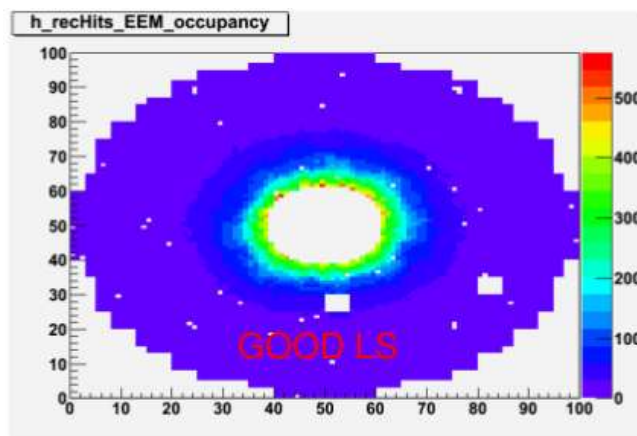


Рисунок 19 - Распределение загрузки ячеек электромагнитного калориметра в двух последовательных частях сеанса 146511 работы детектора CMS. Сбой синхронизации привел к отсутствию данных одного из модулей детектора (рисунки справа).

Калибровка адронного калориметра HCAL

Одной из основных задач, связанных с участием ИЯИ РАН в работе детектора CMS, является обеспечение безотказного функционирования адронного калориметра HCAL, который является поддетектором CMS. В связи с этим выполнялись работы по тематике группы DQM (Data Quality Monitor – контроль качества данных), обеспечивающей детальное слежение за работой отдельных компонентов HCAL.

Важнейшей задачей, связанной с правильной работой HCAL, является его калибровка. Она может быть выполнена при помощи изолированных треков от заряженных частиц, которые после рождения проходят через трековую часть установки, где с хорошей точностью определяются импульсы этих частиц. Далее эти частицы должны проходить без заметных потерь энергии через электромагнитный калориметр, расположенный непосредственно перед адронным калориметром, и выделять свою энергию в HCAL в виде адронных ливней. Из распределения отношения этой энергии к импульсу заряженной частицы (E/p) можно определить коррекцию к величине энергии, выделенной в HCAL. При этом подразумевается, что импульс частиц определяется с хорошей точностью. В качестве таких частиц используются заряженные пионы. Треки от пионов должны быть изолированными, т.е. в некотором конусе вдоль направления движения пиона не должны присутствовать треки других заряженных частиц с импульсами выше некоторого порога. В ECAL также не должно быть заметного энерговыделения в этом же конусе. Этим проверяются так называемые заряженная и нейтральная изоляции.

Вместе с тем, в рассматриваемом конусе могут проходить нейтральные частицы, которые могут не выделить заметной энергии в ECAL и давать адронные ливни в HCAL, например, нейтроны, нейтральные каоны и т.д. Критерий изолированности окажется нечувствительным к таким частицам, они могут вносить погрешность в определение энерговыделения в HCAL от изолированных треков.

Кроме того, в HCAL, в области, используемой для калибровки, могут присутствовать энерговыделения от заряженных треков, которые либо не были реконструированы в трекере, либо прошли мимо изоляционного конуса (косые треки). Подобные треки также

могут вносить погрешность в определение энергосодержания в HCAL от изолированных треков.

Группой ИЯИ РАН была выполнена работа по оценке величины подобной погрешности. Такая оценка может быть сделана, в частности, из изучения смоделированных событий, где наряду с реконструированной информацией сохранялась первичная информация о смоделированном процессе, которая позволяет оценить присутствие фоновой энергии в составе реконструированной энергии. Другим методом оценки может быть оценка непосредственно из экспериментальных данных. Наряду с заряженными пионами образуются нейтральные пионы, распадающиеся на два фотона, которые, в основном, неразделимы на уровне электромагнитного калориметра. Поэтому, если отбирать в ECAL изолированные электромагнитные кластеры, через которые не проходят заряженные треки, то в проекции такого кластера в HCAL не должно быть никакого энергосодержания, т.к. фотоны от распадов нейтральных пионов при выбранном импульсе калибрующих частиц не могут пройти через ECAL. В HCAL могут присутствовать только энергосодержания от фоновых процессов.

Предварительный результат показывает, что смещение среднего значения в распределении E/p , связанного с возможным фоном от нейтральных и заряженных частиц, имеет величину порядка 1,5%. В качестве иллюстрации на рисунках 20 и 21 приведены распределения отношений E/p для всех событий, отобранных для калибровки (рисунок 20), и для событий, в которых нет энергосодержания от фоновых процессов (рисунок 21). Из сравнения этих распределений видно, что в результате присутствия фоновой энергии среднее в распределении E/p смещено в область больших значений примерно на 1,5%.

Использовалось полное моделирование КХД-событий с импульсом в диапазоне 80...120 ГэВ с суммарным количеством смоделированных событий $9,2 \times 10^6$. Для калибровки отбираются изолированные треки с импульсом 40...60 ГэВ. Данная работа будет продолжена, т.к. моделирование подобных процессов вызывает технические сложности, связанные со значительным размером событий и необходимостью хранить исходную смоделированную информацию наряду с реконструированной.

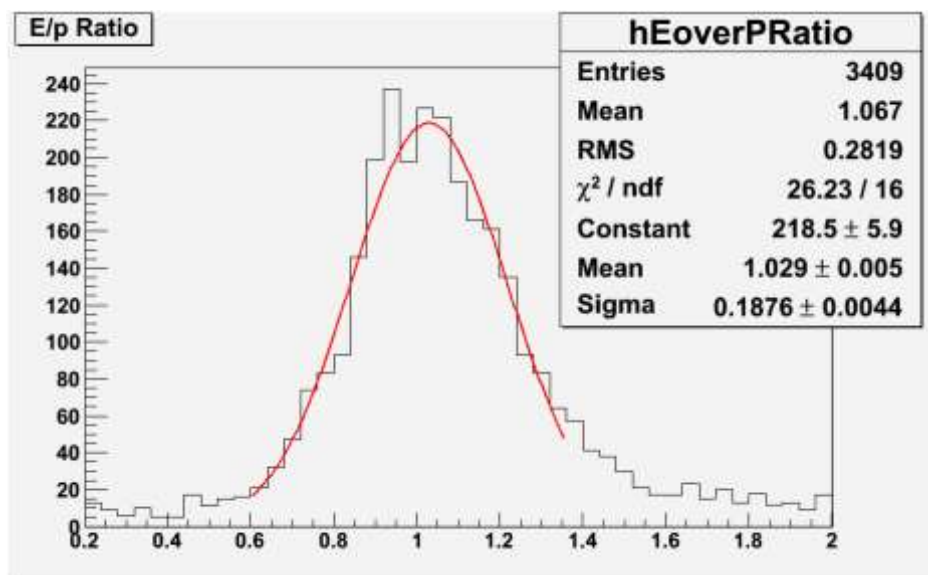


Рисунок 20 - Распределение E/p для всех событий, отобранных для калибровки.

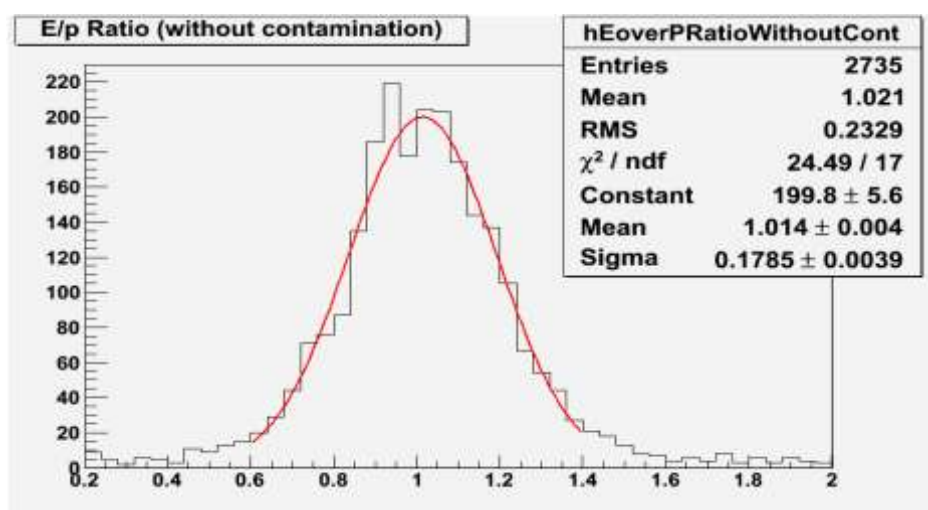


Рисунок 21 - Распределение E/p для событий, в которых отсутствует фоновая энергия.

Ведется разработка дополнительных модулей системы DQM (Data Quality Monitor – контроль качества данных) для обнаружения и контроля “горячих” ячеек в адронном калориметре. Под этим подразумевается своевременное обнаружение и мониторинг изолированных ячеек адронного калориметра, энергосодержание в которых существенно превышает ожидаемое. Первая версия модулей уже входит в систему DQM.

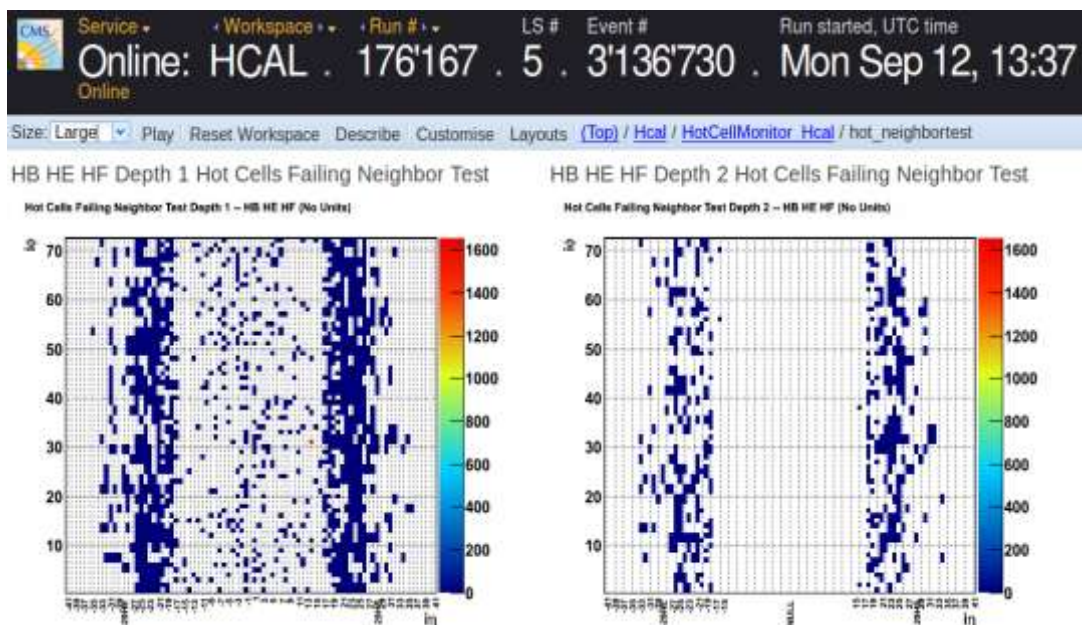


Рисунок 22 - Иллюстрация работы обновленной системы DQM по обнаружению горячих ячеек HCAL.

На рисунке 22 показан пример работы обновленной системы DQM по обнаружению горячих ячеек. Дополнительно ведется подготовка для работы системы при увеличенной светимости, планируемой в следующем году.

В 2011 году сотрудниками ИЯИ РАН был также выполнен ряд работ по анализу данных с калориметра CASTOR. Для получения интеркалибровочных коэффициентов отдельных секций калориметра выбирались данные по т. н. сплэш-мюонам. Специальный режим работы БАК позволял получать пучки, состоящие только из мюонов, сигналы от которых и использовались для калибровки. Были проанализированы данные калориметра за 2010-2011 гг. Получены коэффициенты калибровки, а также рассмотрено влияние магнитного поля на отклик детектора. Результаты работы представлены на собрании группы CASTOR. В данный момент ведется подготовка калориметра к работе с пучками тяжелых ионов, набор статистики по которым будет произведен в ноябре – декабре 2011 года. В 2012 году планируется проводить анализ полученных данных в рамках поиска событий типа «кентавр».

Модернизация адронного калориметра HCAL

В 2009 г. коллаборацией CMS было принято решение о начале работ по модернизации адронного калориметра HCAL детектора CMS для работы в условиях высокой светимости ускорителя SLHC ($3 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$). Одной из важнейших задач этой

модернизации является разработка новых фотоприемников для HCAL и замена ранее установленных фотоприемников - гибридных фотодиодов HPD (Hybrid Photo Diodes) - на микропиксельные лавинные фотодиоды (МЛФД), также известные как кремниевые фотоумножители.

Причины, по которым необходима такая модернизация, заключаются в следующем:

- оказалось, что при напряженности магнитного поля порядка 1...2 Тл в гибридных фотодиодах возникают электрические разряды, приводящие к увеличению шума фотодиодов и выходу их из строя;
- в условиях высокой светимости калориметр "перегружен" сигналами от частиц с низкими энергиями (т.н. эффект наложений или "pile up"). Для лучшего выделения частиц с высокими энергиями в баррельной и торцевой частях HCAL было предложено увеличить продольную гранулярность калориметра. Считывание сигналов с разных слоев калориметра должно также помочь компенсировать эффект радиационных повреждений в сцинтилляторах и спектросмещающих волокнах.

МЛФД были выбраны из-за их высокой квантовой эффективности, нечувствительности к магнитному полю, компактности и сравнительно низкой стоимости. Однако тесты коммерчески доступных МЛФД (фирм Hamamatsu, Zecotek и др.), проведенные в 2010 г., показали, что не все их параметры удовлетворяют условиям работы в HCAL и что МЛФД нуждаются в существенной доработке (рисунок 23). Была принята программа по улучшению параметров МЛФД, которая установила основные цели разработки:

- уменьшение времени восстановления ячеек МЛФД до 5...15 нс;
- увеличение динамического диапазона МЛФД до 10000...15000 ячеек/мм²;
- сохранение высокой квантовой эффективности МЛФД (больше 15%) при высокой плотности ячеек (10000...15000 ячеек/мм²);
- улучшение радиационной стойкости МЛФД (устойчивая работа в потоках нейтронов вплоть до 3×10^{12} н/см²);

- уменьшение чувствительности МЛФД к быстрым нейтронам (вероятность сигналов, вызванных нейтронами, должна быть меньше 10^{-4} , при пороге регистрации 25 фотоэлектронов).

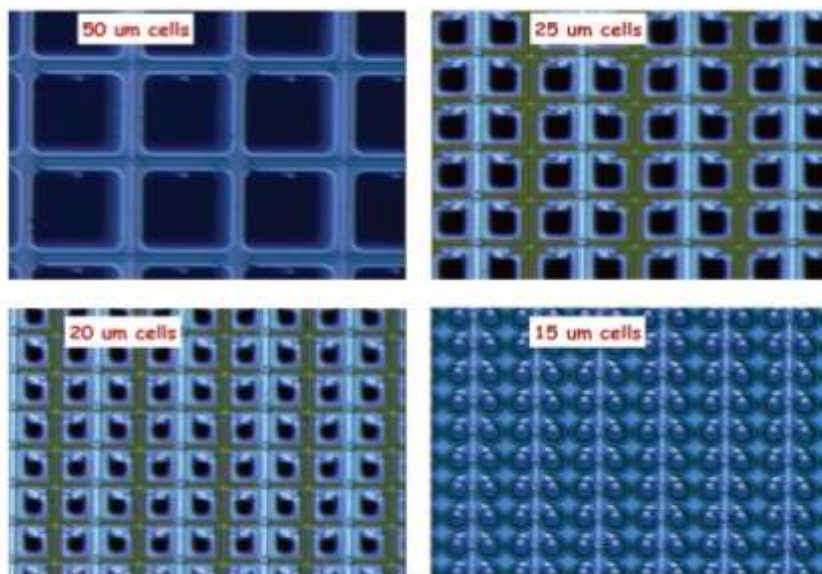


Рисунок 23 - Фотографии ячеек МЛФД фирмы Hamamatsu: коммерческие МЛФД (размер ячейки 50 и 25 микрон) и МЛФД, разработанные для HCAL (размер ячейки 20 и 15 микрон).

Участие группы ИЯИ РАН в модернизации HCAL в основном сконцентрировано на разработке и внедрении нового типа фотодетекторов для регистрации сцинтилляционных сигналов с адронного калориметра. Основным интерес здесь представляет замена ранее использовавшихся гибридных фотодиодов на МЛФД. Основное направление работ группы состоит в следующем:

- разработка и запуск автоматизированной установки для получения основных характеристик МЛФД, таких как спектральная чувствительность, усиление, линейность, время восстановления, радиационная стойкость и др.;
- участие в тестировании МЛФД разных фирм;
- участие в изучении радиационной стойкости приборов под действием радиационного облучения нейтронами, протонами и гамма-квантами;
- исследование чувствительности МЛФД к облучению нейтронами;
- участие в разработке электроники съема сигналов МЛФД и их последующей обработке;

– участие в тестовых измерениях адронного калориметра на пучках частиц SPS в ЦЕРНе;

– участие в анализе и обработке данных, полученных в тестовых измерениях.

Для осуществления этой программы и полноценного участия в модернизации адронного калориметра требуется финансирование в течение 2012-2014 гг. в размере около 7 млн. руб.

В 2011 году группа сотрудников ИЯИ РАН приняла активное участие в работах по исследованию новых МЛФД, разработанных фирмами Hamamatsu (Япония), Zecotek (Сингапур), FBK (Италия), NDL (Китай), КЕТЕК (Германия) в рамках программы модернизации HCAL. Были построены измерительные стенды и проведены исследования таких параметров МЛФД, как квантовая эффективность и ее зависимость от напряжения и длины волны света, время восстановления ячеек МЛФД, коэффициент оптической связи между ячейками МЛФД, шум-фактор и его зависимость от напряжения смещения. Некоторые из результатов измерений параметров МЛФД Hamamatsu, разработанных для HCAL, показаны на рисунках 24 - 25.

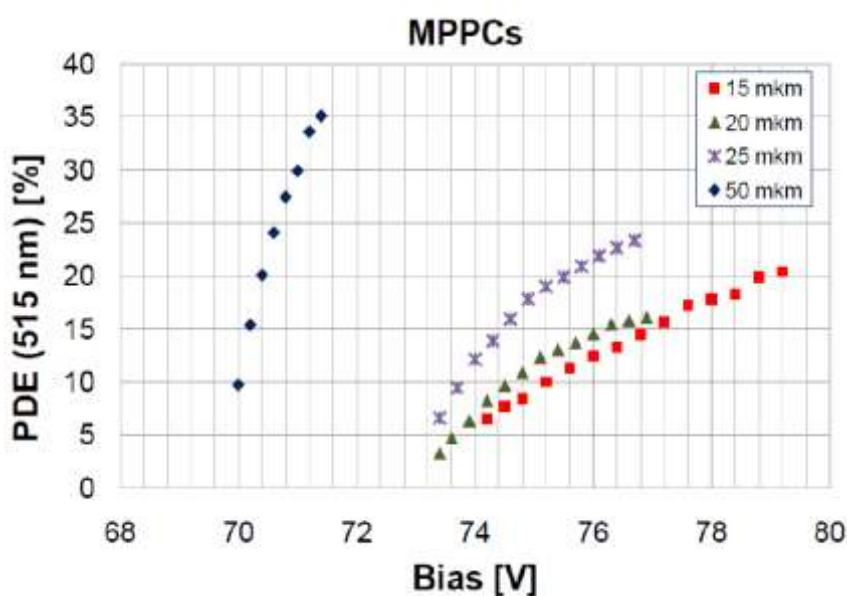


Рисунок 24 - Квантовая эффективность МЛФД фирмы Hamamatsu, измеренная для зеленого света, в зависимости от напряжения смещения.

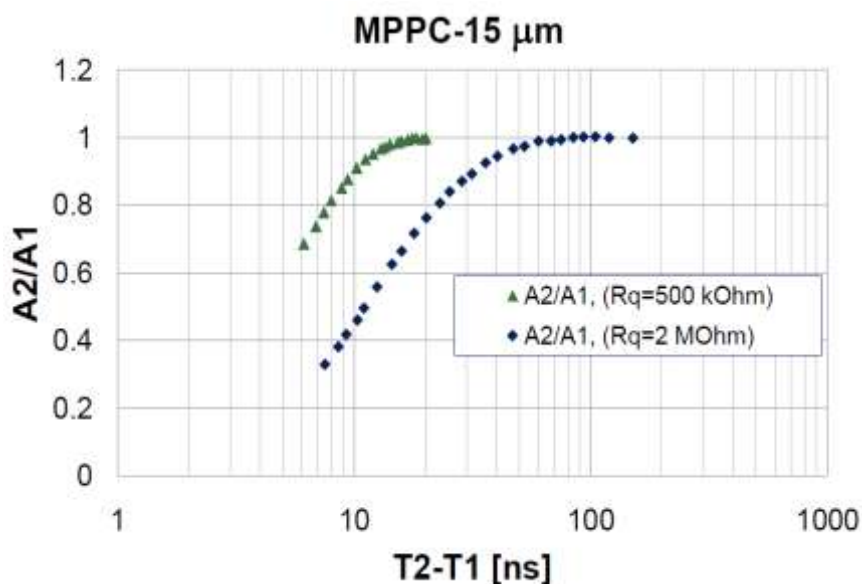


Рисунок 25 - Восстановление ячеек МЛФД фирмы Hamamatsu при разных гасящих сопротивлениях.

Был создан специальный стенд и проведены исследования радиационной стойкости различных МЛФД при их облучении быстрыми нейтронами с энергией 1 МэВ на установке IRRAD-6 в ЦЕРНе. Зависимость амплитуды сигналов светодиода, измеренных разными МЛФД, от дозы облучения показана на рисунке 26.

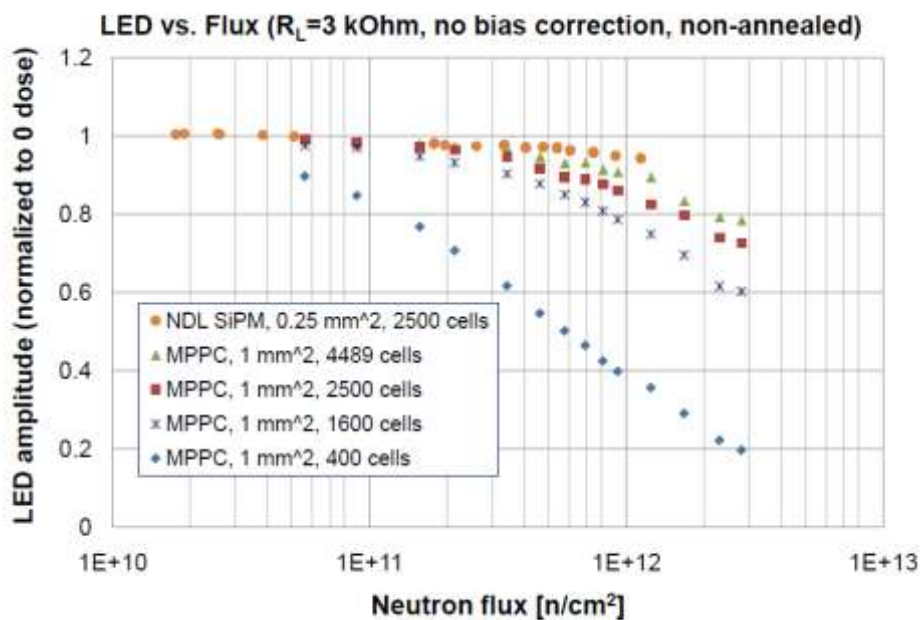


Рисунок 26 - Зависимость амплитуды сигналов светодиода, измеренных разными МЛФД, от дозы облучения.

Из лучших МЛФД, разработанных фирмами Hamamatsu, Zecotek, FBK и КЕТЕК, были изготовлены матрицы МЛФД (рисунок 27) и проведены их испытания в составе модуля адронного калориметра на тестовых пучках ускорителя SPS в ЦЕРНе. Группа ИЯИ РАН приняла активное участие в подготовке и проведении этих тестов.



Рисунок 27 - Матрица МЛФД фирмы КЕТЕК, использовавшаяся в тестах на пучках пионов ускорителя SPS.

Получены данные по облучению детектора электронами, пионами и мюонами при различных энергиях. В процессе проведения облучения было необходимо контролировать параметры тестового стенда, такие как температура в рабочей области, низкое и высокое напряжения, параметры пучка, а также менять положение стенда, изменять конфигурацию тестируемого пучка, включать на запись данные с электроники, контролировать качество получаемых данных. Эти обязанности возложены на дежурных, находящихся на смене. Сотрудники ИЯИ РАН в летнем и осеннем сеансах 2011 года отдежурили 24 смены на тестовых пучках. Проводится анализ полученных в тестовом сеансе экспериментальных данных.

Одной из основных целей проведения тестового облучения баррельной части адронного калориметра было проведение измерений радиационной устойчивости новых МЛФД, так как было замечено, что после двух лет работы на CMS многие HPD, установленные там, начали заметно шуметь из-за облучения различным ионизирующим излучением. Это сильно уменьшило разрешающую способность адронного калориметра,

что создает серьезную проблему для нормального функционирования детектора в будущем. Именно поэтому измерению радиационной стойкости приборов уделялось особое внимание. Исследования проводились с тремя идентичными по характеристикам МЛФД, первый из которых подвергался предварительному облучению со светимостью 9 аб^{-1} , что соответствует троекратной планируемой светимости коллайдера SLHC, второй - $4,5 \text{ аб}^{-1}$, а третий МЛФД использовался без предварительного облучения. На рисунках 28 и 29 представлены полученные данные для этих трех приборов при температурах 5 и 20°C соответственно. Основной характеристикой МЛФД является отношение сигнал/шум, которое можно оценить, взяв наиболее вероятные значения распределений для сигнала и шума. Как видно из рисунков, несмотря на высокую дозу облучения, способность МЛФД реагировать на фотоны уменьшилась незначительно. Другой важной характеристикой для калибровки детектора и определения энергии частиц, от которой напрямую зависит разрешение детектора, является дисперсия распределений, показанных на рисунках 28 и 29. Этот параметр, безусловно, увеличивается по мере радиационной деградации модулей МЛФД, тем не менее, даже с облученными модулями МЛФД адронный калориметр способен сохранять работоспособность. Кроме того, как и ожидалось, при температуре 5°C дисперсия немного меньше, чем при 20°C .

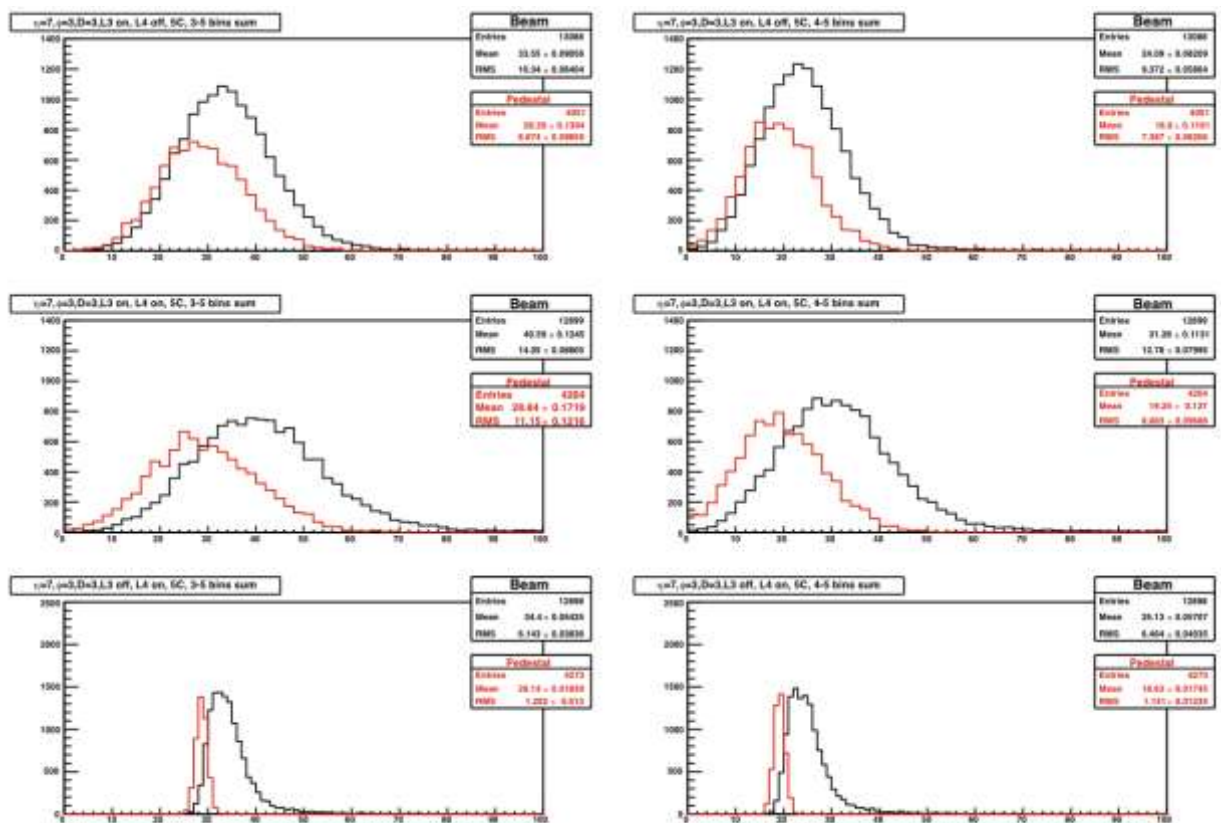


Рисунок 28 – Распределение событий в зависимости от суммы заряда (слева – два бина, справа – три) для сигнала (черная кривая) и шума (красная кривая) для разной светимости облучения МЛФД (9 аб^{-1} - верхний ряд; $4,5 \text{ аб}^{-1}$ - средний ряд; необлученный модуль – нижний ряд) при температуре 5°C .

Полученные результаты позволяют сделать предварительный вывод о том, что замена HPD на МЛФД позволит в будущем избежать проблем, связанных с радиационным старением фотоприемников, и сохранять высокие характеристики адронного калориметра на протяжении всего периода работы коллайдера БАК. Работа по обработке данных, полученных в процессе тестовых сеансов, продолжается.

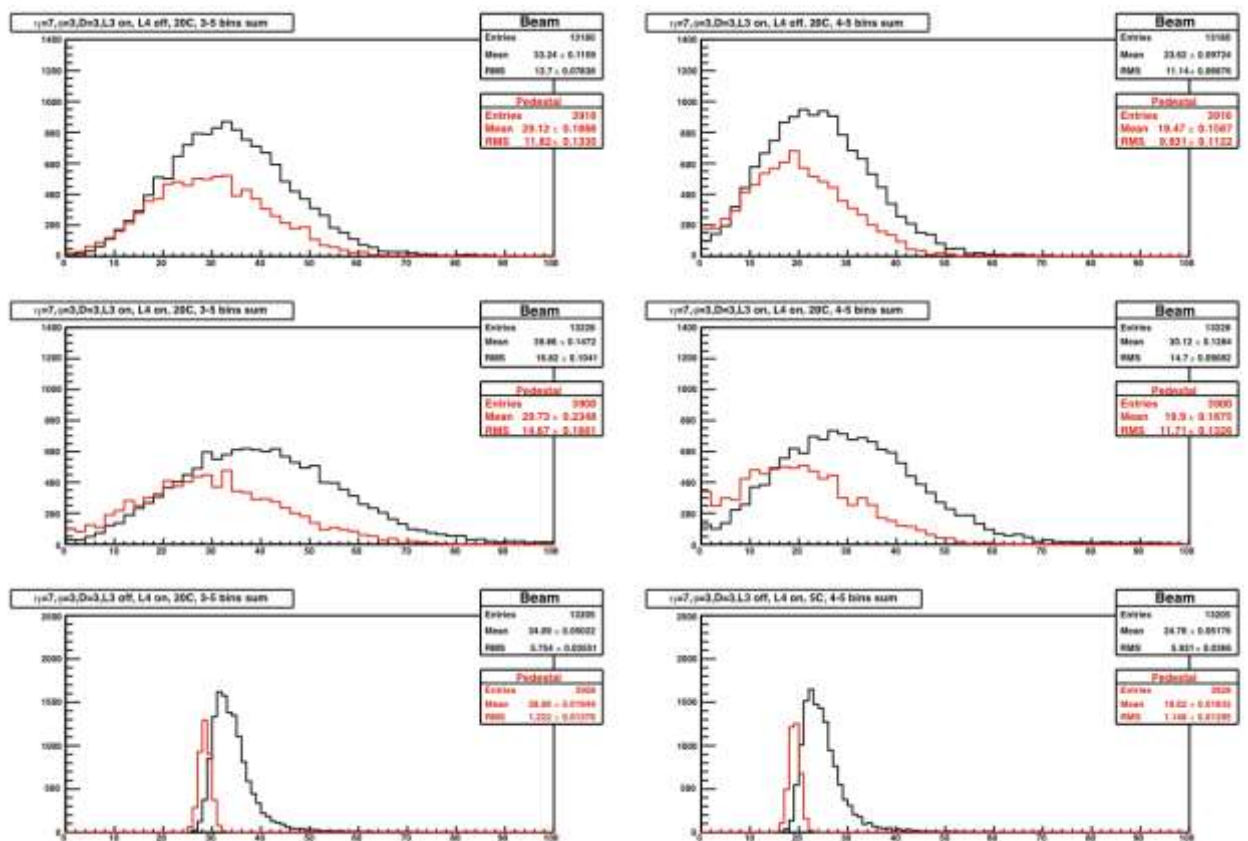


Рисунок 16 - Распределение событий в зависимости от суммы заряда (слева – два бина, справа – три) для сигнала (черная кривая) и шума (красная кривая) для разной светимости облучения МЛФД (9 аб^{-1} - верхний ряд; $4,5 \text{ аб}^{-1}$ - средний ряд; необлученный модуль – нижний ряд) при температуре 20°C .

Были также выполнены работы по созданию программного обеспечения для стенда по изучению характеристик новых образцов APD (Avalanche Photo Diode – лавинных фотодиодов), планируемых для установки в HCAL. Разработка программного обеспечения для сбора и обработки данных измерений характеристик APD должна обеспечить максимальную автоматизацию процесса измерения для достижения высокой скорости паспортизации и отбраковки образцов фотосенсоров ввиду их большого количества. Блок-схема стенда и его основные функциональные характеристики изображены на рисунке 30, пример характеристик фотоприемника, считанных с помощью разработанной программы, показан на рисунке 31.

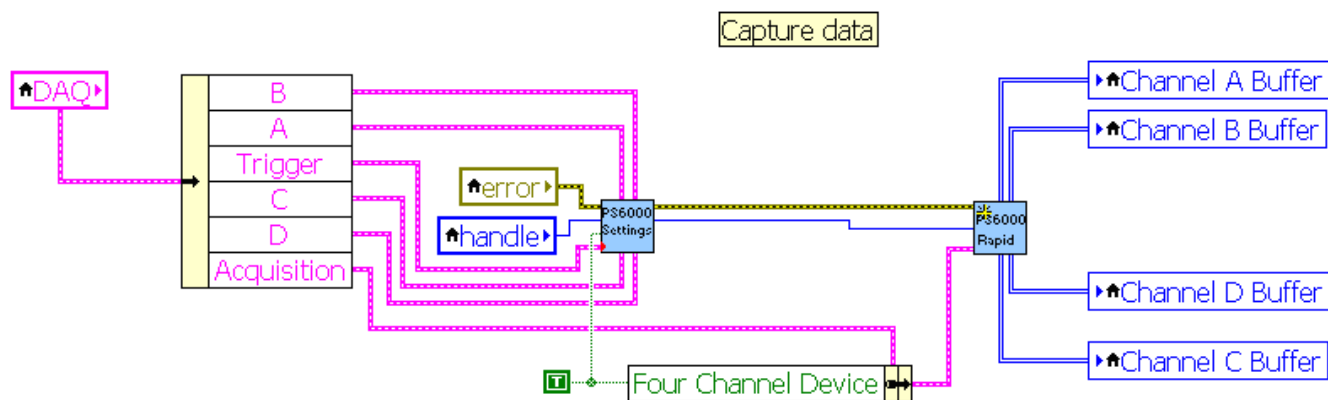


Рисунок 30 - Блок-схема стенда по измерению основных функциональных характеристик образцов фотоприемников для модернизации HCAL.

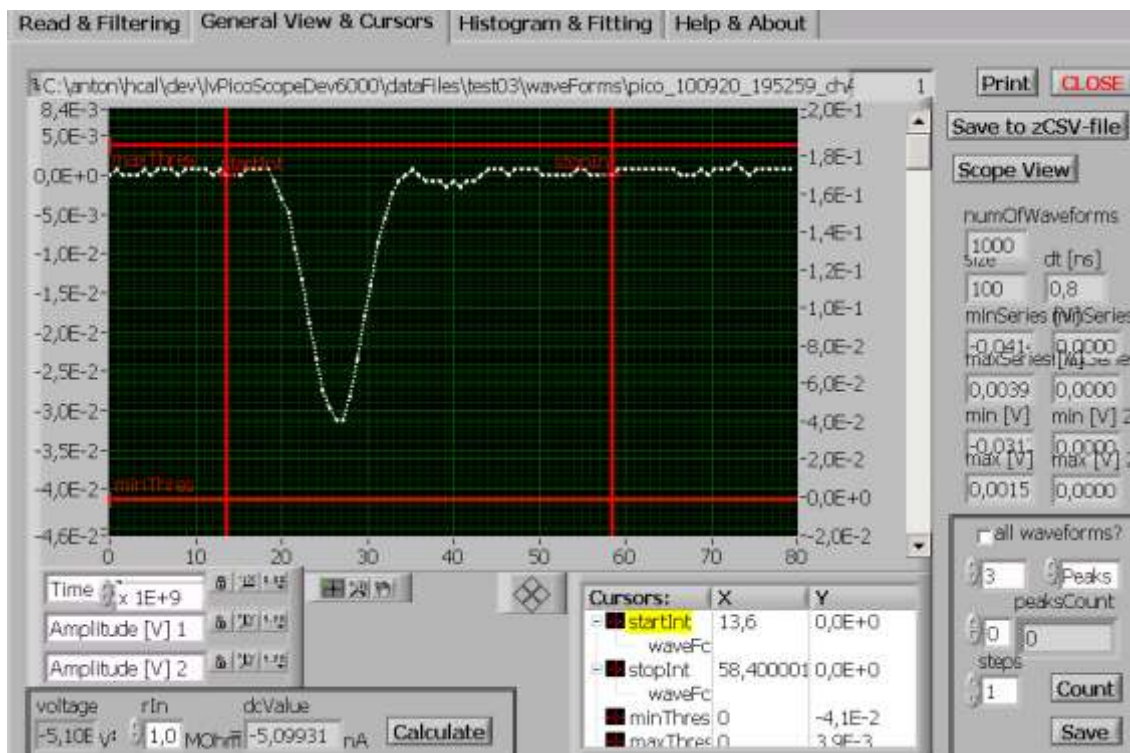


Рисунок 31 - Форма импульса фотоприемника, считанного с помощью программы по измерению основных функциональных характеристик.

Планы работ на 2012 г.

План работ ИЯИ РАН на 2012 г. предусматривает:

- вклад в физическую программу CMS: участие группы ИЯИ РАН в моделировании и анализе экспериментальных данных БАК с целью поиска нового калибровочного правого бозона W_R и майорановского нейтрино, публикация статьи в реферируемом журнале;

- участие в работе групп электромагнитного и адронного калориметров установки CMS: дальнейшее развитие алгоритмов и методов отбора и реконструкции энергии и координат частиц в детекторах, улучшение методов и точности калибровки детекторов, мониторинг стабильности работы в течение времени набора данных;

- участие в модернизации электромагнитного и адронного калориметров установки CMS: проектировка и изготовление стенда для измерения характеристик радиационного повреждения новых образцов кристаллов для электромагнитного калориметра, проектировка стенда для измерения различных типов образцов фотоприемников для адронного калориметра, участие в совещаниях и рабочих собраниях коллаборации CMS;

- участие в сервисных работах по качественному набору данных на установке CMS: дежурство в сменах, участие в обновлении и усовершенствовании программы сбора данных и реконструкции событий.

План работ по модернизации ECAL в 2012 г. включает в себя:

- создание модели электромагнитного калориметра для изучения влияния стимулированного восстановления оптической прозрачности кристаллов на характеристики детектора;

- разработку технического обоснования для применения стимулированного восстановления оптической прозрачности кристаллов на торцевом электромагнитном калориметре CMS.

План работ по модернизации HCAL в 2012 г. включает в себя:

- исследования базовых характеристик новых образцов МЛФД фирм Hamamatsu, KETEK, Zecotek, ФБК и NDL, обладающих улучшенными параметрами: квантовой эффективности, шумов, времени восстановления ячеек, быстродействия, динамического диапазона, температурной чувствительности;

- дополнительные испытания новых МЛФД на пучках протонов, нейтронов и гамма-квантов, требующие существенного улучшения измерительных стендов и их программного обеспечения, что планируется осуществить силами группы ИЯИ РАН;

- проведение тестов модуля HCAL, оснащенного матрицами МЛФД, разработанными в рамках программы модернизации CMS HCAL, на тестовых пучках SPS летом и осенью 2012 г.;

- анализ данных, поступающих с установки CMS, с целью изучения поведения характеристик в реальных условиях эксперимента установленных в 2009 г. 144 МЛФД, изготовленных фирмами Hamamatsu и Zecotek.

ВЫВОДЫ

Работы, предусмотренные очередным этапом участия ИЯИ РАН 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, участием в сервисных работах на установке CMS, разработкой новых методов реконструкции и анализа событий, а также с началом работ по модернизации электромагнитного и адронного калориметров установки CMS.

В результате проделанной работы исследован потенциал 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 2011 г. группа ИЯИ РАН в сотрудничестве с группой из Университета Миннесоты (США) получила первые результаты по проверке лево-право симметричной модели на БАК. В результате анализа данных, полученных коллаборацией CMS в течение 2010-2011 гг. и соответствующих полной светимости БАК 240 пб^{-1} , были получены ограничения на массу W_R около 1700 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино 600 ГэВ. Новый нижний предел на массу правого W-бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, в 2,3 раза. Полученные результаты одобрены коллаборацией CMS к публикации в печати.

За 2009-2011 гг. детектором CMS набрано 5 фб^{-1} данных, из них $0,24 \text{ фб}^{-1}$ обработано, остальные находятся в стадии обработки. Показано хорошее соответствие между наблюдаемыми данными и предсказаниями Стандартной модели в области масс порядка 100 ГэВ. Тем не менее, наблюдается небольшое превышение числа событий в полученных данных в мюонном канале для областей масс порядка 1 ТэВ, что может являться прямым указанием на существование новой физики, связанной с открытием нейтринных осцилляций, а также позволяет надеяться на проявление в ближайшем будущем связанных с ней эффектов при энергиях БАК в ЦЕРНе.

Наряду с участием в физической программе на установке CMS, группа ИЯИ РАН в 2011 г. участвовала в сменах, обеспечивая высокую эффективность набора данных, участвовала в сервисных работах групп электромагнитного и адронного калориметров, участвовала в работах по модернизации электромагнитного и адронного калориметров и принимала активное участие в разработке и совершенствовании генераторов Монте-Карло для моделирования физических событий на установке CMS.

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

В эксперименте AEGIS – Antimatter Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy, по изучению гравитационных свойств антиматерии и спектроскопии антиводорода в ЦЕРН предполагается впервые провести измерения ускорения свободного падения свободных атомов антиводорода, а также получить данные по спектроскопии возбужденных состояний этих атомов с целью проверки СРТ-теоремы об эквивалентности свойств материи и антиматерии. Эксперимент имеет небольшую историю т.к. был одобрен комитетом SPSC ЦЕРН в начале 2009 года. Планируется провести широкомасштабные исследования в области физики позитрония, которые включают в себя поиски новой физики в распадах или реакциях позитрония. Программа этих исследований была теоретически обоснована и предложена в ИЯИ РАН.

В 2011 г. основные усилия коллаборации были сосредоточены на более детальной технической разработке основных узлов установки, проведении ряда тестовых испытаний и расчетов по методу Монте Карло основных процессов, связанных с получением большого количества атомов антиводорода и формированием суперхолодного пучка этих атомов в вакууме, а также на проведении начальных работ по монтажу установки в экспериментальном зале. Следующий этап эксперимента (2012–2014 гг.) связан с изготовлением и приобретением необходимого оборудования, началом его монтажа и сборкой основных подсистем и узлов установки, проведением первых измерений с пучками позитронов и антипротонов.

Метод исследования основывается на формировании пучка суперхолодных атомов антиводорода в реакциях перезарядки атомов позитрония в высоковозбужденных состояниях и холодных антипротонов, регистрации свободного падения пучка атомов антиводорода в гравитационном поле Земли с помощью атомного интерференционного дефлектометра в диапазоне энергий атомов антиводорода, соответствующего эффективной температуре порядка 100 мК. Мотивация для данных исследований следующая.

Известно, что большая часть вещества нашей Вселенной находится в виде материи (еще большая часть находится в неизвестном виде – это так называемая «темная материя»). Предполагается, что гравитационные свойства антиматерии в теории

гравитации Ньютона-Эйнштейна являются идентичными гравитационным свойствам материи. Это следует из CPT- теоремы, хотя квантовая теория гравитации на сегодняшний день еще не создана. А вот как будет вести себя антивещество в гравитационном поле материи (не антиматерии!)? Будет ли отличаться величина ускорения свободного падения атома водорода и атома антиводорода? Уверенно ответить на эти вопросы затруднительно.

Регистрация отличия в величинах ускорения свободного падения атома водорода и атома антиводорода было бы важнейшим открытием в фундаментальных исследованиях в области физики элементарных частиц. Отметим, что аналогичными исследованиями занимаются коллективы исследователей в США (ФНАЛ), Японии, но центр исследований в области антиматерии, безусловно, находится в ЦЕРН.

Установка AEGIS состоит из накопителя позитронов, большого сверхпроводящего магнита, создающего мощное магнитное поле для удержания холодных антипротонов, поставляемых антипротонным декселератором, и формирования холодных атомов антиводорода в реакциях перезарядки холодных антипротонов с возбужденными атомами позитрония. Установка работает при криогенных температурах порядка 100 мК и включает в себя интерференционный дефлектометр и ряд детекторов, расположенных на торце магнита для эффективной регистрации продуктов аннигиляции антиатомов при столкновениях с веществом. Метод, используемый в установке AEGIS, позволяет достичь уникальной чувствительности при определении величины ускорения свободного падения атомов антиводорода.

Установка AEGIS будет создаваться в ЦЕРН в течение 2012-2014 гг. коллективом, состоящим из группы более чем 50 ученых и инженеров ЦЕРН и научных институтов России, Германии, США, Франции, Италии, Чехии, Швеции и Швейцарии.

Цель первого этапа работ на данной установке (2007-2011 гг.):

- разработка методики измерения величины гравитационного ускорения свободного падения атомов антиводорода;
- разработка методики формирования атомов антиводорода;
 - разработка методики формирования направленного пучка холодных атомов антиводорода;
- разработка методики формирования холодных атомов позитрония;

- создание детекторов для регистрации гамма-квантов в кэвной области энергий с низким порогом регистрации и высоким разрешением;
- разработка большого криогенного сверхпроводящего магнита;
- разработка прецизионного теплого магнитного соленоида для накопления позитронов;
- разработка методики накопления атомов позитрония;
- разработка методики возбуждения и получения большого количества атомов позитрония в ридберговском состоянии;
- создание системы блокировки установки, позволяющей обеспечить надежную работу вакуумной и криогенной систем установки;
- определение пространственных и временных характеристик уровня фона, а также естественной радиоактивности;
- моделирование узлов установки и получение результатов.

На втором этапе проведения работ в 2012-2014 гг. планируется:

- изготовление криогенной системы;
- запуск и наладка первой очереди позитронного накопителя: высокоинтенсивного источника позитронов и ловушки позитронов;
- разработка, изготовление соленоида для позитронного накопителя
- испытание позитронного накопителя в сочетании с высокоинтенсивным источником позитронов и ловушкой позитронов;
- проведение тестовых измерений и установление возможности эффективного формирования холодных атомов позитрония в ридберговском состоянии методами двухступенчатого лазерного возбуждения.

На третьем этапе проведения работ планируется проведение промежуточных экспериментов и получение физических результатов по наиболее эффективным методам формирования холодных позитрониев в высоковозбужденных (ридберговских) состояниях и поиску редких распадов и процессов с позитронием, предложенных физиками ИЯИ РАН. Этот этап будет подробно описан в последующих отчетах по программе AEGIS. Создание полномасштабной установки, проведение тестовых измерений по набору данных и обеспечение ее нормального функционирования планируется в 2014 г.

В результате работ, проведенных на первом этапе:

- предложена схема формирования холодных атомов позитрония,

которая взята за основу в эксперименте для метода формирования атомов антиводорода;

- предложена схема формирования направленного пучка холодных атомов антиводорода, которая отмечена коллаборацией как одна из перспективных;
- проведены расчеты и на их основе выполнено конструирование прецизионного магнитного соленоида для накопителя позитронов установки AEGIS;
- предложена схема накопления позитронов;
- проведены оценки интенсивности потоков позитронов в накопителе;
- предложены эксперименты по поиску новой физики в распадах позитрония.

Результаты исследований опубликованы в ряде ведущих физических журналов.

В настоящее время AEGIS является единственной в мире установкой, предназначенной для изучения гравитационных свойств и спектроскопии антиводорода. В эксперименте AEGIS предполагается впервые в мире провести измерения ускорения свободного падения свободных атомов антиводорода и получить данные по спектроскопии возбужденных состояний этих атомов с целью проверки СРТ-теоремы об эквивалентности свойств материи и антиматерии [1-3]. Эксперимент имеет небольшую историю, так как был одобрен комитетом SPSC в ЦЕРН в начале 2009 г. Планируется провести широкомасштабные исследования в области физики позитрония, которые включают в себя поиски новой физики в распадах или реакциях позитрония [4]. Программа этих исследований была теоретически обоснована и предложена ИЯИ РАН. В 2011 г. основные усилия сотрудничества были сосредоточены на более детальной технической разработке основных узлов установки, проведении ряда тестовых испытаний и расчетов по методу Монте Карло основных процессов, связанных с получением большого количества атомов антиводорода и формированием суперхолодного пучка этих атомов в вакууме. Следующий этап эксперимента связан с созданием основных подсистем установки в 2012 г.

Метод исследования основывается на формировании пучка сверх-холодных атомов антиводорода в реакциях перезарядки атомов позитрония и холодных антипротонов и регистрации свободного падения пучка атомов антиводорода в

гравитационном поле Земли с помощью атомного интерференционного дефлектометра в диапазоне энергий атомов антиводорода соответствующего эффективной температуре порядка 100 мК. Мотивация для данных исследований следующая.

Известно, что большая часть вещества нашей Вселенной находится в виде материи (еще большая часть находится в неизвестном виде – это так называемая «темная материя»). Гравитационные свойства материи описываются в теории гравитации Ньютона-Эйнштейна. Предполагается, что гравитационные свойства антиматерии в теории Ньютона-Эйнштейна являются идентичными гравитационным свойствам материи. Это также следует из СРТ-теоремы (хотя квантовая теория гравитации на сегодняшний день еще не создана и условия применимости этой теоремы пока не ясны). А вот как будет вести себя антивещество в гравитационном поле материи (не антиматерии!)? Будет ли отличаться величина ускорения свободного падения атома водорода и атома антиводорода? Уверенно ответить на эти вопросы затруднительно.

Регистрация отличия в величинах ускорения свободного падения атома водорода и атома антиводорода было бы важнейшим открытием в фундаментальных исследованиях физики элементарных частиц. Такое открытие было бы краеугольным камнем в построении квантовой теории гравитации. Отметим, что аналогичными поисками занимаются коллективы исследователей в США (ФНАЛ), Японии и других странах. Однако, безусловно, центр исследований в области антиматерии находится в ЦЕРН.

Установка AEGIS состоит из накопителя позитронов, большого сверхпроводящего магнита, создающего мощное магнитное поле для удержания холодных антипротонов, поставляемых антипротонным декселератором, и формирования холодных атомов антиводорода в реакциях перезарядки холодных антипротонов с возбужденными атомами позитрония [1]. Установка работает при криогенных температурах порядка 100 мК и включает в себя интерференционный дефлектометр и ряд детекторов, расположенных на торце магнита для эффективной регистрации продуктов аннигиляции антиатомов при столкновениях с веществом. Метод, используемый в установке AEGIS, позволяет достичь уникальной чувствительности при определении величины ускорения свободного падения атомов антиводорода.

Установка AEGIS будет создаваться в ЦЕРН в течение 2012-2014 гг. коллективом, состоящим из группы более чем 50 ученых и инженеров ЦЕРН и научных институтов России, Германии, США, Франции, Италии, Чехии, Швеции и Швейцарии.

Задачи первого этапа работ на данной установке (2007-2011 гг.):

- разработка методики измерения величины гравитационного ускорения свободного падения атомов антиводорода;
- разработка методики формирования атомов антиводорода;
- разработка методики формирования направленного пучка холодных атомов антиводорода;
- разработка методики формирования холодных атомов позитрония;
- создание детекторов для регистрации гамма-квантов в кэвной области энергий с низким порогом регистрации и высоким разрешением;
- разработка большого криогенного сверхпроводящего магнита;
- разработка прецизионного «теплого» магнитного соленоида для накопителя позитронов;
- разработка методики накопления атомов позитрония ;
- разработка методики возбуждения и получения большого количества атомов позитрония в ридберговском состоянии;
- создание системы блокировки установки, для обеспечения надежной работы вакуумной и криогенной систем установки;
- моделирование узлов установки и получение результатов.

Запуск установки AEGIS, общий вид которой показан на рисунке 2.1, планируется в 2014 г. с набором данных в 2014-2017 гг. Основной целью эксперимента на первом этапе является получение точности измерения ускорения свободного падения атомов антиводорода на уровне порядка 1% [1]. Отметим, что прямых экспериментальных ограничений, полученных на таком уровне точности, на сегодняшний день нет.

Установка AEGIS является уникальной прежде всего потому, что в ней впервые планируется проводить синтез антивещества в больших количествах, необходимых для проведения прецизионных измерений. Экспериментальная база установки AEGIS создается интернациональной коллаборацией из сотрудников 14 лабораторий и научных институтов России, Германии, США и ряда других стран.

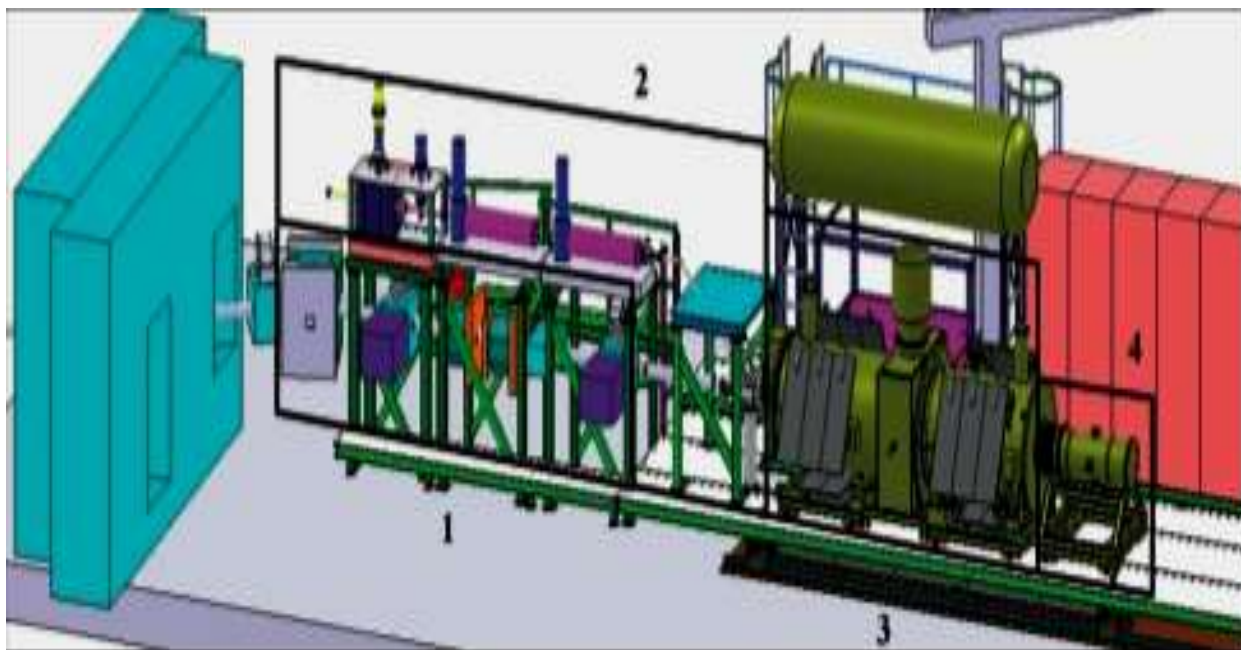


Рисунок 2.1 – Общий проектный вид установки AEGIS.

Статус эксперимента AEGIS в 2011 —2012 гг.

2011 год:

- проводка пучка холодных антипротонов в экспериментальный зал установки AEGIS (рисунок 2.2);
- начало монтажных и пусконаладочных работ в экспериментальном зале;
- формирование и разработка программы первоочередных экспериментов по измерению эффективности образования холодных позитрониев, их распределения по температуре;
- предварительная программа по измерению выхода позитрониев при возбуждении высоколежащих (ридберговских) уровней;
- разработка методов генерации ультрахолодных атомов триплетного позитрония, формирования атомов антиводорода и детектирующей аппаратуры;
- разработка методов генерации ультрахолодных пучков антиводорода и детектирующей аппаратуры;

– разработка основных подсистем детектора AEGIS: накопителя позитронов, главного сверхпроводящего соленоида и атомного дефлектометра.

2012 год:

- разработка и тестирование методов генерации ультрахолодного триплетного позитрония, формирования атомов антиводорода;
- сборка и запуск детектирующей аппаратуры;
- монтажные и пусконаладочные работы в экспериментальной зоне в ЦЕРН.

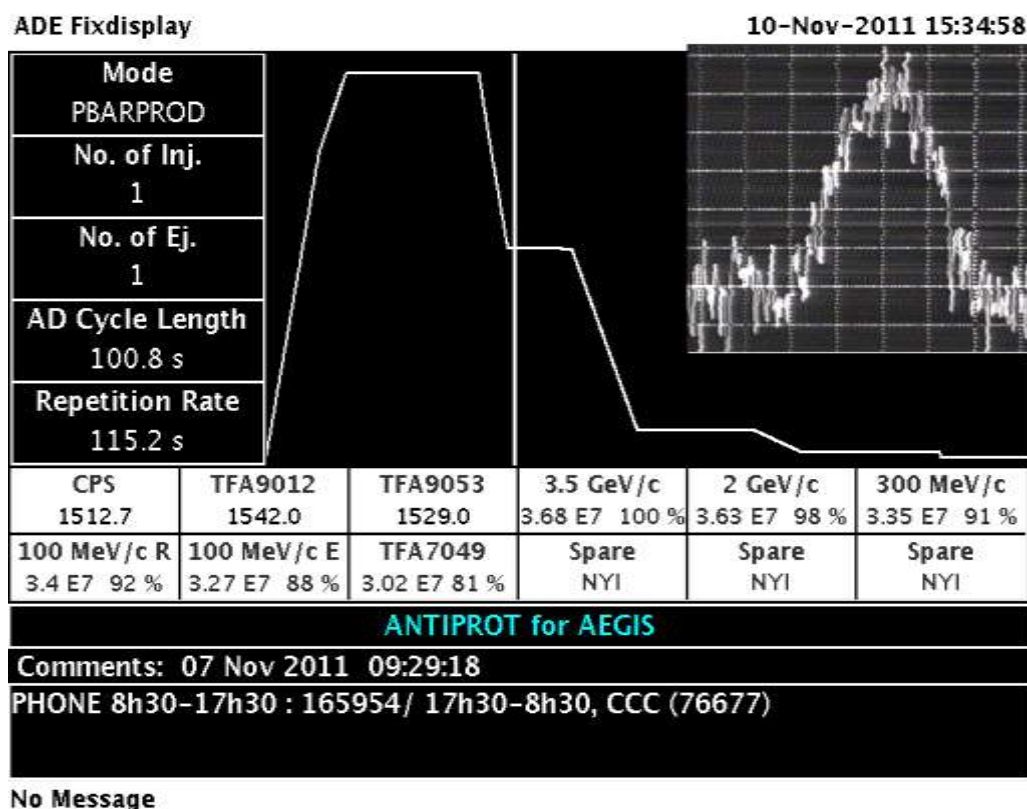


Рисунок 2.2 – Первый сгусток антипротонов в установке AEGIS, полученный в 2011 г.

Предложение ИЯИ РАН по поиску новой физики в распадах позитрония на установке AEGIS.

Поиск осцилляций ортопозитрония.

Для получения пучков атомов антиводорода необходимо синтезировать в установке большое количество атомов позитрония, который служит источником формирования холодных атомов антиводорода. Получение большого количества атомов позитрония дает возможность осуществить в эксперименте поиск редких процессов,

таких, например, как исчезновение позитрония за счет осцилляций в т.н. скрытый сектор. Этот эффект был предсказан С.Глэшоу в 1985 г. В недавней работе сотрудников ИЯИ РАН С. Демидова, Д. Горбунова и А. Токаревой был проведен подробный анализ осцилляций в реальных экспериментальных условиях с учетом столкновений позитрония с молекулами остаточного газа, стенками вакуумной камеры, наличия внешних электрических и магнитных полей и т.д. Получено выражение для вероятности осцилляций при наличии внешних возмущений. Проведен анализ осцилляций позитрония, находящегося в ридберговском состоянии в установке AEGIS и получена оценка вероятности перехода в скрытый позитроний.

Поиск двухфотонного распада ортопозитрония.

Получение большого количества атомов позитрония позволяет осуществить в эксперименте AEGIS также поиск других редких процессов, таких, например, как распад позитрония в два фотона за счет нового типа взаимодействия, нарушающего бозесимметрию и известную теорему Ландау-Янга. В недавней работе сотрудников ИЯИ РАН С.Н. Гниненко, А.Ю. Игнатьева и В.А. Матвеева, был проведен анализ такого типа взаимодействия. Получено выражение для вероятности двухфотонного распада. На основе этого анализа можно приступить к проектированию нового эксперимента по поиску этого интересного распада на установке AEGIS. Ожидаемая чувствительность эксперимента AEGIS сравнима с ожидаемой на LHC, полученной из ограничений по поиску двухфотонного распада калибровочного бозона Z и /или нового тяжелого калибровочного бозона Z .

Один из этапов эксперимента, одобренный коллаборацией AEGIS, связан с использованием большого числа атомов позитрония для получения новых «побочных» физических результатов по поиску новой физики. Мотивация и обоснование этих экспериментов были предложены сотрудниками ИЯИ РАН и включают:

- поиск легких частиц;
- поиск процессов с «исчезновением» позитрония;
- поиск пространственной анизотропии;
- поиск запрещенных распадов и ряд других процессов.

В случае отсутствия этих эффектов использование установки AEGIS позволит существенно улучшить верхние пределы на существование этих процессов.

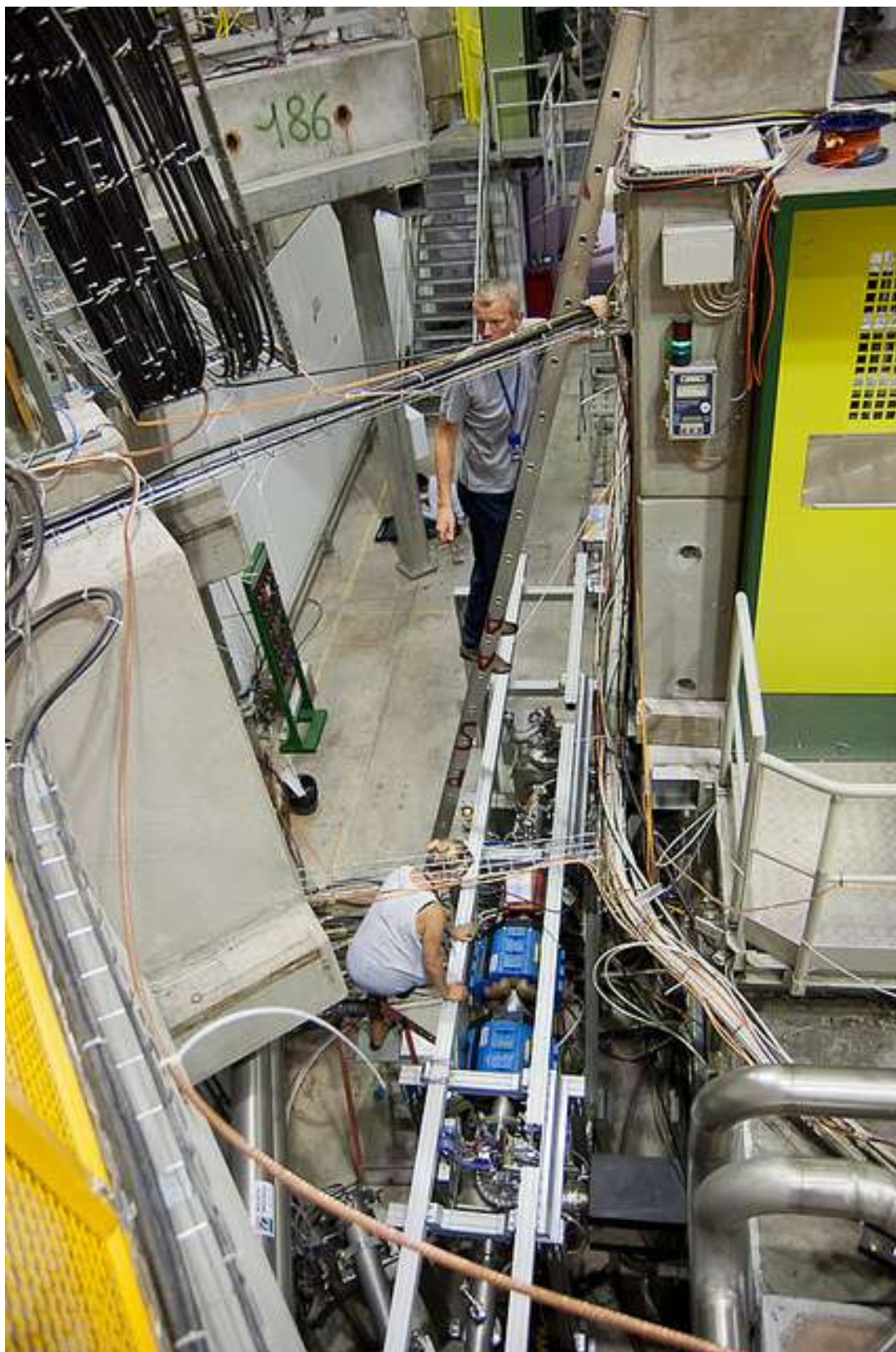


Рисунок 2.3 – Начало монтажных работ в зоне эксперимента AEGIS.

Накопитель медленных позитронов установки AEGIS.

Для получения пучков атомов антиводорода необходимо синтезировать в установке большое количество атомов позитрония, который служит источником формирования холодных атомов антиводорода. Для решения этой задачи был сконструирован при участии сотрудников ИЯИ РАН так называемый накопитель позитронов, состоящий из высокоинтенсивного радиоактивного источника позитронов, ловушки медленных позитронов и собственно накопителя, показанных на рисунке 1 (объекты фиолетового цвета). Создание накопителя выделено в отдельный подпроект создания установки AEGIS. Изготовление прецизионного соленоида накопителя осуществляется в России.

Важной задачей для поддержания работоспособности накопителя в течение длительного периода времени является необходимость создания высокоэффективной системы контроля и управления основными параметрами эксперимента и системы блокировки работы детектора при возникновении аварийной ситуации. Проблема осложняется тем, что в установке используется как ультравакуум уровня $10^{-12} \dots 10^{-9}$ торр, так и низкотемпературный режим для поддержания сверхпроводящего состояния магнита. Решение этой сложной и ответственной задачи осуществляется при участии сотрудников ИЯИ РАН.

Задачи проекта на данном этапе:

- создание накопителя позитронов с интенсивностью не хуже $(2-3) \times 10^8$;
- транспортировка пучка позитронов в главный магнит;
- обеспечение высокого вакуума на уровне $10^{-10} \dots 10^{-9}$ торр;
- создание системы автоматического управления и контроля установки, позволяющей регулировать подачу напряжения на электроды, подачу буферного газа в ловушку и накопитель позитронов, измерение вакуума и параметров криогенной систем установки;
- создание системы блокировки установки для обеспечения надежной работы вакуумной и криогенной систем установки;
- измерение интенсивности и временных характеристик позитронного сгустка;
- определение эффективности накопления и транспортировки позитронов;
- проведение тестовых сеансов по набору статистического материала;
- обработка и анализ экспериментальных данных.

Решение этих задач позволит избежать потерь интенсивности пучка позитронов и сформировать атомы антиводорода с наибольшей эффективностью.

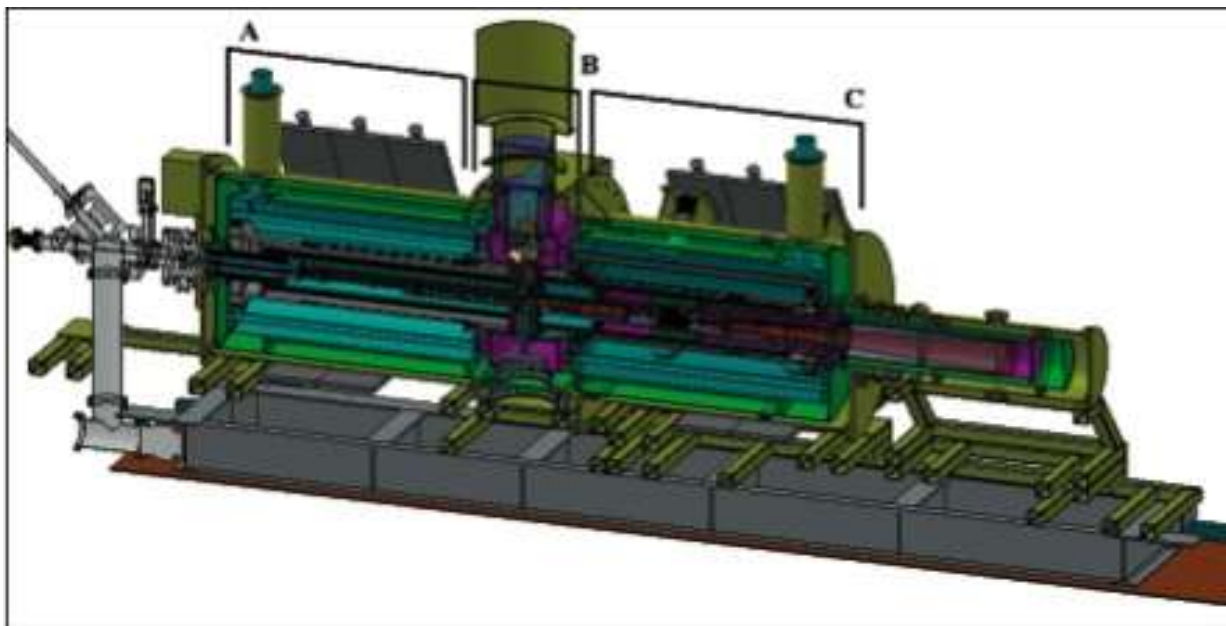


Рисунок 2.4 – Основной криостат и магнитная система эксперимента AEGIS.

Основные задачи создания автоматической системы контроля и блокировки узлов накопителя позитронов AEGIS:

- синхронизованная с работой декселератора и эффективная система впрыскивания позитронов в главный магнит, показанный на рисунке 2.4;
- управление и контроль электроникой питания электродов накопителя, считывание информации;
- контроль состояния соленоида (ток обмоток, температура, вакуум, т.д.);
- контроль состояния вакуумной системы.

Действие автоматической системы контроля и мониторингирования параметров установки основано на периодическом, с частотой 10 Гц, считывании показаний:

- температурных датчиков магнита;
- датчиков вакуумной системы магнита;
- датчиков токов и напряжений детекторов установки;
- датчиков вакуумных системы отдельных детекторов.

Мониторингирование установки будет осуществляться путем периодического сравнения текущих показаний и контрольных значений параметров с возможностью вывода информации по любому детектору или узлу установки на дисплей, а также с записью информации на диск.

При наличии отклонений от предусмотренных спецификацией параметров система контроля либо оповещает систему блокировки о необходимости произвести аварийную остановку набора данных, либо самостоятельно, как это было предусмотрено в случаях нарушения вакуума, отключает высокое напряжение и закрывает соответствующие вакуумные затворы установки. Разработка и внедрение такой системы контроля и блокировки позволит существенно повысить эффективность работы установки и избежать поломок дорогостоящего оборудования.

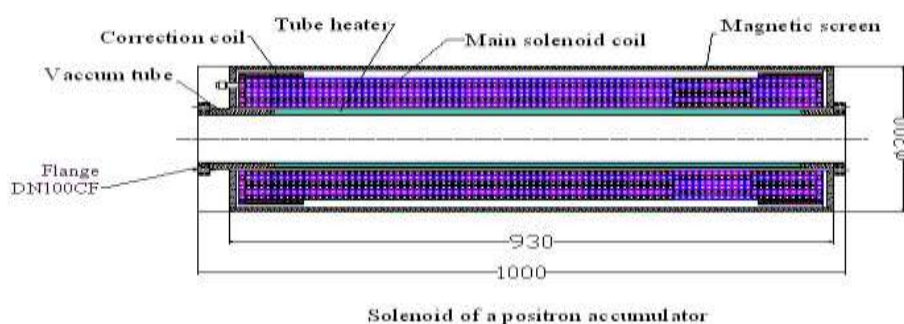


Рисунок 2.5 – Проектный вид прецизионного магнитного соленоида для накопителя позитронов в установке AEGIS, разработанный сотрудниками ИЯИ РАН.

Прецизионный магнитный соленоид позитронного накопителя AEGIS

Для высокоэффективной и надежной процедуры накопления медленных позитронов неоднородность магнитного поля соленоида не должна превышать относительную величину порядка 10^{-4} от значения поля в центре. Другая важная особенность конструкции заключается в необходимости прогрева вакуумного объема соленоида для получения высокого вакуума. Принципиальная схема соленоида, разработанная в ИЯИ РАН и удовлетворяющая этим требованиям, показана на рисунке 2.5. Общий вид системы транспортировки медленных позитронов из позитронного накопителя в главный магнит (рисунок 2.3), показан на рисунке 2.6.

АСУ контроля и мониторингирования параметров такой многофункциональной и дорогостоящей установки и, в частности, накопителя позитронов, абсолютно необходима для предотвращения аварий и поломок оборудования, влекущих за собой как дополнительные расходы для устранения поломки, так и потерю живого времени набора статистического материала.

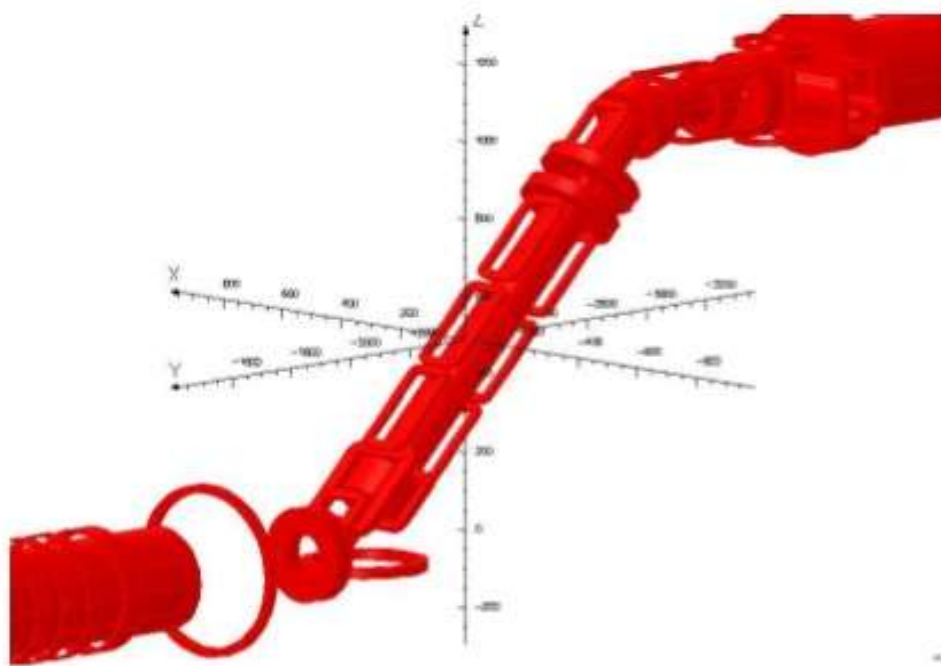


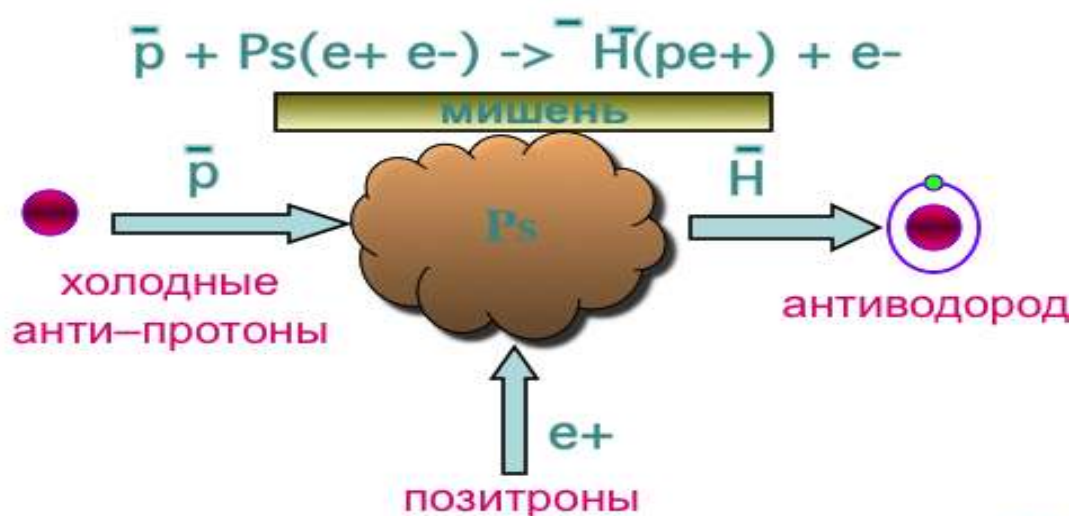
Рисунок 2.6 – Общий вид системы транспортировки медленных позитронов из накопителя позитронов в главный магнит установки.

Предложение ИЯИ РАН по формированию атомов позитрония

Способ формирования атомов позитрония для получения атомов антиводорода, предложенный сотрудником ИЯИ РАН С.Н. Гниненко, схематично показан на рисунке 2.7. Позитроны с энергией около 1 кэВ облучают мишень пористого кремния, в которой образуются атомы позитрония. Облако этих атомов формируется вблизи поверхности мишени. Затем это облако облучается мощным лазерным пучком с целью возбуждения т.н. ридберговских уровней позитрония (уровней с большим главным квантовым числом), которые являются относительно долгоживущими. Следующий шаг состоит в облучении облака ридберговских позитрониев пучком холодных антипротонов (рисунок 6). Атомы антиводорода при этом формируются в результате реакции перезарядки : $\text{anti-p} + \text{Ps}(e+e-) \rightarrow \text{anti-H} + e-$.

Основная проблема при таком способе формирования холодных атомов позитрония состоит в получении а) высокой эффективности образования термализованных, низкотемпературных атомов, и б) в получении небольшого разброса конечных скоростей атомов в вакууме.

Формирование холодного антиводорода



23

Рисунок 2.7. Схема формирования холодных атомов позитрония для получения атомов антиводорода в AEGIS, предложенная сотрудниками ИЯИ РАН.

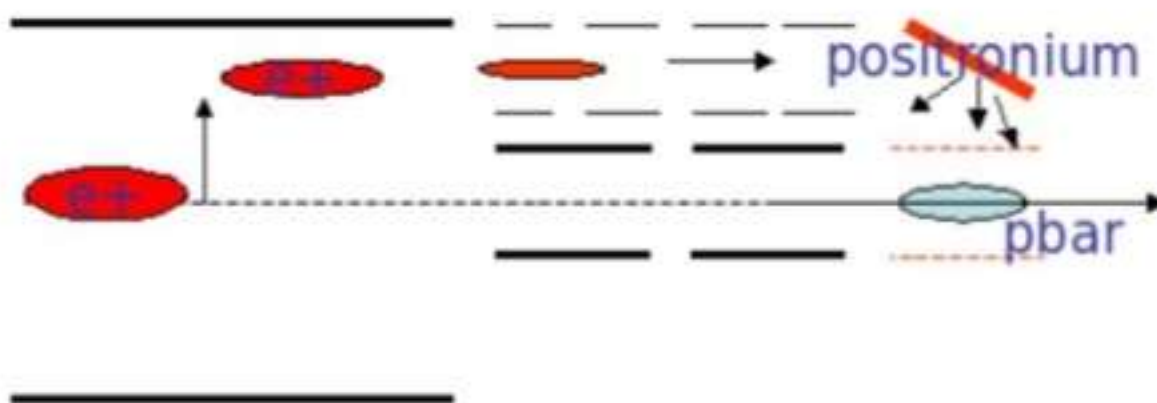
Последнее требование особенно существенно для получения высокой эффективности образования возбужденных ридберговских позитрониев ввиду ограниченной мощности лазерного пучка и его конечных размеров. Так, предполагается, что поперечные размеры сформированного сгустка атомов позитрона составит примерно несколько миллиметров. Время термализации атомов позитрония в мишени также является важной характеристикой процесса и не должно существенно превосходить характерное время жизни позитрония в вакууме (около 140 нс).

Предложение ИЯИ РАН по формированию направленного пучка атомов антиводорода.

В эксперименте AEGIS предполагается осуществить формирование пучка атомов антиводорода ускорением антиатомов в высоковозбужденных состояниях в градиентном электрическом поле. Однако в этом методе неизбежны потери антиатомов, так как в высоковозбужденных состояниях будут возникать состояния с различными значениями электрического дипольного момента. По этой же причине распределение атомов по скоростям будет иметь большую ширину.

Альтернативный метод формирования пучка атомов антиводорода был предложен сотрудниками ИЯИ РАН (А. Белов). Метод заключается в ускорении антипротонов импульсным электрическим полем наносекундной длительности непосредственно перед зарядово-обменными столкновениями антипротонов и атомов позитрония в высоковозбужденных состояниях. Сформированные в результате реакции перезарядки между антипротонами и позитронием атомы антиводорода ввиду их гораздо большей массы сохраняют первичное направление движения антипротонов. Таким образом, на выходе из области формирования получится коллимированный пучок холодных атомов антиводорода.

Схема такого способа формирования пучка атомов антиводорода показана на рисунке 2.8 (схема внизу). Предложенная схема, по заключению совещания коллаборации, является очень перспективной.



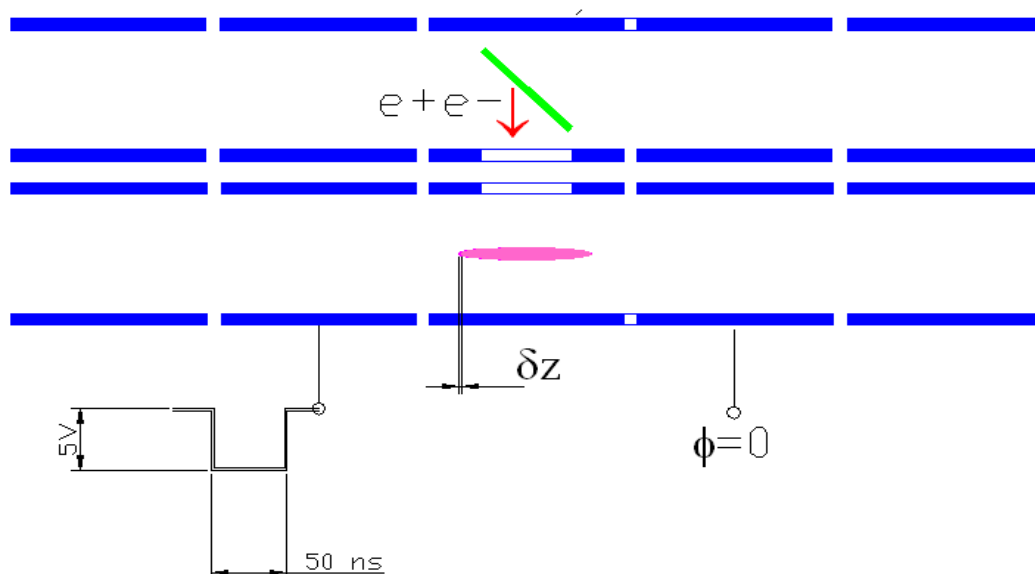


Рисунок 2.8 — Схема формирования направленного пучка холодных атомов антиводорода, первоначально предложенная в эксперименте AEGIS (верхний рисунок), и обладающая большей эффективностью, предложенная сотрудниками ИЯИ РАН (нижний рисунок).

Одна из возможных проблем связана с учетом пространственного заряда. Использование даже небольшого напряжения удаляет электроны из электрон-антипротонной плазмы сгустка (объект розового цвета на нижнем рисунке 8).

Поэтому дальнейшее движение и расплывание сгустка может определяться силами, связанными с его пространственным зарядом. По решению коллаборации эта схема в настоящее время находится в стадии изучения и анализа.

Основные задачи в 2012 г. :

Январь–март:

- поставка соленоида в ЦЕРН;
- сборка на пучке, запуск, измерение характеристик;
- монтажные работ по сборке всего накопителя позитронов.

Июнь – ноябрь:

- проектирование стенда для измерения различных мишеней для формирования атомов позитрония на пучке в ЦЕРН;
- поставки мишеней пористого кремня для измерений выхода и характеристик позитрония;
- изучение характеристик процесса термализации позитрония;

- разработка лазерной системы возбуждения атомов позитрония в ридберговские состояния;
- изучение новой схемы формирования пучка атомов антиводорода.

Выводы

Работы, предусмотренные очередным этапом по эксперименту AEGIS в 2011 г., выполнены. Этот этап был связан с разработкой основных узлов установки, исследованием и моделированием ключевых процессов по формированию пучка холодных атомов антиводорода, а также с проводкой в 2011 г. первого пучка холодных антипротонов в экспериментальный зал, и началом монтажных и пусконаладочных работ установки в экспериментальном зале. В результате конструкторской и научной работы в течение 2011 г. получены результаты, существенно продвигающие проект к проведению первых измерений и получению первых результатов. Так, сотрудниками ИЯИ РАН разработаны:

- метод формирования холодных атомов позитрония;
- метод формирования направленного пучка холодных атомов антиводорода;
- прецизионный магнитный соленоид для накопителя позитронов и предложена схема накопления позитронов; соленоид в настоящее время находится в стадии изготовления. Ожидаемая поставка в ЦЕРН - начало 2012 г.
- программа экспериментов по поиску новой физики в редких распадах позитрония.

Новые легкие частицы за пределами Стандартной Модели: поиск солнечных аксионов и фотонов скрытого сектора на установке CAST

На установке CAST (CERN Axion Solar Telescope) продолжается работа по поиску легкого солнечного аксиона. Анализируются данные, полученные в сеансах на установке в течение 2008 – 2011 гг. Проводятся сеансы измерений со сканированием давления ^3He , наполняющего объем сверхпроводящего магнита.

Метод исследования основывается на регистрации в диапазоне энергий $1\div 10$ кэВ гамма-квантов, возникающих от конверсии в магнитном поле сверхпроводящего

магнита аксионов, испускаемых Солнцем. Мотивация для данных исследований следующая.

Известно, что большая часть вещества нашей Вселенной находится в неизвестном виде – это так называемая «темная материя». Одним из основных кандидатов на этот вид вещества является аксион. Аксион был введен в теорию элементарных частиц для объяснения отсутствия у нейтрона большого электрического дипольного момента. Таким образом, обнаружение аксиона позволило бы решить сразу две важнейшие проблемы фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц. Отметим, что поисками аксиона занимаются коллективы исследователей в США (установка в Беркли), Японии (установка в Токийском университете) и других странах.

Установка CAST состоит из большого сверхпроводящего дипольного магнита (длина 9.26 м), создающего мощное магнитное поле, и ряда детекторов, расположенных по обоим торцам магнита. Метод, используемый в установке CAST, позволяет достичь уникальной чувствительности при определении потока аксионов.

Установка CAST собиралась в ЦЕРН в течение 2002-2003 гг. коллективом, состоявшим из более чем 50 ученых и инженеров ЦЕРН и научных институтов России, Германии, США, Греции, Канады, Хорватии, Франции, Италии, Испании, Турции и Швейцарии.

Задачи первого этапа работ на установке:

- создание детекторов для регистрации гамма-квантов в кэвной области энергий с низким порогом регистрации и высоким разрешением;
- запуск большого криогенного сверхпроводящего магнита;
- создание системы блокировки, обеспечивающей надежную работу вакуумной и криогенной систем;
- определение пространственных и временных характеристик уровня фона, образованного космическими лучами, а также естественной радиоактивностью;
- определение эффективности регистрации гамма-квантов в зависимости от их энергии;
- проведение сеансов набора статистического материала;
- обработка и анализ экспериментальных данных и получение первых физических результатов.

На втором этапе проведения исследований на установке CAST проводятся измерения с наполнением зоны конверсии в сверхпроводящем магните ^4He , а с 2009 г. – ^3He . Для этого разработана и изготовлена система прецизионного наполнения криогенного объема магнита газообразными изотопами гелия. Проведены тестовые измерения и установлена возможность эффективной регистрации гамма-квантов. Измерения с наполнением зоны конверсии в трубопроводе сверхпроводящего магнита газообразным ^4He были проведены в 2005-2007 гг. до давления 13,4 мбар при температуре 1,8 К.

В 2007-2008 гг. разработана и изготовлена система наполнения зоны конверсии в трубопроводе магнита газообразным ^3He . С 2009 г. проводятся сеансы измерений до давления ^3He - 64 мбар при температуре 1,8 К. Измерения продолжались в течение 2010–2011 гг. до давлений $^3\text{He} \sim 100$ мбар, соответствующих массе аксиона около 1,2 эВ.

На третьем этапе (начало 2012 г.) работ на установке CAST планируется проведение сканирования по давлению изотопа He-4 , а также проведение тестовых экспериментов по поиску фотонов скрытого сектора, предложенных физиками ИЯИ РАН.

Этот этап включает в себя:

- проектирование вакуумной системы, системы детектирования одиночных фотонов и оптической системы их фокусировки, системы сбора данных и электроники;
- создание прототипа установки;
- проведение тестовых измерений и установление возможности эффективной регистрации одиночных гамма-квантов при минимально возможном уровне шума;
- создание полномасштабной установки, набор данных, обеспечение ее функционирования в течение сеансов, планируемых в 2011-2012 гг.;
- обработка и анализ данных.

В результате работ на первом этапе:

- выполнено конструирование и изготовление системы контроля параметров и блокировки узлов установки CAST, что позволило провести безаварийный набор данных в течение 2004-2011 гг.;
- проведен анализ экспериментальных данных, полученных в результате экспозиции 2004–2011 гг.;
- по результатам анализа экспериментальных данных поставлен предел на константу связи аксиона с двумя фотонами $g_{a\gamma} < 8,8 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$ для области масс аксиона

$m_a < 0,02$ эВ (для измерений в вакууме). Полученный предел примерно в 2 раза лучше, чем предел, полученный в 2003 г., и впервые сопоставим с ограничениями, получаемыми из астрофизики из рассмотрения потерь энергии звездами за счет излучения аксионов;

- полученные результаты более чем на порядок улучшают результаты предыдущих экспериментов по поиску аксионов;

- проведены оценки интенсивности потоков аксионов, возникающих от конверсии гамма-квантов высокой энергии в протяженных межгалактических магнитных полях, а также предложен первый эксперимент по возможной регистрации этих потоков;

- подготовлено и опубликовано в печати предложение нового поколения эксперимента CAST (SuperCAST).

В результате работ на втором этапе:

- выполнено конструирование и изготовление системы контроля параметров и блокировки узлов установки в режиме наполнения вакуумного объема магнита He^4 для обеспечения сканирования по давлению газа при наборе данных, что позволило провести безаварийный набор данных в течение 2004- 2011 гг.;

- проведен анализ первых экспериментальных данных, полученных в результате экспозиции при сканировании по давлению в 2007-2010 гг.;

- по результатам анализа экспериментальных данных поставлен новый предел на константу связи аксиона с фотоном $< 2,3 \times 10^{-10}$ ГэВ⁻¹ для области масс аксиона $m_a < 1,15$ эВ;

- полученный предел лучше, чем пределы, полученные прежде и сопоставим с ограничениями, получаемыми из астрофизики из рассмотрения потерь энергии звездами за счет излучения аксионов;

- проводятся сеансы по набору данных с наполнением зоны конверсии в трубопроводе сверхпроводящего магнита газообразным гелием-3, в 2011 г. до давления более 100 мбар при температуре 1,8 К.

Результаты исследований опубликованы в ряде ведущих физических журналов. В настоящее время установка CAST является крупнейшим в мире «телескопом», предназначенным для обнаружения новой элементарной частицы – аксиона, которая в случае ее существования в природе может излучаться Солнцем.

Первоначально аксион был введен в теорию элементарных частиц для объяснения отсутствия у нейтрона большого электрического дипольного момента, который естественно возникал в рамках квантовой хромодинамики. Экспериментальные исследования по поиску дипольного момента нейтрона, проведенные, в частности, в Институте ядерной физики им. Б.П.Константинова (Санкт-Петербург) и Институте ядерных исследований РАН (Москва) под руководством академика В.М.Лобашева, позволили ограничить дипольный момент нейтрона величиной 10^{-25} е-см. Это крайне высокое ограничение неизбежно потребовало введения в теорию новой частицы – аксиона. Аксион является гипотетической частицей, аналогичной нейтральному пиону, которая связана с фотонами константой связи $g_{a\gamma}$. В случае легкого аксиона эта связь позволяет осуществить как процесс рождения аксиона в результате конверсии фотона в магнитном поле в аксион, так и процесс обратной конверсии (регенерации фотона) в результате взаимодействия аксиона с магнитным полем.

Впервые поиск такого процесса рождения и регенерации аксионов был предложен С.Н.Гниненко (ИЯИ РАН) совместно с К. Зиутосом (K. Zioutos) (Греция) в рамках эксперимента НОМАД (NOMAD - Neutrino Oscillation MAgnetic Detector). Схематически этот процесс показан на рисунке 3.1. Если такой процесс существует, он может происходить и в недрах Солнца. Аксионы могут рождаться в результате процесса за счет т.н. эффекта Примакова. Таким образом, Солнце может являться возможным источником аксионов с энергией 1...10 кэВ. Поток таких аксионов в сильном магнитном поле эффективно конвертирует в кэвные фотоны, которые могут быть зарегистрированы – в этом состоит основная идея эксперимента CAST.

Установка CAST, общий вид которой показан на рисунке 3.2, запущена в эксплуатацию в 2003 г. с набором данных с 2003 г. Основной целью эксперимента на первом этапе было получение ограничений на константу связи аксиона, сравнимых с ограничениями, получаемыми в космологии и астрофизике и являющимися на сегодняшний день наиболее сильными.

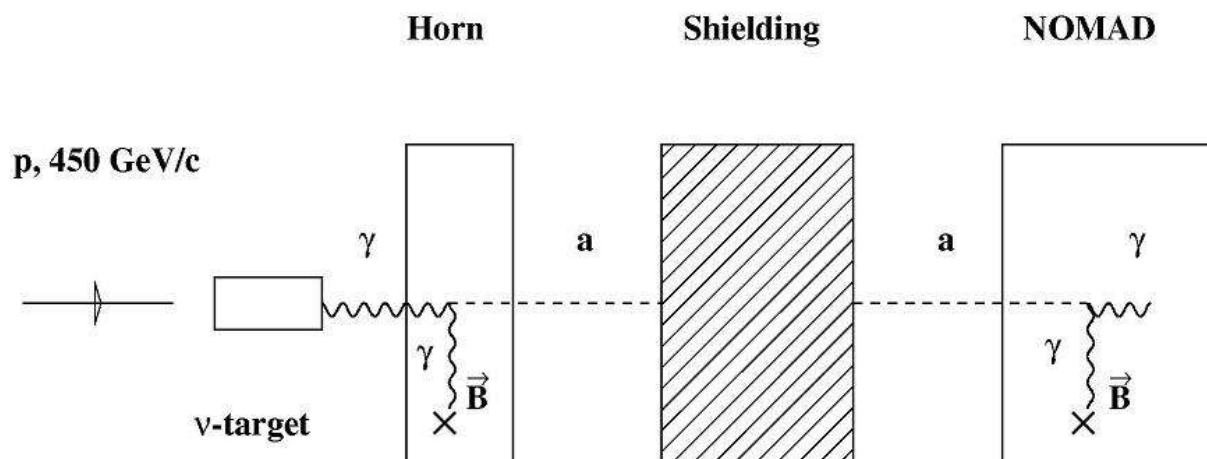


Рисунок 3.1 – Процесс рождения аксиона и его регистрация в эксперименте НОМАД.

Установка CAST является уникальной прежде всего потому, что в ней используется наибольший в мире сверхпроводящий дипольный магнит. Длина магнита составляет 9,26 м, величина магнитного поля 9 Тл. Магнит был одним из первых прототипов сверхпроводящего магнита, построенного в рамках проекта «Большой адронный коллайдер» в ЦЕРН. Экспериментальная база установки CAST создавалась интернациональной коллаборацией из сотрудников 14 лабораторий и научных институтов России, Германии, США и ряда других стран.

Для точного восстановления энергетического спектра потока солнечных аксионов необходимо создать прецизионные детекторы гамма-квантов с низким порогом регистрации в области энергий 1...10 кэВ. Для решения этой задачи сконструирована при участии сотрудников ИЯИ РАН время-проекционная камера, так например, гамма-кванты с энергией 5 кэВ регистрируются с энергетическим разрешением не хуже 15%.

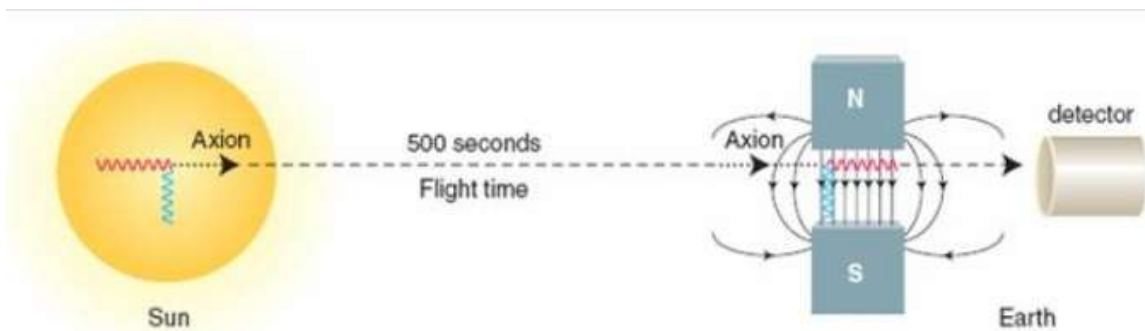


Рисунок 3.2 – Общий вид установки CAST и схема метода поиска конверсии солнечных аксионов.

Одним из основных источников фона в данном эксперименте является фон от естественной радиоактивности окружающего вещества. Существенно уменьшить уровень этого фона можно с помощью искусственной защиты, выполненной из чистого свинца. Образцы такого изотопа свинца, изготовленные в России, отобраны и исследованы в ЦЕРН.

Важной задачей для поддержания работоспособности установки в течение длительного периода времени является создание высокоэффективной системы контроля основных параметров эксперимента и возможности блокировки работы детектора при

возникновении аварийной ситуации. Проблема осложняется тем, что в установке используется как высококачественный вакуум уровня $10^{-8} \dots 10^{-7}$ торр, так и низкотемпературный режим для поддержания сверхпроводящего состояния магнита. Система блокировки, созданная для мониторинга работы установки CAST, проработала в течение 2004-2011 гг. и обеспечила за это время поддержание вакуумной и криогенной систем в безаварийном состоянии.

Цель данного проекта:

- создание детекторов для регистрации гамма-квантов в кэВной области энергий с низким порогом регистрации и высоким разрешением;
- запуск большого криогенного сверхпроводящего магнита;
- создание системы блокировки установки, обеспечивающей надежную работу вакуумной и криогенной систем установки;
- определение пространственных и временных характеристик уровня фона, образованного космическими лучами, а также естественной радиоактивностью;
- определение эффективности регистрации гамма-квантов в зависимости от их энергии;
- обработка и анализ экспериментальных данных и получение физических результатов.

Решение этих задач позволило:

- провести прецизионную калибровку и настройку основных детектирующих систем установки, используя пик 5 кэВ изотопа ^{55}Fe ;
- обеспечить безаварийную работу установки в течение набора экспериментальных данных в 2004-2011 гг.;
- улучшить соотношение сигнал/фон за счет подавления уровня фона от естественной радиоактивности более чем на порядок;
- провести анализ полученной информации и получить первые экспериментальные данные.

Статус эксперимента CAST в 2011-2012 гг.

Набор статистического материала в режиме сканирования по давлению He-3 в 2011 г. и продолжение набора статистики в 2012 г. в режиме сканирования по давлению изотопа He-4, позволяющего обнаружить солнечные аксионы с массами вплоть до 2 эВ.

Подготовка предложения эксперимента по поиску осцилляций солнечных фотонов в фотоны скрытого сектора с последующей их регенерацией в детекторе CAST в 2012 г.

Результаты по эксперименту

Система контроля и мониторингирования параметров установки CAST и система блокировки криогенной и вакуумной систем

Создание высокоэффективной и надежной автоматической системы контроля и мониторингирования параметров такой многофункциональной и дорогостоящей установки, какой является установка CAST, абсолютно необходимо для предотвращения аварий и поломок оборудования, влекущих за собой как потерю средств, необходимых для устранения поломки, так и потерю живого времени набора статистического материала.

Основной целью создания автоматической системы контроля и блокировки узлов установки CAST являются:

- проверка и контроль низкошумящей электроники, используемой для считывания информации с детекторов CAST, особенно узлов, связанных с работой вакуумной системы;
- контроль состояния сверхпроводящего магнита;
- контроль состояния вакуумной системы.

Действие автоматической системы контроля и мониторингирования параметров установки основано на периодическом с частотой 10 Гц считывании показаний:

- абсолютного положения магнита в пространстве;
- температурных датчиков магнита;
- датчиков вакуумной системы магнита;
- датчиков токов и напряжений детекторов установки;
- датчиков вакуумных системы отдельных детекторов.

Мониторингирование установки осуществляется путем периодического сравнения текущих показаний и контрольных значений параметров с возможностью вывода информации по любому детектору или узлу установки на дисплей, а также с записью информации на диск.

При наличии отклонений фактических параметров от предусмотренных спецификацией значений система контроля либо оповещает систему блокировки о необходимости произвести аварийную остановку набора данных, либо самостоятельно,

как это было предусмотрено в случаях нарушения вакуума, отключает высокое напряжение и закрывает соответствующие вакуумные затворы установки.

Разработка и внедрение такой системы контроля и блокировки позволило существенно повысить эффективность работы установки и избежать поломок дорогостоящего оборудования. Так, например, только в течение одного весеннего сеанса 2007 г. система произвела два автоматических отключения узлов, связанных с необходимостью устранения недостаточно высокого вакуума.

Разработан новый метод калибровки регистрирующей аппаратуры установки в диапазоне рентгеновского излучения, с помощью которого можно также оценить неэффективность детектора, связанную с поглощением рентгеновских фотонов в разделительных пленках на границе вакуум – детектор.

Установка CAST на втором этапе эксперимента

Вероятность конверсии солнечного аксиона в фотон в постоянном магнитном поле в вакууме описывается соотношением:

$$P_{a \rightarrow \gamma} = \left(\frac{BLg_{a\gamma}}{2} \right)^2 \quad (1)$$

где B – величина магнитного поля, L – длина области, занимаемой полем, $g_{a\gamma}$ – константа связи аксион-фотон. Необходимым условием эффективной конверсии аксиона в фотон является условие т.н. когерентности:

$$\frac{m_a^2 L}{2E_a} \ll p \quad (2)$$

где E_a и m_a – энергия и масса аксиона, соответственно.

Так как поток аксионов имеет широкий спектр в диапазоне энергий 1...10 кэВ, необходимо провести свертку аксионного спектра с апертурой, эффективностью конверсии и эффективностью регистрации гамма-квантов в установке. За основу этого преобразования были взяты методы, предложенные сотрудниками ИЯИ РАН при анализе данных по поиску аксиона на установке НОМАД в ЦЕРН.

На первом этапе эксперимента, когда набор данных осуществлялся при давлении остаточного газа в зоне конверсии сверхпроводящего магнита не более 10^{-7} мбар, было

получено ограничение на константу связи аксион-фотон $g_{a\gamma} < 8,8 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$, применимое для масс аксионов $m_a < 0,02 \text{ эВ}$.

Для того чтобы расширить исследуемый диапазон массы аксиона, необходимо наполнить зону конверсии в трубопроводе сверхпроводящего магнита буферным газом, что приводит к возникновению эффективной массы γ возникающего в процессе конверсии фотона. Разница импульса аксиона и фотона в этом случае равна $q = (m_a^2 - m_\gamma^2)/2E$, так что для массы аксиона, близкой к эффективной массе фотона, вероятность конверсии увеличивается до величины, близкой к вероятности конверсии в вакууме для аксионов с $m_a < 0,02 \text{ эВ}$. Изменение плотности буферного газа позволяет сканировать величину исследуемой массы аксиона. В этом случае необходимо проводить набор и анализ данных отдельно для каждого значения плотности газа в зоне конверсии.

На втором этапе эксперимента CAST зона конверсии заполнялась газообразным гелием-4. Выбор газа определяется низкой температурой вакуумпровода внутри сверхпроводящего магнита (1,8 К) и необходимостью избежать конденсации газа при низких температурах и относительно высокой плотности. Эти факторы ограничили максимальное давление гелия-4 величиной 13,4 мбар, что соответствует эффективной массе фотона $m_\gamma \approx 0,4 \text{ эВ}$.

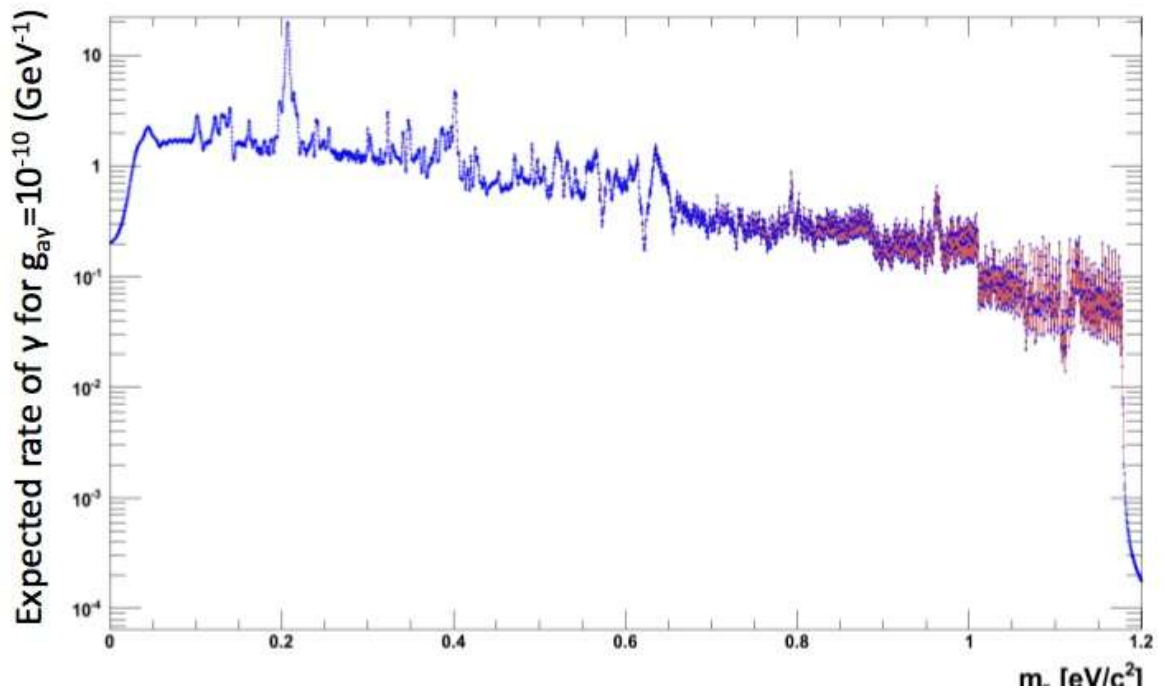


Рисунок 3.3 – Полный диапазон сканирования по массе аксиона при наполнении зоны конверсии в магните газообразным ^3He в течение 2008–2011 гг.

Для поиска аксионов с большей массой вплоть до 1,2 эВ зона конверсии наполняется газообразным гелием-3. Сеансы с гелием-3 проводятся с 2009 г. и планируются до конца 2012 г.

При работе с наполнением зоны конверсии гелием-4 плотность гелия в зоне конверсии изменялась ежедневно на величину эквивалентную 0,08 мбар при 1,8 К. Для прецизионного контроля плотности газа использовалась процедура наполнения зоны конверсии из сосуда известного объема, температура которого поддерживалась системой стабилизации с точностью 0,1 градуса Цельсия. Величина изменения давления определялась таким образом, чтобы обеспечить плавное перекрытие эффективных масс фотона во всем исследуемом диапазоне. Однородность распределения газа в зоне конверсии обеспечивалась эффективным взаимодействием со стенками вакуумного сосуда, которые охлаждаются сверхтекучим жидким гелием, заполняющим объем магнита.

В первоначальных испытаниях в системе наблюдались термоакустические колебания, которые могли нарушать однородность распределения газа в зоне конверсии. Для подавления этих колебаний в систему были введены специальные демпфирующие элементы.

Для ограничения объема газообразного гелия в зоне конверсии в системе установлены тонкие окна, разделяющие зону, наполненную гелием при температуре 1,8 К, от “теплой” вакуумированной зоны с детекторами. Окна должны иметь высокую прозрачность для фотонов с энергией 2...8 кэВ и выдерживать давление газа, возникающее при случайных переходах магнита из сверхпроводящего в нормальное состояние, когда температура и давление газа может возрасти на два порядка до величины, превышающей атмосферное давление. Окна также должны иметь низкую проницаемость для гелия и должны быть оптически прозрачными для проведения лазерной юстировки системы. Для выполнения всех этих требований окна изготовлены из пленки полипропилена толщиной 15 мкм, размещенной на специальной

поддерживающей металлической сетке, которая обеспечивает необходимую механическую прочность окна. Выполнены измерения по определению прозрачности окон, которые подтвердили правильность расчетов и показали высокую прозрачность ~ 80% в диапазоне энергий фотонов 3...8 кэВ.

Сканирование давления гелия-4 осуществлялось с шагом 0,08 мбар до давления 13,4 мбар при температуре 1,8 К, позволив перекрыть диапазон масс аксиона 0,02...0,39 эВ.

В 2011 г. проводены сеансы со сканированием плотности газообразного гелия-3 до давления примерно 104 мбар при температуре 1,8 К, с числом промежуточных шагов около 250. На рисунке 3.3 показаны результаты сканирования в эксперименте CAST при наполнении зоны конверсии в магните газообразным ^3He в 2011 г., на рисунке 3.4 - полный диапазон сканирования по массе аксиона в течение 2008–2011 гг.

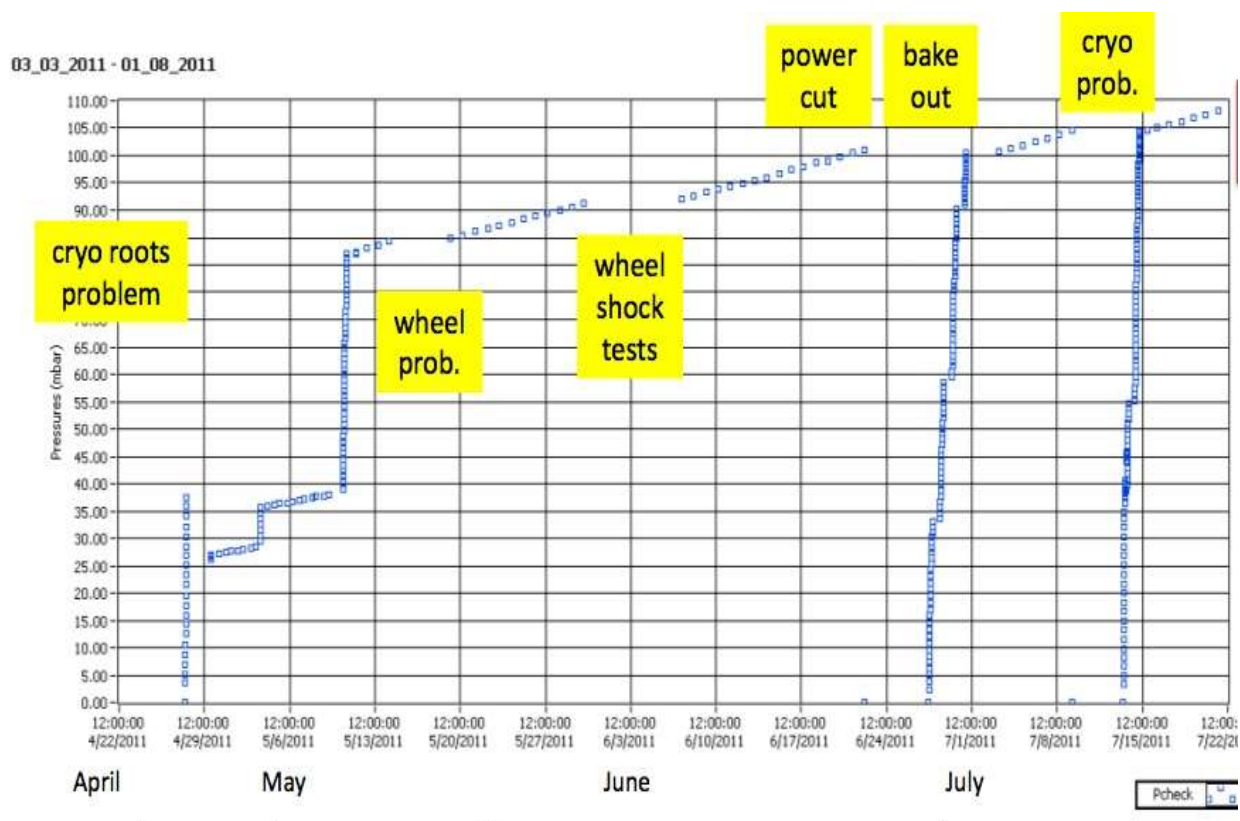


Рисунок 3.4 – Пример результатов сканирования в эксперименте CAST при наполнении зоны конверсии в магните газообразным ^3He в 2011 г.

Результаты второго этапа эксперимента в 2011 г.

Результаты эксперимента CAST, полученные при сканировании давления гелия-4, приведены на рисунке 3.5. Эти результаты впервые сопоставимы с астрофизическими ограничениями и намного превосходят ограничения, полученные в других экспериментах.

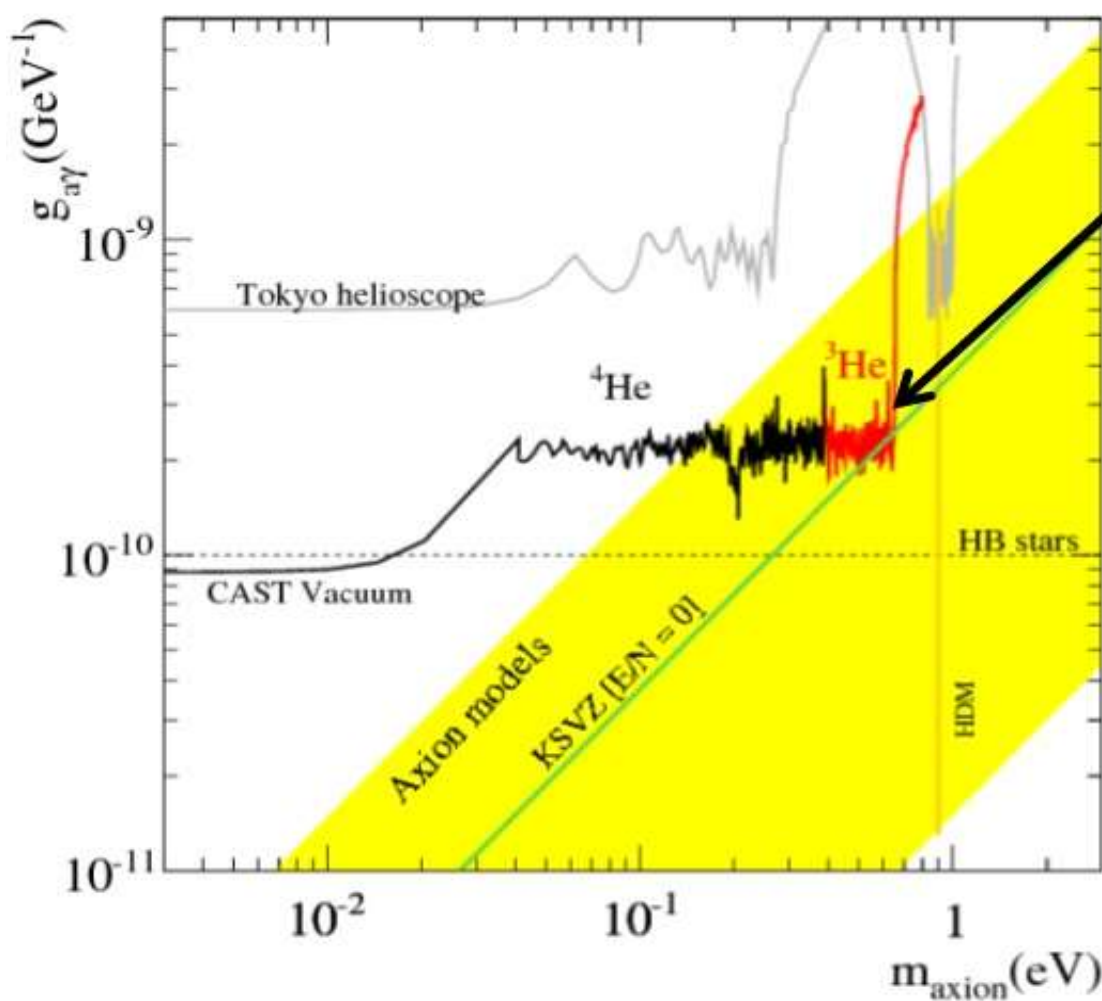


Рисунок 3.5 – Результаты эксперимента CAST при наполнении зоны конверсии в магните газообразным He-4. Для константы связи аксион-фотон получено ограничение $g_{a\gamma} < 2,17 \times 10^{-10} \text{ ГэВ}^{-1}$ в диапазоне масс аксиона $0,02 < m_a < 0,42 \text{ эВ}$.

На рисунке 3.5 также показаны планируемые результаты при наполнении зоны конверсии He-3. Сканирование по давлению He-3 до величины ~ 100 мбар планируется

завершить в 2011 г. Ожидалось, что эти результаты могут быть значительно улучшены благодаря использованию новой CCD-камеры, показанной на рисунке 3.7.

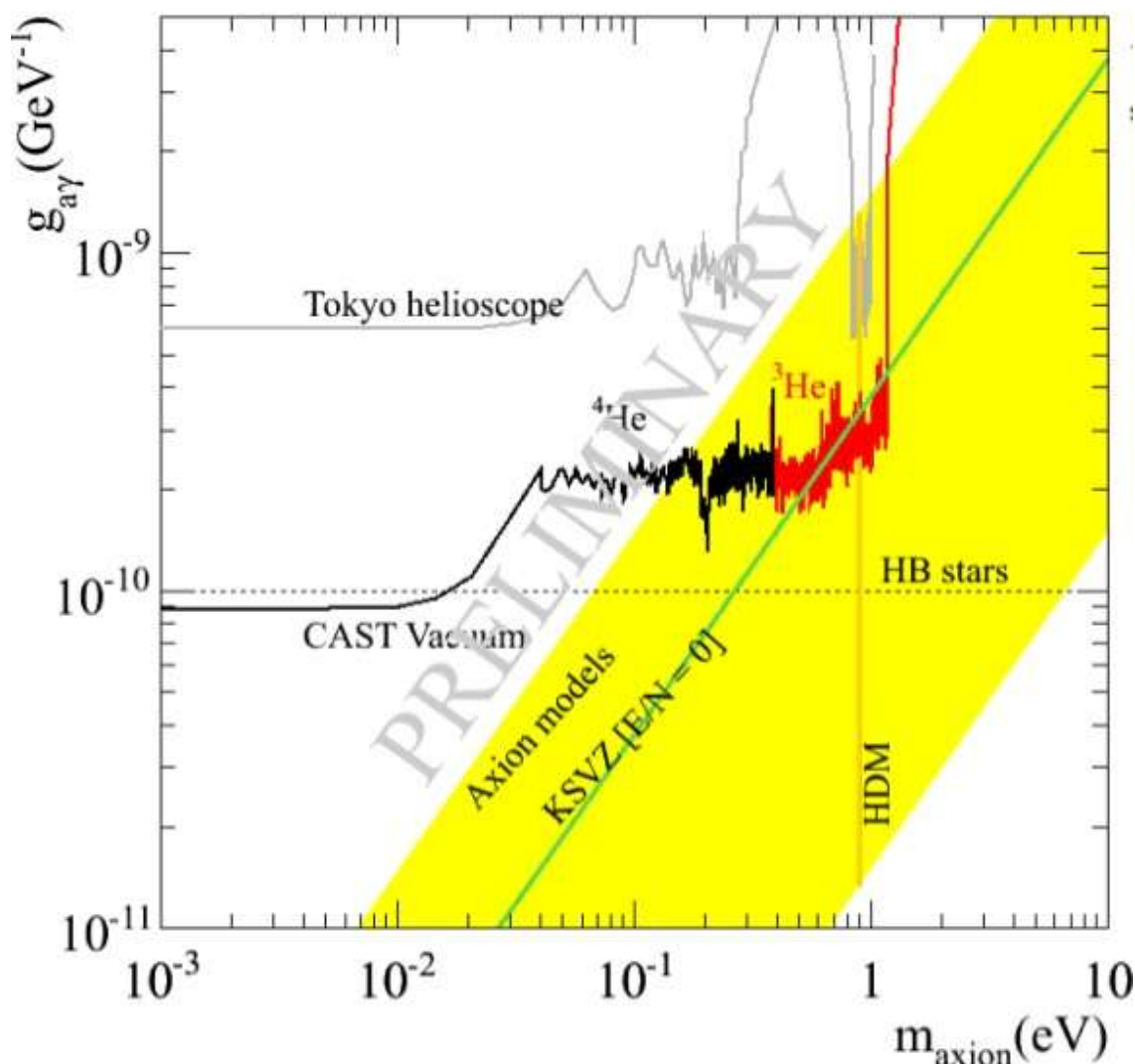


Рисунок 3.6 – Результаты эксперимента CAST при наполнении зоны конверсии в магните газообразным He–3.

Для константы связи аксион-фотон получено ограничение $g_{a\gamma} < 2,17...2,3 \times 10^{-10} \text{ ГэВ}^{-1}$ в диапазоне масс аксиона $0,02 < m_a < 1,15 \text{ эВ}$.

Результаты получены с использованием новой CCD-камеры, фотография которой показана на рисунке 3.7, вместе с фотографией на рисунке 3.8, демонстрирующей точность определения положения Солнца при проведении сканирования. Статья с новыми результатами принята к печати в журнале Phys. Rev. Lett.

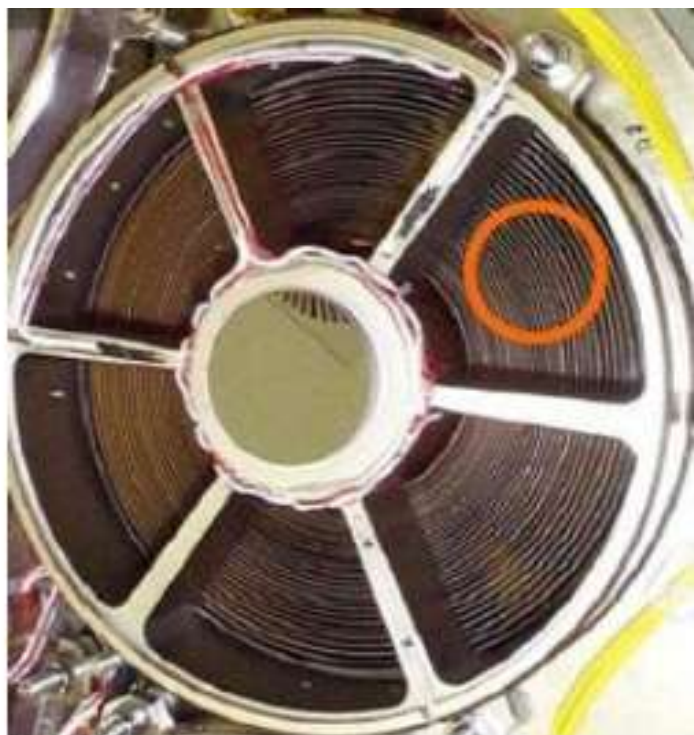


Рисунок 3.7 – Новая CCD камера эксперимента CAST в 2010–2011 гг.

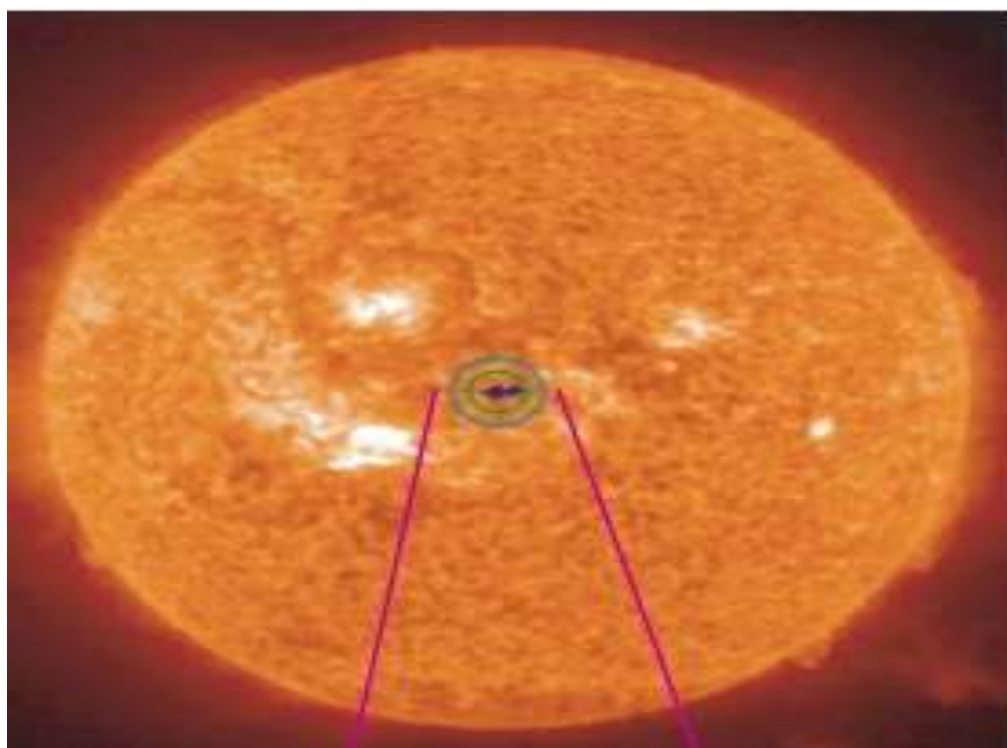


Рисунок 3.8 – Пример наведения телескопа эксперимента CAST на Солнце по результатам сканирования по направлению во время экспозиции в 2011 г.

Предложение эксперимента по поиску высокоэнергетичных космических аксионов

Возможность существования заметных потоков космических аксионов высокой энергии была отмечена сотрудниками ИЯИ РАН и участниками коллаборации CAST. Такие потоки аксионов могли бы возникать в результате конверсии гамма-квантов высокой энергии в протяженных межгалактических магнитных полях. В работах, опубликованных участниками от ИЯИ РАН, проведены оценки интенсивности этих потоков, а также предложен первый эксперимент по возможной регистрации этих потоков. В настоящее время проводится работа по выбору оптимального варианта детектора для эффективной регистрации конверсионных гамма-квантов. В качестве основного детектора рассматривается жидкоаргоновый прототип с объемом около 10 м^3 и с магнитным полем около 1 Тл. Практическая реализация такого детектора возможна, например, с использованием сверхпроводящего соленоида большого диаметра.

Предложение ИЯИ РАН по проведению эксперимента в рамках коллаборации CAST - поиск фотонов скрытого сектора и разработка предложения эксперимента.

Возможность существования фотонов скрытого сектора в области энергий порядка одного электронвольта была рассмотрена довольно давно. В последнее время интерес к этой области физики обусловлен возникновением такого рода частиц в таких современных моделях как теория струн, модели с дополнительными измерениями, модели скрытого сектора (например, модель зеркальной Вселенной) и ряде других.

С.Н. Гниненко (ИЯИ РАН) было отмечено, что, если такие частицы существуют, их перемешивание с обычными солнечными фотонами приведет к эффектам осцилляций и возможности регистрации этих осцилляций на модифицированной установке CAST. В работе показано, что если фотоны скрытого сектора, возникающие в различных расширениях Стандартной Модели существуют, они могут рождаться за счет кинетического смешивания с солнечными фотонами в области энергий порядка электронвольт. Поток таких фотонов может быть зарегистрирован в эксперименте Super-K и/или модифицированной установке CAST в ЦЕРН.

Методами моделирования выполнена оценка чувствительности предлагаемых экспериментов и области чувствительности к параметру смешивания фотонов в зависимости от массы парафотона. Чем ниже уровень шума и чем больше диаметр вакуумного объёма, тем выше уровень чувствительности к параметру смешивания. Для большинства рассмотренных значений параметров чувствительность выше, чем у недавно выполненных поисков регенерации скрытых фотонов в лазерных экспериментах.

В настоящее время проводится детальный анализ предложения ИЯИ РАН, включающий в себя моделирование эффекта, оценку чувствительности эксперимента, разработку вакуумной системы и т.д. для реального эксперимента в котором активное участие принимают также и зарубежные коллеги.

Основные этапы участия в проекте в 2011 и планы на 2012 г.

Май - ноябрь 2011 г. - участие в сеансах на установке и проведение анализа данных эксперимента по поиску солнечных аксионов. Разработка проекта по поиску осцилляций фотонов скрытого сектора.

Май - декабрь 2012 г. - участие в проведении сеансов эксперимента CAST по набору статистического материала, анализ данных. Участие в создании установки по поиску фотонов скрытого сектора.

Основные задачи 2012 г.:

- участие в работе эксперимента CAST и контроле за набором данных при сканировании давления He-4 в зоне конверсии аксиона в фотон с целью улучшения ограничения на константу связи;
- разработка нового эксперимента по поиску фотонов скрытого сектора.

В 2012 г. планируется продолжение работ по указанным группам задач и начало создания установки для поиска фотонов скрытого сектора.

Выводы

Работы, предусмотренные очередным этапом работ 2011 года по эксперименту CAST, выполнены. В результате анализа экспериментальных данных, набранных в течение 2004-2011 гг., получены результаты, существенно превосходящие результаты в других экспериментах. Эти результаты расширили диапазон масс аксиона до примерно 1,2 эВ. В

результате набора данных с наполнением зоны конверсии аксиона в фотон в магните гелием-3, которые проводились в 2010–2011 гг. и которые планируется продолжить в 2012 г., получены ограничения на константы связи аксионов с фотонами, которые являются лучшими в мире на сегодняшний день.

Несомненно, что обнаружение сигнала от солнечных аксионов явилось бы важным открытием в области исследования фундаментальных свойств материи.

В работах, опубликованных участниками от ИЯИ РАН, проведены оценки интенсивности потоков аксионов, возникающих от конверсии гамма-квантов высокой энергии в протяженных межгалактических магнитных полях, а также предложен первый эксперимент по возможной регистрации этих потоков.

Разработана концепция эксперимента по обнаружению сигнала от фотонов скрытого сектора на модифицированной установке эксперимента CAST с уровнем планируемой чувствительности, превосходящим достигнутый на сегодняшний день уровень в лазерных экспериментах по регенерации фотонов.

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

Экспериментальная установка ALICE представляет собой сложный многоцелевой комплекс детекторных систем, обеспечивающий возможности всесторонних исследований процессов столкновений ядер сверхвысоких энергий. В качестве возможных сигналов проявления кварк-глюонной плазмы будут исследованы процессы рождения странных, очарованных и прелестных частиц, рождения состояний чармония и ботомония, коллективные потоки, подавление рождения струй, прямые фотоны и т.д.

В этом комплексе детекторов важную роль играет стартовый время - пролетный и триггерный детектор T0, созданный при определяющем вкладе ИЯИ РАН. Детектор располагается вблизи номинальной точки столкновения релятивистских ионов с двух сторон от этой точки (T0-A и T0-C) и обеспечивает проведение измерений множественности рожденных частиц, мониторингирование и определение светимости, измерение времени-пролета рожденных частиц, диагностику пучка и как триггерный детектор. В период протон-протонных столкновений (январь-август 2011) детектор

обеспечивал временное разрешение около 40 пикосекунд, что соответствует техническому заданию на создание стартового детектора для идентификации заряженных частиц по время-пролетному методу. В ноябре–декабре 2011 года в течении ион-ионных столкновений было получено рекордное разрешение около 30 пикосекунд . На рисунке 4.1 показана стабильность временного разрешения детектора по ранам. Период приема данных длительностью от нескольких минут до нескольких часов принято называть ранами. На рисунке 4.2 представлены первые результаты по измерению множественности заряженных первичных частиц детектором T0 и сравнение полученных результатов с данными с других детекторов.

Использование время-пролетной системы позволяет идентифицировать пионы, каоны и протоны при значениях поперечного импульса от 0.5 до 2,5 GeV/c . Первоначально данные с T0 детектора использовались для времяпролетной системы только для событий в которых одновременно срабатывали T0-C и T0-A.

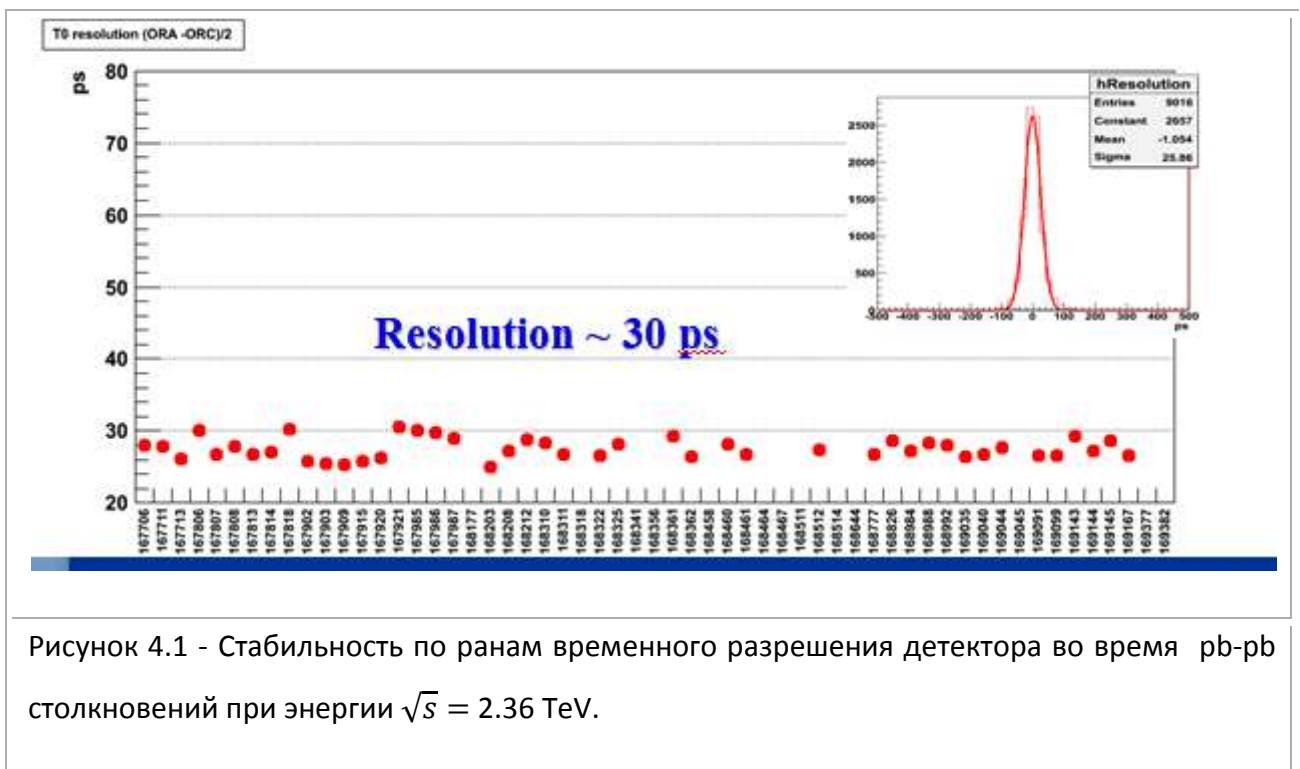


Рисунок 4.1 - Стабильность по ранам временного разрешения детектора во время pb-pb столкновений при энергии $\sqrt{s} = 2.36$ TeV.

Разработка нового алгоритма позволит использовать для анализа все данные и повысить эффективность использования данных для идентификации частиц до ~92 % /~100 % в протон-протонных/ион-ионных столкновениях.

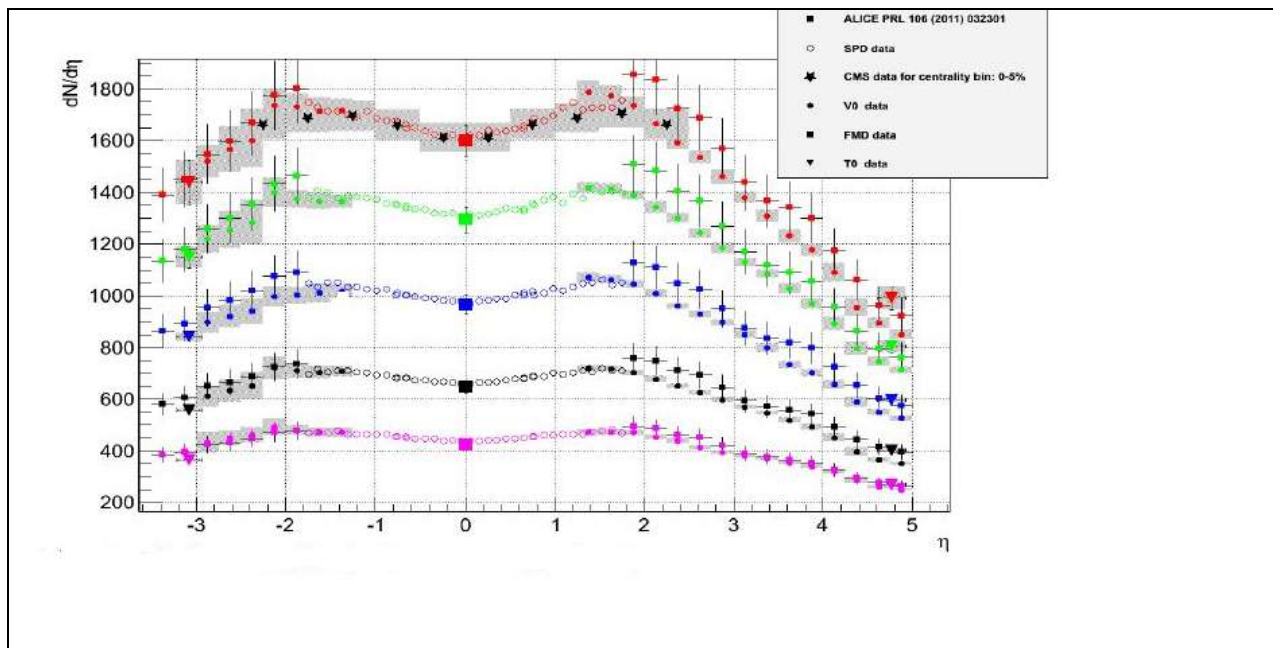


Рисунок 4.2 - Распределение плотности заряженных частиц по псевдобыстроте. Измерения выполнены передними детектора ALICE (FMD,V0,T0,SPD) для pb-pb столкновений при энергии $\sqrt{s} = 2.36$ TeV.

Стабильность работы детектора позволяет в 2011-2015 гг. использовать его в качестве основного детектора для определения светимости (рисунок 4.3) и как триггерного детектора для формирования триггерных сигналов по множественности на установке ALICE и получения физических данных о множественности заряженных частиц при больших быстротах и о плоскости реакции.

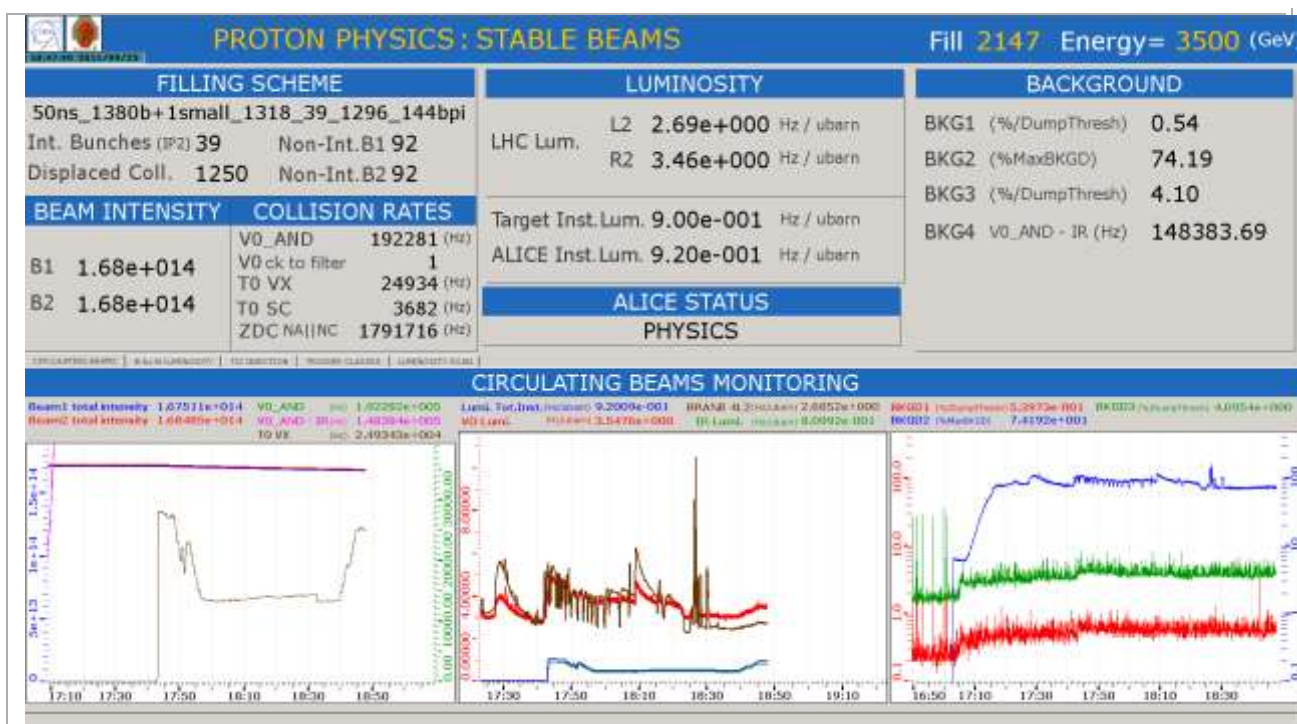


Рисунок 4.3 Мониторирование светимости и фоновых событий во время набора данных установкой ALICE. TOVX, T0SC – триггерные сигналы детектора T0 которые используются для измерения светимости (ALICE Inst.Lum)

T0 детектор был задействован во всех измерительных сеансах, проводимых экспериментом ALICE. Модернизация, устранение неполадок, поддержание работоспособности, обеспечение безаварийного процесса измерений и получения экспериментальных данных с детектора T0 были выполнены при определяющем вкладе сотрудников ИЯИ РАН.

2. На основе разработанной в ИЯИ РАН в предыдущие годы модели RELDIS, описывающей фрагментацию ядер в ультрапериферических взаимодействиях, даны предсказания полных сечений одиночной и взаимной электромагнитной фрагментации ядер свинца на БАК. Для регистрации событий электромагнитной фрагментации ядер в ходе сеансов ядро-ядро на БАК в 2010 и 2011 в эксперименте ALICE использовались детекторы Zero Degree Calorimeters (ZDCs), настроенные на регистрацию нейтронов от адронной и электромагнитной фрагментации ядер. Теоретические результаты были сопоставлены с экспериментальными данными, см. Рисунок 4.4 и Таблицу 1. Было отмечено хорошее согласие результатов модели и результатов измерений как для

отклика ZDCs при попадании в них нейтронов от электромагнитной диссоциации, рисунок 4.1, так и для абсолютных значений сечений одиночной и взаимной электромагнитной диссоциации ядер, Таблица 1. Способ моделирования электромагнитной фрагментации ядер с использованием RELDIS нашел свое применение и в эксперименте ATLAS.

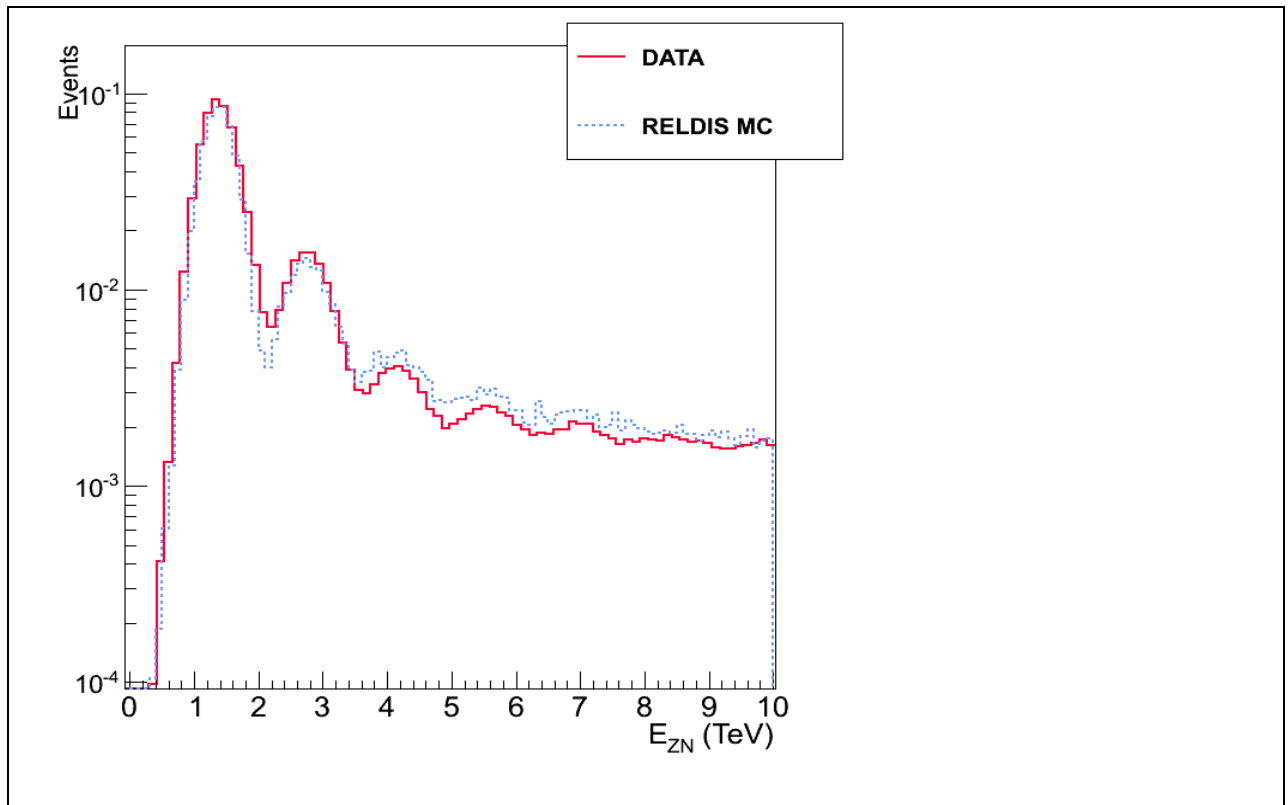


Рисунок 4.4 - Распределения полной энергии нейтронов, попадающих в ZDC в результате электромагнитной диссоциации встречных пучков ядер свинца с энергиями 1.38 А ТэВ. Сплошная кривая – результаты измерений, пунктирная – результаты RELDIS.

Physical Process	Data	RELDIS
single EMD + hadronic	195.6 ± 0.1 stat. $^{+24.2}_{-11.7}$ syst.	192.9 ± 9.2
single EMD - mutual EMD	176.9 ± 0.1 stat. $^{+21.6}_{-10.6}$ syst.	179.7 ± 9.2
mutual EMD	5.7 ± 0.2 stat. $^{+0.7}_{-0.3}$ syst.	5.5 ± 0.6
single EMD	185.7 ± 0.2 stat. $^{+22.6}_{-11.1}$ syst.	185.2 ± 9.2

Table 1: Сечения (барны) одиночной и взаимной электромагнитной диссоциации ядер свинца с энергией 1.38 А ТэВ на БАК

План работ группы ИЯИ РАН по модернизации детектора

ALICE на 2012-2015 гг.

Предложение по снижению фоновой загрузки детектора T0 из-за после импульсов

Использование детектора T0 в качестве основного детектора для определения светимости пучка требует снижения фоновой загрузки детектора T0 из-за после-импульсов у используемых фотоумножителей ФЭУ-187. После-импульсы имеют большой временной интервал и большой разброс по параметрам даже в пределах одного типа фотоумножителей. Для решения этой задачи предлагается несколько возможных вариантов:

1. Замена фотоумножителей на ФЭУ с микроканальными пластинами. Это решает обе проблемы, но дорого, кроме того требует полной переработки конструкции и методических исследований.
2. Возможна частичная замена ФЭУ-187 на Hamamatsu R5506, близких по параметрам и размерам. Это требует проведения методических работ, связанных с исследованием характеристик новых ФЭУ и пригодности старых делителей для новых ФЭУ.
3. Дополнение настоящей конструкции черенковских детекторов тонкими (~5 мм) сцинтилляционными детекторами перед каждым радиатором. Эти детекторы будут работать на совпадение с черенковским и, таким образом, пропускать только сигналы, связанные с пролетом частиц через оба детектора, и отбрасывать после-импульсы. Сцинтилляторы могут просматриваться магнитостойкими кремниевыми фотоумножителями (SiPM). Электроника в этом случае добавляется элементами питания SiPM, усилителями-формирователями и воротами для сигналов с ФЭУ.

В настоящее время проведены первые испытания по возможности использования последнего метода.

Предложение по разработке черенковского детектора типа RICH для расширения импульсного интервала идентификации заряженных частиц

Для модернизации работающего детектора типа RICH (HMPID) на установке ALICE, который дает разрешение пионов и каонов только до импульсов около 3 ГэВ/с, группой ИЯИ РАН была разработана новая методика для идентификации заряженных частиц, основанная на использовании в черенковском детекторе типа RICH аэрогеля с низким показателем преломления около 1.05 в качестве радиатора и лавинных фотонных детекторов с MRS структурой. В двух тестовых сеансах измерений с прототипом детектора на пучке ускорителя PS в ЦЕРН было получено разделение пионов и каонов при импульсе 7 ГэВ/с около 5 сигма. Моделирование показывает, что высокое разрешение может быть получено для пионов и каонов до 10 ГэВ/с, а пионов и протонов до 14 ГэВ/с.

Работы по исследованию и улучшению параметров этого нового вида черенковского детектора (FARICH) будут продолжены в 2012-2015 гг.

Развитие экспериментальной методики исследования взаимодействий мюонных нейтрино и идентификации рождения тау-нейтрино в детекторе OPERA

Целью проекта является проведение исследований и получение новых знаний о нейтрино искусственного (нейтринный пучок из ЦЕРН) происхождения и процессов, вызываемых ими.

Размер пучка от ускорителя SPS, расположенного в ЦЕРН достаточно широкий и захватывает много экспериментов в Лаборатории, помимо OPERA, в том числе BOREXINO и LVD.

Подземные детекторы LVD и BOREXINO, являются монитором, определяющим интенсивность нейтринного пучка; установки способны регистрировать мюоны от взаимодействия нейтрино с веществом грунта.

Почти все нейтрино пролетают сквозь слой земной коры без каких-либо взаимодействий на своем пути, однако небольшая их часть, взаимодействует с ядрами вещества, рождает горизонтально движущиеся мюоны, проникающие сквозь десятки

метров грунта. Их хорошо видит не только OPERA (за три с лишним года наблюдений зарегистрировавшая десятки тысяч таких мюонов), но и другие детекторы в лаборатории Гран Сассо: LVD и Borexino.

Расположение установок LVD и OPERA перпендикулярно оси направления прихода пучка. Фон от атмосферных мюонов в этом направлении мал, и выделить мюоны, образованные при взаимодействии нейтринного пучка из ЦЕРН с грунтом, окружающим детектор, сравнительно легко. Задача о получении характеристик мюонов, связанных с CNGS пучком, и сравнение их с характеристиками атмосферных мюонов является важной для выделения редких событий, в том числе с появлением тау-мезона.

Эксперимент LVD способен подтвердить или опровергнуть недавний результат по определению скорости нейтрино, опубликованный коллаборацией OPERA. Определение временных задержек между DAQ установки и GPS часами на поверхности, определение точного местоположения LVD, получение временной формы спила по мюонам на LVD, с хорошей точностью - одна из целей участников проекта.

Коллективом проекта разработаны и построены такие подземные установки как «Коллапс» АНС в соляной шахте в Украине, LSD (Жидкостной сцинтилляционный детектор) под Монбланом в Италии и LVD в лаборатории Гран Сассо; ведутся экспериментальные работы в области нейтринной астрофизики и физики космических лучей, а также физики взаимодействия нейтрино различных типов с ядрами; изучаются свойства потока ядерно - активных частиц, образуемых мюонами атмосферного и искусственного происхождения, с помощью сцинтилляционных установок.

Сотрудниками ИЯИ РАН на установке "Коллапс" были получены такие важные результаты как:

- 1) измерен спектр мюонов космических лучей до энергий 10 ТэВ;
- 2) изучено сечение неупругого рассеяния мюонов на средних ядрах до энергий ~ 5 ТэВ;
- 3) измерена зависимость множественности нейтронов и пионов от энергии электромагнитных и адронных каскадов вплоть до 3 ТэВ.

На установке LVD получены следующие фундаментальные результаты:

- 1) измерена кривая глубина – интенсивность мюонов до 18 км.в.э.;

2) получено зарядовое отношение вертикальных мюонов космических лучей с энергиями $E > 1.3 \text{ ТэВ}$;

3) определен удельный выход нейтронов, генерируемых одиночными мюонами, мюонными группами и ливнями;

4) Получены сезонные модуляции потока мюонов космических лучей на детекторе LVD за период с 2001 по 2008 г.

Основные цели и задачи эксперимента

Измерение мюонов, ливней от мюонов, нейтронов на детекторах LVD, BOREXINO и OPERA от пучка позволит уточнить данные по кривой глубина-интенсивность, изучить поведение частиц, что так важно при моделировании процессов взаимодействия частиц с веществом. Нейтроны же, в свою очередь, являются фоном для таких исследований как регистрация темной материи. Оценка вклада нейтронов от мюонов, рожденных нейтрино в эксперимент приведет к тому, что данный параметр можно будет учитывать во всех подземных экспериментах. Благодаря тому, что в подземной лаборатории Гран Сассо находятся несколько абсолютно различных по своей структуре детекторов и тому, что они располагаются на определенном, заранее известном расстоянии друг от друга, на этих установках можно будет разделить мюоны от нейтрино космического происхождения и мюоны от пучка только по геометрии прихода частиц, а также проверить правильность отбора, используя базу данных в ЦЕРН по абсолютной временной калибровке ускорительного пучка.

2. Этапы реализации проекта.

- Выделение и анализ событий, обусловленных взаимодействиями мюонных нейтрино от пучка из ЦЕРН, на установке LVD;
- Поиск коррелированных событий по времени на установках LVD, BOREXINO и OPERA;
- Определение временных задержек между внутренними часами установки LVD и GPS часами на поверхности;
- Определение скорости нейтрино по данным установки LVD;
- Выделение нейтронов от мюонов из ЦЕРН и от околоразрывных мюонов (атмосферные космические лучи);

- Изучение взаимодействий нейтронов;
- Анализ развития ливней от мюонов, рожденных в нейтринном пучке.

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

Одной из основных задач эксперимента NA61/SHINE в ЦЕРН является поиск критической точки сильно взаимодействующей ядерной материи и детальное исследование начала деконфаймента. В рамках данного эксперимента ИЯИ РАН отвечает за разработку и создание переднего адронного калориметра, участвует в пучковых сеансах, анализе и обработке экспериментальных данных.

В 2011г. для адронного калориметра была полностью собрана центральная часть калориметра из 16 модулей и 6 модулей для внешней части.

Проведена разработка и изготовлены 22 комплекта аналоговой и цифровой электроники для модулей калориметра. Проведено успешное испытание электроники на пучке NA61 и ее интеграция в систему сбора и обработки данных.

Разработан и изготовлен А-детектор для измерения изотопного состава вторичного ионного пучка время-пролетным методом. Получено временное разрешение на тестовом пучке адронов 40 пикосекунд.

Проведены исследования прототипа переднего адронного калориметра и А-детектора на адронном пучке при низких энергиях 1-6 ГэВ.

Проведено полное моделирование отклика калориметра при разных энергиях и разных типов частиц с использованием разработанного в ИЯИ кода SHIELD в качестве генератора событий.

Разработан и интегрирован в систему сбора данных пакет программ для контроля качества экспериментальных данных в эксперименте NA61.

ИЯИ РАН участвовал в проведение сеанса по набору данных в реакции $p+(T2K$ мишень) при 31 ГэВ/с для нейтринного эксперимента T2K. Кроме того, получены данные при низкой энергии в реакции $p+p$ при 13 ГэВ/с, а также для исследования $p+p$ реакции при 158 ГэВ/с с высокой статистической точностью. Успешно проведен тестовый сеанс по

исследованию фрагментированного пучка легких ядер для эксперимента NA61. В ноябре 2011г. будут проведены измерения на ядрах бериллия на бериллиевой мишени.

В 2012 г. будут продолжены измерения на ионных пучках, сначала на фрагментированных из пучка свинца легких ядрах бериллия и углерода, затем на более тяжелых ядрах.

План работ группы ИЯИ РАН по модернизации эксперимента

NA61 на 2012-2015 гг.

1. Изготовление, наладка и испытание на тестовом пучке недостающих модулей внешней части адронного калориметра.
2. Получение широкого набора ядер от фрагментации пучка свинца.
3. Усовершенствование программного обеспечения эксперимента.
4. Разработка системы контроля качества данных.
5. Изучение параметров лавинных фотонных детекторов нового вида с увеличенным быстродействием.

Исследование ультраредкого распада заряженных каонов $K^- \rightarrow \pi^- \nu \bar{\nu}$ на установке NA62 SPS CERN

Основной целью экспериментальной установки NA62 является измерение вероятности ультраредкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$. Это позволит с высокой точностью проверить предсказания Стандартной Модели. Установка использует несепарированный пучок высокой интенсивности с импульсом 75 ГэВ/с, $3.3 \cdot 10^{12}$ протонов за сброс.

Мюонный годоскоп (далее MuV — Muon Veto) входит в триггера нулевого уровня, и служит для подавления мюонов от распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$, ($Br \approx 63\%$). Так как установка работает с пучком сверхвысокой интенсивности, годоскоп должен обладать высоким временным разрешением (порядка 1 нс) для минимизации мёртвого времени установки. Эффективность регистрации мюонов должна превышать 99% для подавления мюонного фона в более чем 100 раз.

Годоскоп состоит из четырёх квадрантов. В настоящее время изготовлен и испытан на пучке прототип мюонного годоскопа, состоящий из одного квадранта.

В севнсах 2011 года проведены методические работы с прототипами детекторов будущей установки NA62, сформулированы предложения по модернизации имеющихся детекторов и электроники. Проведены испытания улучшенного (по временному разрешению) прототипа триггерного мюонного годоскопа, изготовленного ИЯИ РАН и ИФВЭ.

Основные этапы работы на 2012- 2015 гг.

Создание и испытание прототипов и рабочих детекторов в 2012 г. Подготовка установки к набору статистики в 2013 г. Получение требуемых рабочих характеристик создаваемых приборов. Сравнение получаемых данных с результатами теоретических расчётов. Набор статистического материала в 2013-2014 гг. Обработка, получение и публикация экспериментальных результатов в 2014-2015гг.

Информационно-вычислительное обеспечение исследований с использованием технологий ГРИД

Особенность экспериментов на LHC – чрезвычайно большой поток информации, поступающих с электронных каналов детекторных систем. Так, полный поток данных от установки CMS превышает 1 Ббит/с, что составляет примерно 1 Петабайт в год. Более того, после различных этапов обработки объем первоначальной информации будет увеличиваться примерно наполовину, так как к “сырым” данным будут добавляться характеристики реконструированных объектов. Поэтому в CMS разрабатывается гибкая модель хранения, обработки и передачи данных, обеспечивающая доступ к информации любого уровня всем пользователям.

В основу этой модели положена концепция распределенных вычислительных систем, объединенных в центры (кластеры) различного уровня или яруса (Tier). Эти ярусы различаются как по возложенным на них задачам, так и по компьютерным мощностям (см. таблицу 1). Эти уровни не имеют жесткой иерархической структуры, а представляют собой объединение нижестоящих ярусов, которые взаимодействуют друг с другом, с определенным вышестоящим ярусом или даже напрямую с любым другим ярусом.

Таблица 1. Необходимые компьютерные ресурсы к запуску CMS

Tier	CPU, kSI2K	Disk,	Active tape, TB	Archive tape, TB	Tape I/O, MB/s

		ТВ			
Tier-0 (CERN)	3176	309	2246	0	800
Tier-1	2100	1450	1070	0	400
Tier-2	310	190	0	115	100

Естественным условием нормального функционирования такой системы является наличие высокоскоростных компьютерных коммуникаций между уровнями всех рангов. Поэтому ближайшая задача – создание быстрых внутренних связей – порядка 1 Гб/с между институтами – участниками проекта и изучение внешних коммуникаций с ЦЕРН.

В этой связи особое место занимает задача настройки и поддержания баз данных, так как вся экспериментальная информация LHC будет доступна исключительно через централизованные системы хранения и распределения данных. БД должны обеспечивать не только надежное хранение информации, удобный интерфейс для его поиска и анализа, но минимизировать скорость доступа к ней, время обработки пользовательского запроса и отклика на него. В настоящее время одной из приоритетных задач является участие в создании БД, применяемых в CMS, оптимизации быстродействия протоколов доступа к ним и взаимодействия БД друг с другом.

Сотрудниками Вычислительного центра ИЯИ РАН и Лаборатории моделирования физических процессов Отдела физики высоких энергий проводится работа по созданию в Институте кластера распределенной информационно-вычислительной сети Россия / БАК в рамках современной технологии ГРИД.

Кластер Ru-Troitsk-INR-LCG2 включен в сеть ГРИД, статистика его работы в оперативном режиме представлена на координационном сайте <http://goc.grid.sinica.edu.tw/gstat>.

Дальнейшее наращивание ресурсов кластера ИЯИ РАН и обеспечение его надежной работы является приоритетной задачей для участия в этом проекте.

Разработка измерителя продольного распределения заряда в сгустках для Linac-4 ЦЕРН

В настоящее время в ЦЕРНе в рамках программы модернизации Большого адронного коллайдера начато сооружение линейного ускорителя отрицательных ионов водорода Linac-4. На первом этапе планируется использовать новый линейный ускоритель с выходной энергией 160 МэВ в качестве инжектора в бустер протонного синхротрона. В дальнейшем предполагается построить новый протонный синхротрон вместо существующего и осуществлять в него инжекцию непосредственно из линейного ускорителя, увеличив энергию последнего до нескольких ГэВ.

Между ИЯИ РАН и ЦЕРН заключено соглашение, по которому ИЯИ РАН должен разработать, изготовить, провести лабораторные испытания, поставить в ЦЕРН, смонтировать и наладить измеритель продольного распределения заряда в сгустках для линейного ускорителя Linac-4, а также провести измерения параметров пучка на стенде, который включает источник ионов, RFQ и канал транспортировки. В дальнейшем планируется использование измерителя на разных участках ускорителя по мере его запуска с окончательной установкой на энергии 160 МэВ. Выполнение работы было запланировано в несколько этапов, в том числе: 2009 год – разработка проекта измерителя, 2010 год – изготовление, лабораторные испытания в ИЯИ РАН и поставка в ЦЕРН, 2011 год – сборка, монтаж, наладка и проведение измерений на выходе RFQ и канале транспортировки.

В 2009 году был выполнен этап разработки. Согласование документации было завершено в марте 2010 года. В 2010 году измеритель был изготовлен, проведены его лабораторные испытания с участием представителя ЦЕРН и в конце года он был отправлен в ЦЕРН. Первые исследования на стенде на выходе RFQ при энергии 3 МэВ ранее были запланированы на апрель 2011 года. Однако, в связи с задержкой создания стенда, обусловленной задержкой окончания изготовления RFQ, указанные работы перенесены на 2012 год. Совместно с ЦЕРН было принято решение в 2011 году осуществить сборку и лабораторные испытания измерителя в ЦЕРН и подготовить детектор к монтажу на стенде, таким образом, чтобы монтажные работы были в дальнейшем выполнены сотрудниками ЦЕРН самостоятельно без участия представителей ИЯИ РАН. Указанные работы были успешно выполнены в октябре 2011 года. В течение 2011 года также велись работы по разработке и отладке системы контроля измерителя на стенде в ИЯИ РАН. Разработка системы была завершена и в октябре 2011 года разработанная система была интегрирована в систему контроля ускорителя Linac-4. По состоянию на сегодняшний день проведение совместных исследований на выходе RFQ при энергии пучка 3 МэВ

планируется провести в апреле-мае 2012 года. В сентябре 2013 года планируется проведение исследований на выходе ускорителя с трубками дрейфа при энергии 50 МэВ, а в ноябре 2013 года – установка измерителя и проведение исследований на выходе ускорителя при энергии 160 МэВ.

Созданный измеритель имеет фазовое разрешение около 1 градуса на частоте 352,2 МГц, что эквивалентно временному разрешению лучше 10 пикосекунд при импульсных токах пучка десятки миллиампер. Конструктивной особенностью является то, что измеритель вписан в ограниченную геометрию диагностического стенда, создаваемого в ЦЕРН для исследований пучка в процессе поэтапного запуска ускорителя Linac-4.

ИЯИ РАН является единственным институтом, в котором реально разрабатываются и изготавливаются измерители данного типа. Высокий научно-технический уровень подтверждается тем, что создание подобных измерителей проводилось и проводится в ИЯИ РАН для крупнейших ускорительных центров мира (SSC, ЦЕРН, DESY, KEK, SNS, J-PARC). В частности, для ЦЕРН измерители этого типа ранее были созданы для линейного ускорителя протонов Linac-2 и линейного ускорителя тяжелых ионов Linac-3. Также имеется обращение LANSCE (Лос-Аламосская национальная лаборатория, США) с просьбой о разработке и изготовлении измерителей данного типа, проявляется интерес со стороны ESS (Европейский нейтронный источник, Швеция).

Экспериментальное исследование продольной динамики пучка в линейных резонансных ускорителях является одной из важнейших задач, которые необходимо решать при запуске и настройке ускорителей, особенно ускорителей с высокой интенсивностью пучка. Измеритель продольного распределения заряда в сгустках (анализатор формы сгустков, фазовый анализатор, Bunch Shape Monitor) является уникальным инструментом, который позволяет непосредственно измерять микроструктуру ускоренного пучка, по которой можно определять и другие характеристики, например продольный эмиттанс, а также параметры ускоряющих полей. Измерители этого типа были разработаны в ИЯИ РАН и нашли применение в ряде ведущих ускорительных центров (SSC, ЦЕРН, DESY, KEK, SNS, J-PARC). Поскольку тип ускоряемых частиц, параметры пучка и частоты ускоряющих полей на ускорителях различны, то каждый измеритель требует специальной разработки и является уникальным. Особенностью требований к измерителю для ускорителя Linac-4 является тип частиц – отрицательные ионы водорода, широкий диапазон энергии пучка от 3 МэВ до 160 МэВ,

широкий диапазон интенсивностей (импульсный ток до 65 мА), а также малые габариты, поскольку решение об использовании измерителя было принято уже после определения состава и конфигурации измерительного стенда.

Согласно соглашению между ИЯИ РАН и ЦЕРН в 2009 году выполнялась разработка технического проекта. Результаты разработки были приняты и одобрены ЦЕРН в марте 2010 года. Начиная с марта по октябрь 2010 велось изготовление как самого измерителя, так и его электроники в ИЯИ РАН. С октября по декабрь 2010 года проводились лабораторные испытания измерителя в ИЯИ РАН с участием представителя ЦЕРН. В конце декабря 2010 года измеритель был отправлен в ЦЕРН. Первые исследования на стенде на выходе RFQ при энергии 3 МэВ ранее были запланированы на апрель 2011 года. Однако, в связи с задержкой создания стенда, обусловленной задержкой окончания изготовления RFQ, указанные работы откладываются. Совместно с ЦЕРН было принято решение в 2011 году осуществить сборку и лабораторные испытания измерителя в ЦЕРН и подготовить детектор к установке на стенде, таким образом, чтобы монтажные работы были в дальнейшем выполнены сотрудниками ЦЕРН самостоятельно без участия представителей ИЯИ РАН. Сборка и лабораторные испытания были успешно выполнены в октябре 2011 года. Параметры измерителя, продемонстрированные при испытаниях, соответствуют заявленным в спецификации. Также в это время была выполнена работа по адаптации системы контроля измерителя в систему контроля стенда. На рисунке 9.1 показан измеритель на стенде при проведении лабораторных испытаний. На рисунке

9.2 показана стойка электроники и системы контроля измерителя. Трехмерное изображение канала диагностики стенда RFQ с интегрированным в него измерителем продольного распределения показано на рисунке 9.3.



Рисунок 9.1 —Стенд лабораторных испытаний измерителя в ЦЕРН.



Рисунок 9.2 —Стойка электроники и системы контроля измерителя.

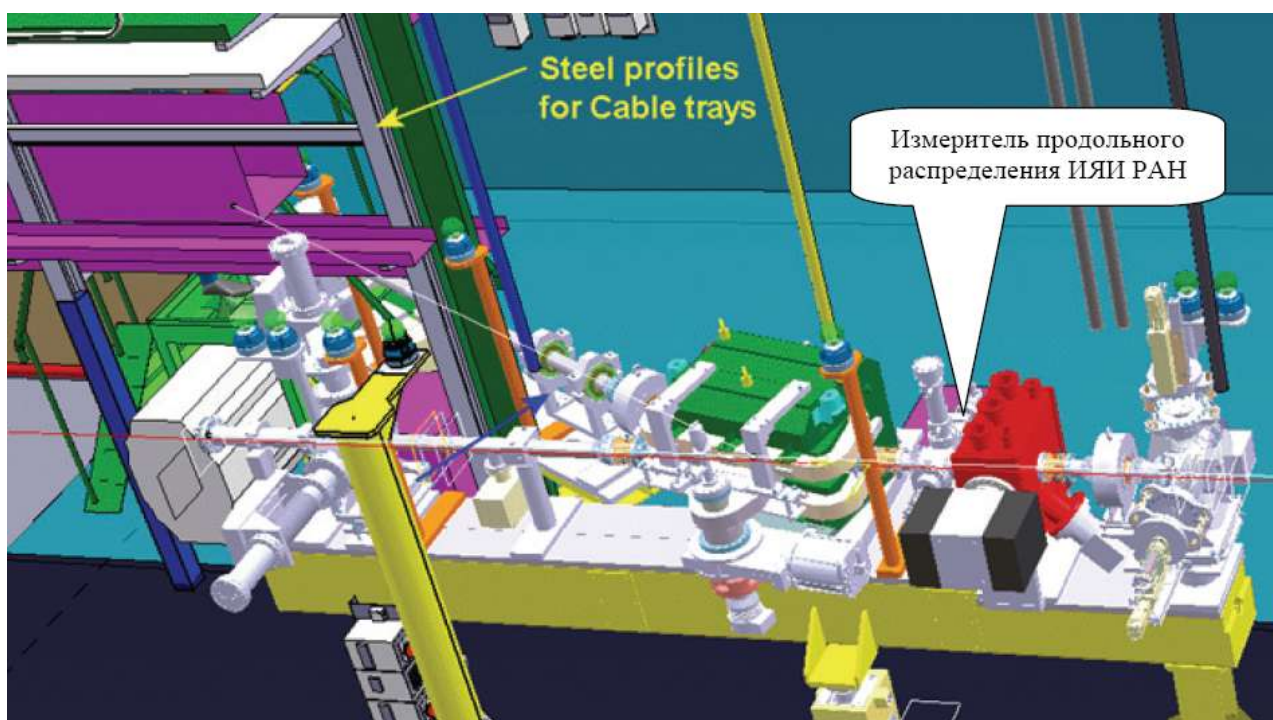


Рисунок 9.3 —Трехмерный вид канала с разработанным измерителем.

Основным результатом работы в 2011 году является сборка измерителя в ЦЕРН, успешные лабораторные испытания, интеграция системы контроля измерителя в систему контроля стенда. Измеритель подготовлен к установке на стенде на выходе RFQ.

Результаты 2011 года носят промежуточный характер. Однако в целом результаты выполненных для ЦЕРН работ по разработке и созданию измерителя могут и будут использованы для дальнейших работ в данной области. В частности, полученные результаты уже нашли практическое применение при разработке и создании измерителей продольного распределения для SNS (Ок-Риджская национальная лаборатория, США), Японского исследовательского ускорительного комплекса (J-PARC).

Эффективность выполненного этапа работы проявится после реального использования измерителя на ускорителе Linac-4. Из нашего опыта можно утверждать, что будет получена информация о параметрах и характеристиках пучка, не доступная иными методами. Эта информация поможет проводить настройку и исследование продольного движения частиц в ускорителе, что в конечном итоге позволит получить качественный высокоинтенсивный пучок для его инжекции на первом этапе в бустер протонного синхротрона, а на втором – после повышения энергии непосредственно в

новый протонный синхротрон. Оба указанных этапа являются этапами модернизации всего комплекса БАК.

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

Эксперимент **ХАДЕС** направлен на поиск сигналов восстановления киральной симметрии в столкновениях релятивистских тяжелых ионов.

Исследование рождения диэлектронов в квазисвободных нейтрон-протонных столкновениях

Модификация масс векторных мезонов, рождённых в ядро-ядерных столкновениях, является одним из наиболее перспективных сигналов восстановления киральной симметрии - фундаментальной симметрии КХД, спонтанно нарушенной в физическом вакууме.

i -Теоретическая мотивация

Наиболее распространенными являются адронные распады векторных мезонов, однако их недостатком являются искажающие перераспределения адронов в ядерной среде.

Этого недостатка лишены распады векторных мезонов в лептонную пару. Поскольку лептоны не участвуют в сильных взаимодействиях, то они несут информацию в детектор практически без искажений. Таким образом, свойства дилептонной пары отражают свойства векторного мезона на момент распада.

Поскольку регистрируемый спектр дилептонов является наложением всех процессов, которые происходят в ходе ядерной столкновений, для поиска нетривиальных эффектов модификации векторных мезонов необходим тщательный контроль за всеми «стандартными» источниками лептонных пар. К ним относятся:

- Далиц-распады ρ^0 - и η -мезонов;
- распады Δ -резонансов;
- процессы инклюзивного и эксклюзивного тормозного излучения (bremsstrahlung) в нуклон-нуклонных взаимодействиях.

Среди этих процессов тормозное излучение является наиболее плохо изученным как экспериментально, так и теоретически.

Следует отметить, что перечисленные процессы являются доминирующими для лабораторных энергий столкновений 1-4 ГэВ/нуклон. При переходе к большим энергиям, появляется ряд других важных источников дилептонов: пионная аннигиляция, тормозное излучение в пион-пионном рассеянии, излучение из кварк-глюонной фазы и т. д.

Первые данные по выходу дилептонов в столкновения релятивистских ядер были представлены коллаборацией DLS. Этот пионерский эксперимент обнаружил нетривиальный эффект, решение которого заняло почти два десятилетия. В столкновениях ядер углерода при энергии налетающих ядер 1,04 ГэВ/нуклон обнаружено значительное превышение выхода дилептонов над ожиданиями от предполагаемого вклада от Далиц-распадов η -мезонов. Это превышение составляет фактор 7.

Очевидно, что сразу возникает вопрос, насколько хорошо известны сечения рождения η -мезона, поскольку для того, чтобы снять противоречие с наблюдаемым спектром достаточно увеличить значение сечения. Однако выход η -мезонов при таких энергиях и в точно таких системах изучался коллаборацией TAPS по двухфотонным распадам η -мезонов. Таким образом, сечение выхода η -мезонов находится под контролем.

При осмыслении данных, полученных DLS, возникает вопрос о проявлении сугубо ядерных эффектов при таких энергиях в достаточно легких системах. Например,

недостающим источником может служить процесс аннигиляции заряженных пионов, проходящий в модели векторной доминантности с формированием векторного мезона, который, в принципе, с учетом эффектов восстановления спонтанно нарушенной киральной симметрии мог бы насытить область малых масс дилептонного спектра. Однако целый ряд феноменологических вычислений, и исследований в рамках транспортных моделей, в том числе с привлечением различных сценариев модификации свойств векторных мезонов в окружающей среде не позволил удовлетворительно описать наблюдаемый спектр. Серьезным ограничением на такой процесс является недостаточная множественность пионов в системе соударяющихся ядер углерода. Очевидно, проявление кварк-глюонной плазмы при таких энергиях относится скорее к фантастическим предположениям.

Эксперимент ХАДЕС продолжил изучение выхода диэлектрон в системе углерод-углерод при энергии налетающих ядер 1 ГэВ на нуклон. Данные ХАДЕС независимо подтвердили результаты эксперимента DLS: выход дилептонов в диапазоне инвариантных масс 150—500 МэВ/c² превышает ожидания от распадов η -мезонов в 7 раз.

Поскольку акцептанс установок ХАДЕС и DLS сильно отличается, то было произведено сравнение данных двух экспериментов в акцептансе DLS и обнаружено хорошее согласие распределений по инвариантной массе и поперечному импульсу.

Таким образом, в двух независимых измерениях был найден загадочный эффект, и отсутствовало его теоретическое объяснение.

Однако уже в начале 90-х годов высказывались идеи о важности учёта другого процесса для корректного описания выхода дилептонов, а именно тормозного излучения (*bremsstrahlung*) в нуклон-нуклонных столкновениях.

Традиционно, процесс тормозного излучения рассматривался в рамках так называемого приближения мягких фотонов, которое предполагает факторизацию сильных и электромагнитных процессов. За счет своей простоты это приближение позволяет с легкостью рассчитать сечение тормозного излучения. Однако в действительности это приближение справедливо лишь для очень малоэнергичных и лёгких виртуальных фотонов, а следовательно условия, необходимые для корректного применения приближения мягких фотонов практически не выполнимы.

Более корректной является полная кванто-механическая трактовка процесса тормозного излучения в моделях однобозонного обмена. Суть такого подхода заключается в том, что допускается эмиссия виртуальных фотонов из внутренних линий обменных мезонов.

Несколько лет назад в работе был осуществлен пересмотр теоретических предсказаний для выхода дилептонов в нейтрон-протонных столкновениях за счет механизма тормозного излучения в рамках модели однобозонного обмена. Результаты работы предсказывают сечения этого процесса, превышающие существующие теоретические величины в 4 раза. Следует отметить, что вплоть до настоящего времени ведется дискуссия по поводу реальных величин сечения этого процесса.

Несомненно, лучшим способом проверить предсказания является непосредственное сравнение выхода дилептонов в нейтрон-протонных столкновениях с предсказаниями. Однако в работе проведено сравнение предсказаний транспортной модели HSD с данными коллабораций DLS и ХАДЕС. Как уже обсуждалось выше, все предыдущие попытки такого рода оканчивались неудачей. Новизна этой работы заключалась в том, что сечения процесса тормозного излучения (являющиеся, по сути, фиксированными параметрами моделей такого рода) были подогнаны для воспроизводства результатов работы. В результате, предсказываемые спектры демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными данными. Следует отметить, что информативность такого подхода весьма ограничена. В частности, трактовка процессов в транспортной модели сопряжена с

рядом трудностей. В целом, работа явно показывает важность процесса тормозного излучения для описания спектра при энергии 1 ГэВ/нуклон и служит, по меньшей мере, косвенным указанием на то, что расхождение данных и теории имеет своей причиной неполное описание нейтрон-протонного канала.

Что касается данных по выходу дилептонов в нейтрон-протонных столкновениях, то до последнего времени они попросту отсутствовали. Коллаборация DLS провела исследование выхода диэлектронных в дейтрон-протонных столкновениях, однако выделение канала квазисвободных нейтрон-протонных столкновений не производилось.

Очевидно, при существующей неопределённости значимости процесса тормозного излучения в нуклон-нуклонных столкновениях, необходимо измерение выхода диэлектронных в элементарных нуклон-нуклонных столкновениях с целью проверки теоретических предсказаний.

Такое исследование было проведено на установке ХАДЕС.

ii. Эксперименты по рождению электрон-позитронных пар в нуклон-нуклонных столкновениях

Установка ХАДЕС расположена в исследовательском центре GSI, г. Дармштадт, Германия. Детектор представляет собой магнитный спектрометр, обеспечивающий регистрацию электронов и позитронов в диапазоне полярных углов 18° – 85° и практически полном азимутальном угле (на рисунке ниже). Основная часть экспериментальной программы направлена на исследование образования электрон-позитронных пар (диэлектронных) в нуклон-нуклонных, нуклон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях при энергиях 1–2 ГэВ/нуклон. Также запланированы эксперименты с пионным пучком.

Измерение выхода диэлектронных в протон-протонных столкновениях при кинетической энергии налетающих протонов 1,25 ГэВ было проведено коллаборацией ХАДЕС в 2006 году. Поскольку выбранная энергия находится ниже порога образования η -мезона (который составляет 1,27 ГэВ), единственными источниками, дающими вклад в рождение пар, являются Далиц-распады π^0 и Δ , а также процесс тормозного излучения, вклад которого, однако, при таких энергиях ожидается весьма малым по сравнению с pr -каналом.

В 2007 г. коллаборация ХАДЕС продолжила изучение нуклон-нуклонных реакций, осуществив эксперимент с дейтронным пучком, налетающим на протонную мишень. Основной задачей данного эксперимента было исследование образования лептонных пар в pr -канале при той же номинальной энергии столкновения, что и в случае pp -эксперимента.

В рамках импульсного приближения, столкновение дейтрона высоких энергий с нуклоном сводится к квазисвободному нуклон-нуклонному взаимодействию: один из нуклонов в составе дейтрона не участвует в реакции и выступает как зритель. Поскольку характерные значения импульса Ферми невелики по сравнению с импульсом пучка, зрительский нуклон несет приблизительно половину импульса дейтрона и вылетает под малым углом в лабораторной системе координат. Эти особенности позволяют изучать квазисвободный pr -канал, регистрируя зрительский протон. Для того чтобы обеспечить возможность таких измерений, установка ХАДЕС была дополнена годоскопом малых углов Forward Wall (FW), в создании которого принимала активное участие группа ИЯИ РАН. В ходе dp -эксперимента он был расположен в 7 метрах от мишени и обеспечивал регистрацию частиц в диапазоне углов от 0.33° до 7.17° . Монте Карло моделирование dp -реакции показало, что приблизительно 90% протонов-зрителей попадают в акцептанс FW.

Основной экспериментальный триггер был сконфигурирован таким образом, что регистрация диэлектронной пары происходила в совпадении с заряженной частицей в

FW. Измерения времени пролета и координаты с помощью FW, позволило устранить ложные сигналы и подавить вклад квазисвободного pp -рассеяния, выбирая частицы, удовлетворяющие кинематике спектрометра.

iii. Анализ данных и полученные результаты

В 2009 г. основная деятельность была направлена на получение финальных результатов дейтрон-протонного сеанса, сравнение экспериментальных спектров с теоретическими предсказаниями и подготовку результатов для публикации.

Прежде всего, для проверки применимости импульсного приближения был проведен ряд исследований. В частности, было проведено сравнение угловых распределений спектрометра в FW с предсказаниями импульсного приближения, реализованными в Монте-Карло генераторе PLUTO ,

Из рисунка следует, что импульсное приближение хорошо описывает полученные данные. Таким образом, можно трактовать полученные данные в дейтрон-протонных столкновениях с регистрацией протона-спектрометра как результат квазисвободных нейтрон-протонных столкновений.

Спектр инвариантных масс диэлектрон, измеренный в pp -столкновениях, приведен на рисунке ниже, верхняя часть (черные кружки). Комбинаторный фон восстановлен при помощи регистрации пар одноименно заряженных лептонов и исключен из полного спектра.

Распределение e^+e^- -пар по инвариантным массам, измеренное в dp -сеансе, с выделением квазисвободных pr -столкновений представлено на рис.3, нижняя часть (чёрные кружки). Хорошо видно значительное различие между спектрами pp - и pr -реакций. Спектр инвариантных масс, измеренный в pr -столкновениях, простирается вплоть до $700 \text{ МэВ}/c^2$ и демонстрирует усиленный выход пар с инвариантными массами $M > 140 \text{ МэВ}/c^2$. Вследствие Ферми-движения внутри дейтрона, энергия, доступная в pr -реакции, может превышать значение $1,25 \text{ ГэВ}$. Таким образом, можно предположить, что часть наблюдаемой разницы в выходе пар может быть связана с процессами подпорогового рождения (образование η -мезона и, возможно, барионных резонансов тяжелее Δ).

На рисунке хорошо видно, что данные по выходу диэлектрон в протон-протонном канале практически насыщаются Далиц-распадами π^0 и распадами Δ .

В то же время, данные по выходу диэлектрон в нейтрон-протонном канале (нижняя часть рисунка выше) не могут быть описаны процессами распада Δ -резонанса. Учет подпорогового рождения η -мезонов также не способен дать удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Сплошной кривой на рисунке выше показаны результаты расчетов в рамках модели однобозонного обмена. Как видно, даже учет механизма тормозного излучения не способен насытить экспериментальный спектр. С другой стороны, наблюдается переоценка выхода диэлектрон в протон-протонном канале, а также в нейтрон-протонных столкновениях в области масс $\sim 140 \text{ МэВ}/c^2$.

Таким образом, результаты измерений в нейтрон-протонном канале продемонстрировали наличие нетривиальных источников диэлектрон. Описание выхода диэлектрон в рамках модели однобозонного обмена, хотя и предсказывает большую величину выхода, не способно удовлетворительно описать полученные данные.

Результаты работы направлены для публикации в Phys. Rev. Lett.

а. Моделирование электромагнитного калориметра

i. Калориметр для ХАДЕС

Обладая прекрасными возможностями регистрации заряженных частиц, эксперимент ХАДЕС лишен возможности детектировать фотоны. Регистрация фотонов позволит методом инвариантных масс восстанавливать распады нейтральных пи и эта мезонов. Это необходимо для понимания вклада распада нейтральных мезонов в регистрируемый диэлектронный спектр.

Для создания электромагнитного калориметра ХАДЕС будут использованы существующие блоки калориметра установки OPAL, прекратившего свою деятельность. Материалом калориметра является свинцовое стекло марки CEREN 25. Принцип работы калориметра основан на черенковском излучении: налетающая частица инициирует электромагнитный ливень, частицы которого излучают черенковские фотоны. Каждый калориметрический блок оснащен фотоумножителем. Таким образом, измерение энергии фотона основано на пропорциональности амплитуда с фотоумножителя и энергии налетающей частицы.

Помимо реконструкции нейтральных мезонов важной функцией калориметра будет разделение электронов и адронов при больших величинах импульса частиц. В то время как электрон теряет свою энергию практически полностью в материале калориметра, адроны высоких энергий теряют лишь часть энергии. Кроме того, поскольку черенковское излучение является пороговым процессом, калориметр обладает плохим откликом к адронам, обеспечивая их режекцию.

Таким образом, создаваемый калориметр будет обеспечивать регистрацию фотонов, что позволит изучать выходы нейтральных мезонов, а также улучшить режекцию адронов для лучшей селекции лептонов.

Для изучения работы калориметра в условиях ядро-ядерных столкновений было разработано программное обеспечение.

i.. Экспериментальное исследование энергетического разрешения

В сентябре 2009 г. был проведен тестовый экспериментальный сеанс на пучке гамма-квантов в MAMI (г. Майнц, Германия). Целью тестового сеанса было измерение энергетического разрешения индивидуальных калориметрических блоков при энергиях фотонов в диапазоне 100 -1500 МэВ.

Блоки калориметра были расположены на вторичном пучке гамма-квантов, с энергией от нуля до энергии первичного пучка электронов. Интенсивность пучка экспоненциально спадала с ростом энергии гамма-квантов. Детекторы были расположены так, что пучок попадал в центр, перпендикулярно плоскости детектора. Диаметр пучка в точке пересечения с калориметрическим блоком составлял 6 мм.

Было проведено два дня измерений, с энергией первичного пучка 855 МэВ и 1508 МэВ.

Приведены результаты для энергетического разрешения в зависимости от энергии налетающего гамма-кванта для перечисленных конфигураций детектора. Результаты тестового пучка показывают, что наличие или отсутствие световода не оказывает значительного влияния на величину энергетического разрешения.

ii. Разработка программного обеспечения

Стандартное программное обеспечение установки ХАДЕС включает в себя два базовых компонента. Прежде всего, это программа HGeant, которая основывается на повсеместно используемом пакете GEANT3 и обеспечивает моделирование установки ХАДЕС. Программный пакет HYDRA необходим для анализа данных и реконструкции моделированных событий.

1. Описание калориметра в HGeant

Для обеспечения возможности моделирования отклика калориметра, оценки геометрического аксептанса, эффективности регистрации фотонов и возможности

режекции адронов, были созданы необходимые компоненты программного кода в HGeant. К ним относятся:

описание материалов всех частей калориметра: блоков свинцового стекла, майларовой пленки, латунных коробов;

детальное описание геометрии калориметра;

трассировка частиц в материале детектора;

вычисление энергетических потерь;

трассировка черенковских фотонов в индивидуальном блоке, которая включает в себя эффекты поглощения в среде и отражение от майларовой пленки;

моделирование рождения фотоэлектронов, учитывающее геометрию фотоумножителя и его спектральную эффективность;

создание выходных данных, которые представляют собой энергетические потери индивидуальных частиц и число фотоэлектронов для каждого блока.

2. Описание калориметра в HYDRA

В программном коде HYDRA был создан новый блок **emc**, предназначенный для обработки данных (как реальных, так и Монте-Карло), поступающих с электромагнитного калориметра. В настоящее время в этом блоке реализованы следующие классы:

HemcDigitizer - класс, ответственный за оцифровку данных Монте-Карло моделирования;

HEmcCal - класс, представляющий собой индивидуальный модуль с оцифрованным откликом;

HEmcClusterF - класс, обеспечивающий поиск кластеров (соседних блоков, в которых произошло развитие электромагнитного ливня);

HEmcCluster - класс, представляющий собой найденный кластер индивидуальных модулей;

HEmcDiphotonF - класс, обеспечивающий комбинацию найденных кластеров в пары фотонов;

HEmcDiphoton - класс, представляющий собой идентифицированную пару фотонов.

Перечисленные классы объединяются в одну программную библиотеку **libEmc**.

Следует отметить, что предусмотрена возможность как детального моделирования отклика калориметра (трассировка каждого отдельного черенковского фотона с последующей его регистрацией), так и быстрое моделирование, основанное на энергетических потерях частицы в калориметрическом блоке с последующей параметризацией энергетического разрешения. Последний вариант хорошо описывает отклик на фотоны и электроны, однако неприемлем для адронов.

iv. Результаты моделирования

Демонстрация геометрии калориметра и принципа его работы представлена на рисунке ниже. Показан отклик калориметра на единичный налетающий гамма-квант. Хорошо видно положение калориметра за плоскостью RPC-камер. Также можно видеть, что во всем в значительной части аксептанса калориметра частицы налетают на него под углом, достаточно близком к нормальному. Это важно с точки зрения реконструкции координат налетающей частицы.

Важной характеристикой является величина энергии поглощаемой в калориметре (иными словами величина утечек энергии). Получено распределение выделенной энергии для налетающего фотона с энергией 1 ГэВ. Отдельно приведены результаты для кластера 3 на 3 блока и всего калориметра. Видно, что в калориметре выделяется до 90-95% энергии налетающего фотона. Обнаружено увеличение утечек с ростом энергии налетающего фотона. Можно видеть, что эта величина не превышает 10% даже при

энергиях фотона в 10 ГэВ. Стоит отметить, что этот диапазон энергий значительно покрывает экспериментальные потребности физической программы ХАДЕС.

Реконструкция координат одиночного фотона как критерий качества работы калориметра и проверка созданного программного обеспечения приведена на рисунке ниже наблюдается хорошая линейность отклика.

v. Результаты по выходу фотоэлектронов и режекции адронов

Как уже обсуждалось, принципом работы исследуемого калориметра является регистрация черенковского света, излучаемого заряженными частицами, рожденными в результате электромагнитного ливня.

Как уже обсуждалось выше, в сентябре 2009 года был проведен экспериментальный тест энергетического разрешения калориметрических модулей. Одним из полученных результатов являлся похожий отклик на фотоны с энергией 580 МэВ и на космические мюоны (характерная энергия которых составляет 2 ГэВ).

Для тестирования созданного программного обеспечения и настройки ряда параметров моделирования, исследовался отклик индивидуального блока калориметра.

На рисунке ниже приведено распределение количества фотоэлектронов, рожденных при облучении индивидуального блока мюонами с энергией 2 ГэВ и фотонами с энергией 580 МэВ.

Хорошо видно, что среднее число рожденных фотоэлектронов для космических мюонов и гамма-квантов с энергией в 580 МэВ достаточно близко. Таким образом, моделирование калориметра находится в согласии с экспериментальными данными.

Как уже обсуждалось выше, одной из важнейших задач калориметра является разделение адронов и лептонов при больших значениях импульса. Для исследования качества этого разделения был исследован отклик калориметра на пионы, фотоны и электроны при одинаковых значениях импульса налетающей частицы. Результаты этого исследования представлены на рисунке ниже. Как следует из рисунка наблюдается разделение частиц при всех значениях импульса. Однако если при импульсах менее 1 ГэВ существует перекрытие откликов, то при больших значениях импульса оно становится ничтожным, обеспечивая очень высокую степень режекции адронов. Таким образом, результаты моделирования показывают, что калориметр удовлетворяет поставленной задаче.

Объектом эксперимента **HADES** является исследование рождения электрон-позитронных пар в квазисвободных нейтрон-протонных столкновениях; разработка и моделирование электромагнитного калориметра. В 2010 году работа по проекту ХАДЕС группой ИЯИ РАН проводилась по двум основным направлениям:

- подготовка экспериментальной установки ХАДЕС после проведенной модернизации к сеансам по исследованию выходов электрон-позитронных пар в реакциях столкновений ядер серебра и золота;
- разработка, моделирование и тестирование электромагнитного калориметра, создаваемого для установки ХАДЕС.

В 2010 г. группа ИЯИ РАН участвовала в запуске установки ХАДЕС после ее существенной модернизации, проводимой в течение последних трех лет, необходимой для проведения на ней исследований с тяжелыми ядрами. В 2010 г. было проведено 4 тестовых сеанса с участием группы ИЯИ на установке ХАДЕС - в июле (пучки Ca^{38} , U^{238} при энергиях 1.25 ГэВ/нуклон); в сентябре (пучок Ni^{64} при энергии 1.25 ГэВ/нуклон); в октябре

(пучок U^{238} при энергии 1.25 ГэВ/нуклон) и в ноябре (пучок Au^{197} при энергии 1.1 ГэВ/нуклон).

В 2010г. проведено моделирование отклика электромагнитного калориметра необходимое для исследования его возможностей и отработки алгоритмов реконструкции нейтральных мезонов. Проводились работы по исследованию модулей калориметра на космике и на тестовых пучках.

Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI

Передний адронный калориметр фрагментов (Projectile Spectator Detector –PSD), является одной из основных систем установки CBM. Для определения центральности в ядро-ядерных взаимодействиях калориметр фрагментов должен измерять с хорошей точностью число нуклонов налетающего ядра, которые не взаимодействовали с ядрами мишени.

Калориметр располагается на расстоянии 15 метров от мишени и имеет полный поперечный размер 120 м (ширина) и 90см (высота). Калориметр состоит из 107 модулей, каждый из которых имеет поперечный размер 10 x10 см и полную длину порядка 6 ядерных длин. Модуль представляет собой набор из 60 слоев свинцовых и сцинтилляционных пластин толщиной 16 и 4 мм, соответственно. К настоящему времени для эксперимента CBM изготовлен прототип супермодуля калориметра, состоящий из 9 модулей и проведены исследования отклика калориметра в диапазонах энергий налетающих адронов 4 -160 ГэВ на пучках эксперимента NA61 и T10 в ЦЕРНе. В измеренном широком диапазоне энергий нет эффекта насыщения, т.е. при выбранном соотношении толщины свинцовой пластины к толщине сцинтилляционной пластины калориметр практически полностью компенсационный.

Исследование коллективных эффектов и ненуклонных степеней свободы в ядрах и переходных процессах в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами (проект NICA MPD)

Для определения центральности столкновения и для прецизионного отбора событий при поиске флуктуаций в области критической опалесценции сотрудниками ОИЯИ и ИЯИ РАН был разработан адронный калориметр ZDC для регистрации фрагментов пучка, который будет расположен в области малых углов на расстоянии около 3 м вблизи пучка с обеих сторон от точки взаимодействия пучков коллайдера, Главным отличием в использовании калориметра в проекте MPD/NICA от подобных разработок для экспериментов NA61 и CBM является его работа при существенно более низких энергиях около 1-6 ГэВ. Изучение работы подобных калориметров при таких энергиях ранее не проводилось.

Был изготовлен прототип калориметра, состоящий из свинцовых пластин, проложенных сцинтиллятором со съёмом сигнала с помощью оптического волокна и регистрацией новейшими микропиксельными лавинными детекторами (разработка ОИЯИ и Mikron-Зеленоград, изготовление Zecotek Co.). Важной особенностью калориметра является его поперечная сегментация, позволяющая детально изучать образование

лавины и регистрировать отдельно электроны и гамма кванты в первых двух секциях. Входная электроника и система съема информации были разработаны в ИЯИ. В 2010г. на пионном и мюонном пучке T10 проведено исследование параметров прототипа калориметра в интервале энергий коллайдера NICA 2-6 ГэВ. Были использованы новые разработки лавинных детекторов MAPD. Измеренные значения выделенной энергии в калориметре согласуются с результатами ранее проведенной симуляции за исключением самых низких энергий. Наблюдается хорошая линейность в широком интервале энергий и отсутствие насыщения. Таким образом, получена хорошая компенсация выходов электромагнитной и адронной компонент. Измеренные параметры позволят оптимизировать размеры детектора и наметить пути дальнейшего развития электроники.

В рамках коллаборации подготовлен Концептуальный проект многоцелевой установки MPD на коллайдере NICA с включением адронного калориметра ZDC под нулевым углом на основе разработок ИЯИ РАН.

Инновационная деятельность

1) Был продолжен поиск оптимального варианта конструкции позиционно-чувствительного детектора (ПЧД) с низким уровнем шумов и пробоев для регистрации фотонов черенковского излучения в составе FARICH-детектора для установки ALICE. Разработка и исследование характеристик проволочного электронного умножителя WGEM показали, что такое устройство без диэлектрика в межэлектродном пространстве сводит до минимума пробои в газовой среде, что существенным образом повышает его надежность и срок службы в газоразрядных детекторах.

2) Продолжается разработка прототипа позитронно-эмиссионного томографа нового поколения. В данном приборе съем сигналов со сцинтилляторов будет осуществляется новейшими микропиксельными лавинными фотодиодами (МЛФД). Данные фотодиоды, получившие название MAPD-3N, были разработаны недавно проф. З. Садыговым, а их промышленное производство начато в прошлом году компанией Zecotek (Сингапур). Эти МЛФД имеют уникальные характеристики: число пикселей до 40000 на квадратный миллиметр, квантовую эффективность около 30% в области спектра 420 нм, рекордно низкий уровень собственных шумов, коэффициент усиления $\sim 10^5$, активную площадь $3 \times 3 \text{ мм}^2$. Как и другие типы лавинных фотодиодов, MAPD-3N чрезвычайно компактны и нечувствительны к сильным магнитным полям.

Исследованы параметры сцинтилляционных детекторов, состоящих из неорганических сцинтилляторов нескольких типов LSO, LYSO, LFS и МЛФД - MAPD-3N. Было изучено энергетическое разрешение, временное разрешение, форма сигнала (время нарастания и полная длительность). Для съема сигнала с МЛФД и его последующей обработки были разработаны быстрые усилители-формирователи. Создана установка по исследованию параметров лавинных фотодиодов. Разработана система сбора экспериментальной информации, которая обеспечивает запись амплитудных и временных спектров со сцинтилляционных детекторов.

Были измерены и определены амплитудные и временные параметры детекторов, удовлетворяющих требованиям ПЭТ-сканеров. Показано, что существующий тип МЛФД - MAPD-3N имеет время нарастания сигнала на уровне 3 нсек и измеренное временное разрешение для кристаллов LYSO, LFS составляет порядка 650 пикосек.

Исследование редких распадов элементарных частиц

1. Продолжалась обработка статистических экспериментальных данных, записанных в ходе нескольких сеансов на ускорителе У-70 в предыдущие годы. Исследовался распад $K \rightarrow \mu \nu$ и $K \rightarrow e \nu$. Выделено около 3000 событий обоих распадов. События надёжно отделены от фона и исследованы на предмет определения структуры распада. В настоящее время работа находится в стадии завершения. Результаты подготавливаются к печати.

2. Осуществлён комплексный запуск установки ОКА. Вместе с сепарированным каналом установка является уникальным единственным в мире сооружением для исследования редких распадов каонов. Сотрудниками ИЯИ с помощью специалистов ОИЯИ в составе установки запущены и успешно эксплуатировались в ходе сеансов на ускорителе У-70 ИФВЭ быстрые пучковые камеры и сцинтилляционные годоскопы. На установке ОКА впервые был получен пучок, содержащий 50% каонов. С помощью сотрудников ИЯИ введены в эксплуатацию годоскопы камер типа «соломка» и большие мюонные годоскопы, изготовленные в ИЯИ.



Рис.1. Установка ОКА. На переднем плане - распадный объём с охранной системой. На заднем плане – большой спектро- метрический магнит для измерения импульсов вторичных частиц.



Рис.2. Внутренний вид распадного объёма с охранной системой.



Рис.3. Пучковые пропорциональные камеры.

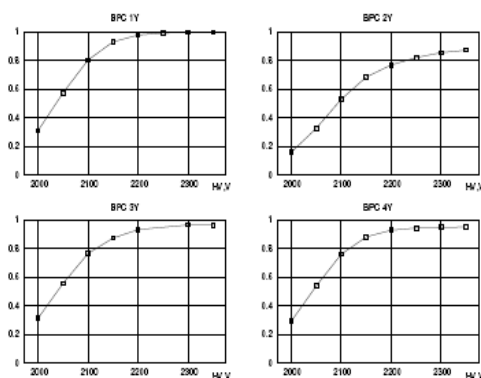


Рис.4. Эффективности пучковых пропкамер.

3. Сотрудники лаборатории приняли активное участие в сеансе 2009 г. на установке NA62 SPS CERN. Сеанс был посвящён методическим работам с прототипами детекторов будущей установки NA62, модернизации имеющихся детекторов и электроники. Сотрудниками ИЯИ был испытан улучшенный (по временному разрешению) прототип триггерного мюонного годоскопа, изготовленного ИЯИ и ИФВЭ.

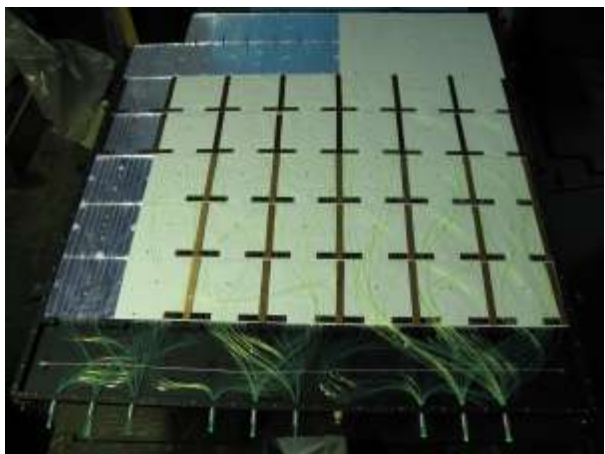


Рис.5. Прототип триггерного мюонного годоскопа.

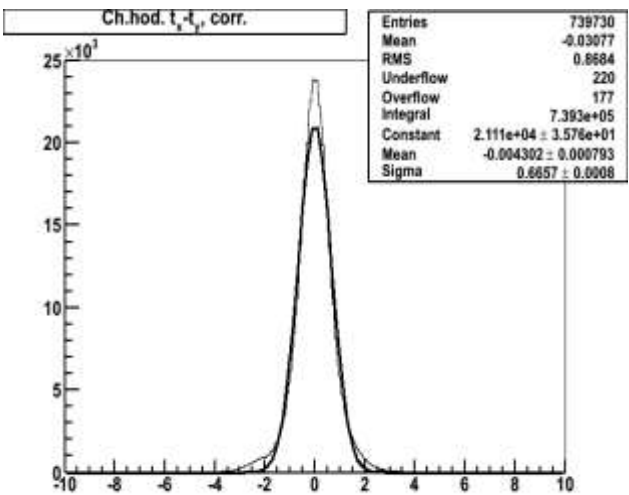


Рис.6. Временное разрешение прототипа триггерного мюонного годоскопа.

Окончательные результаты испытаний различных элементов прототипов собраны в таблице, где вклеенные оптоволоконка отмечены *. А различные ФЭУ – разными цветами: Каналы с Hamamatsu PMT отмечены **зелёным** цветом, **красным** — FEU-115M, и чёрным - FEU-85.

Npad	1*	2*	3	4*	5*	6
run 21288: σ_n , ns	1.93	1.29	1.71	1.43	1.16	1.76
run 21290: σ_n , ns	1.81	1.16	1.81	1.53	1.17	1.74
run 21292: σ_n , ns	1.77	1.24	1.80	1.99	1.18	1.74
run 21298: σ_n , ns	1.76	1.25	1.69	1.52	1.24	1.73

4. Опубликовано программа исследования редких распадов элементарных частиц на установках ОКА и NA62 SPS CERN. Работа опубликована в журнале «Ядерная физика» и №1 за 2009 г .

5. Результаты исследований годоскопов для установок ОКА и NA62 доложены на конференции в ИТЭФ (ноябрь 09 г) и подготовлены к публикации в виде препринта под названием: «Матричные годоскопы для установок ОКА (ИФВЭ, ИЯИ) и NA62 (SPS CERN)». Авторы: Е.Н. Гущин, В.Ф. Куршеев, В.А. Лебедев, В.И. Романовский, В.К. Семёнов, С.Н. Филиппов, А.А.Худяков (докладчик).

6. Смоделированы, спроектированы, изготовлены и испытаны на пучках ускорителя У-70 ИФВЭ прототипы калориметров для установки КЛОД. Результаты подготовлены к печати и доложены на конференции в ИТЭФ, Название: «Проектирование и результаты экспериментальных испытаний прототипов детекторов для установки КЛОД (ИФВЭ, ИЯИ)». Авторы В.Н.Болотов, Г.И.Бритвич, Ю.И.Гуз, А.И.Макаров (докладчик), А.П.Останков.

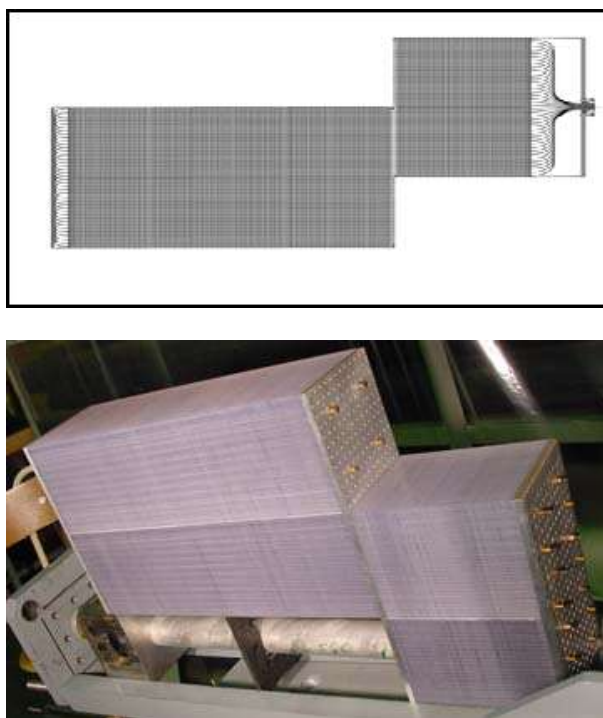


Рис.7. Схема и фотография прототипа модуля охранной системы установки КЛОД.



Рис.8. Детали прототипа пучкового

о калориметра установки КЛОД для разделения пучковых гамма-квантов и нейтронов.

План работы на 2010 год и ожидаемые результаты.

- Обработка статистического материала, записанного на установке ИСТРА будет продолжена в 2010 г. Планируется завершить исследование редкого распада $K^- \rightarrow \mu^- \nu \gamma$ и продолжить изучение распада $K^- \rightarrow e^- \nu \gamma$. Будут изучаться возможности получения результатов обработки других редких процессов, записанных на установке ИСТРА.
- В 2010 г. планируется эксплуатация установки ОКА, набор статистических материалов. Объем выполнения намеченных планов в сильной степени зависит от выделения времени на ускорителе У-70 ИФВЭ и работы ВЧ сепаратора на канале 22.
- Продолжаться работы по созданию и испытанию на пучке SPS CERN детекторов, спроектированных и создаваемых в России совместно с группой ИФВЭ. Планируется монтаж и запуск магнита СП12М на установке NA62. Будут завершены Монте Карло

расчёты мюонного идентификатора и в зависимости от результатов этих расчётов и результатов обработки испытанных в 2009 г. прототипов будет выбран и спроектирован этот детектор и начато его изготовление.

- Подготовка проекта КЛОД. Сотрудники Лаборатории будут активно участвовать в моделировании, проектировании и изготовлении прототипов детекторов установки. Изготовленные прототипы будут испытываться на пучках ускорителя ИФВЭ. Планируется участие в создании и испытания уникального канала нейтральных частиц.

Продолжалась обработка статистических экспериментальных данных, записанных в ходе нескольких сеансов на ускорителе У-70 в предыдущие годы. Завершено исследование распада $K \rightarrow \mu \bar{\nu}$ в новом кинематическом районе. Было исследовано около 22 тыс. событий $K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$. В результате впервые были получены знак и величина разности $FV - FA = 0.21 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst})$.

На рисунке показан пример отделения событий от фона на отдельном стрипе, выделенном в кинематической области исследуемого распада. Точками с погрешностями показаны экспериментальные данные.

События надёжно отделены от фона и исследованы на предмет определения структуры распада. В настоящее время работа завершена. Результаты посланы к печати. По материалам работы подготовлена кандидатская диссертация. Планируется защита в июне с.г.

Продолжаются исследования распада $K^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_\mu$ на материалах, записанных на установках ИСТРА и NA48 (CERN SPS).

Опубликован проект эксперимента по исследованию ультра-редкого распада $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$. Сконструированы, изготовлены и испытаны на пучке ускорителя У-70 ИФВЭ прототипы детекторов для этого эксперимента. Опубликованы результаты испытаний этих прототипов.

На рисунках приведены схема одного прототипа и фотографии обоих прототипов.

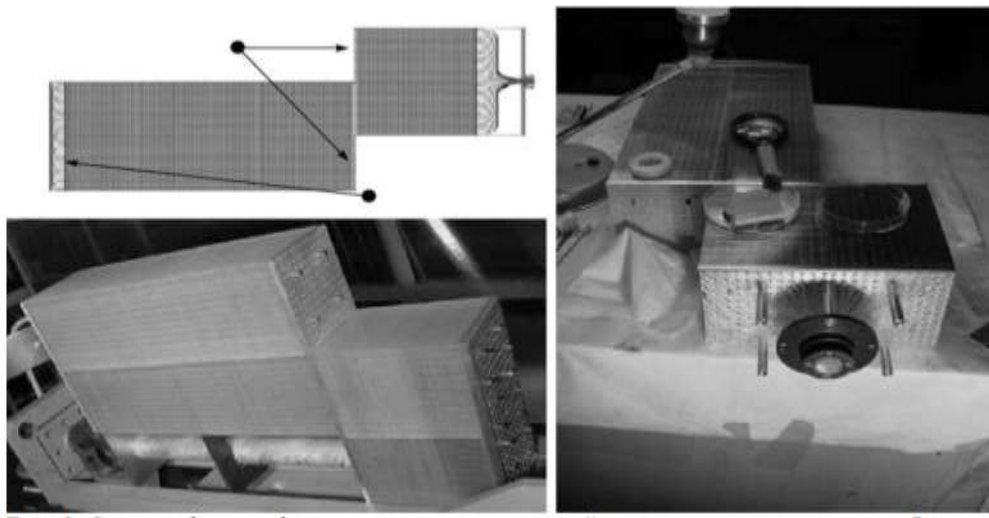
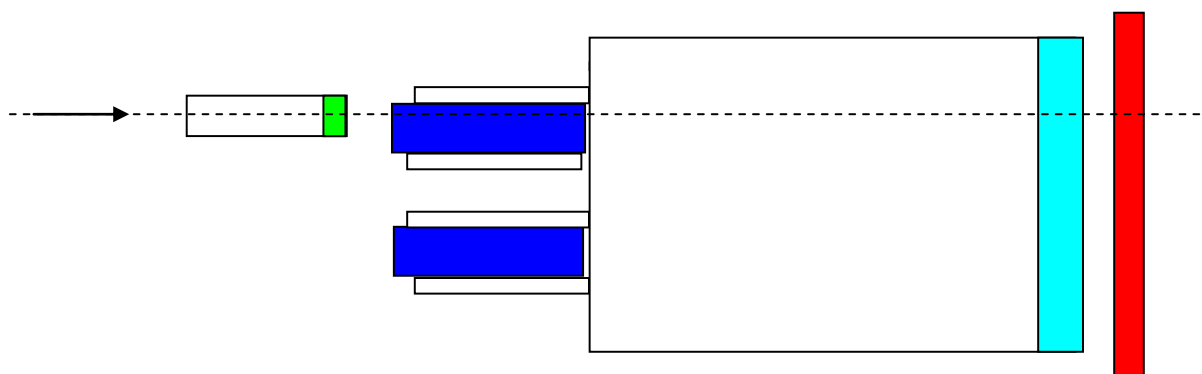


Рис. 2. Схема и фотографии произведенных модулей вето-системы распадного объема



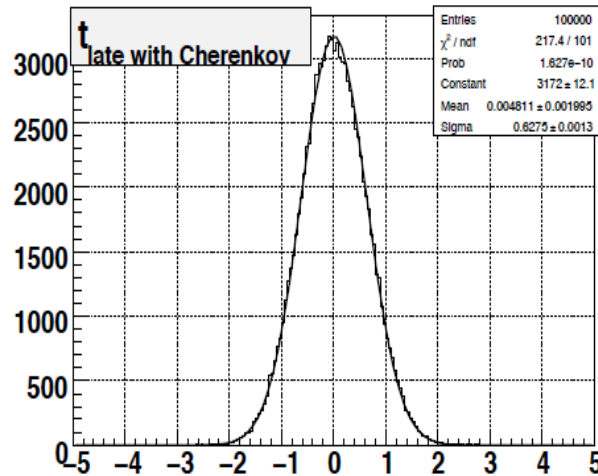
Рис. 5. *а* — Схема слоя ПВК (слева направо: свинцовая пластина, ряд пластиковых волокон, сцинтилляционная пластина со спектросмещающим волокном); *б* и *в* — фотографии ячейки, состоящей из 20 таких слоев, и всего прототипа 5×5 ячеек соответственно.

3. Начат систематический набор статистического материала на установке ОКА. Вместе с сепарированным каналом установка является уникальным единственным в мире сооружением для исследования редких распадов каонов. Сотрудниками ИЯИ с помощью специалистов ОИЯИ в составе установки запущены и успешно эксплуатировались в ходе сеансов на ускорителе У-70 ИФВЭ быстрые пучковые камеры и сцинтилляционные годоскопы. На установке ОКА впервые был получен пучок, содержащий 50% каонов. С помощью сотрудников ИЯИ введены в эксплуатацию годоскопы камер типа «соломка» и большие мюонные годоскопы, изготовленные в ИЯИ.
4. Сотрудники лаборатории приняли активное участие в сеансе 2010 г. на установке NA62 SPS CERN. Сеанс был посвящён методическим работам с прототипами детекторов будущей установки NA62, модернизации имеющихся детекторов и электроники. Сотрудниками ИЯИ был испытан улучшенный (по временному разрешению) прототип триггерного мюонного годоскопа, изготовленного ИЯИ и ИФВЭ.



На рисунках приведены два прототипа мюонного триггерного детектора. Один в виде элемента детектора. Второй в сборке из нескольких элементов.

$$\Delta t = 0 \text{ ns}, \quad \sigma_t = 0.63 \text{ ns}$$



На последнем рисунке показано временное разрешение лучшего образца элемента годоскопа.

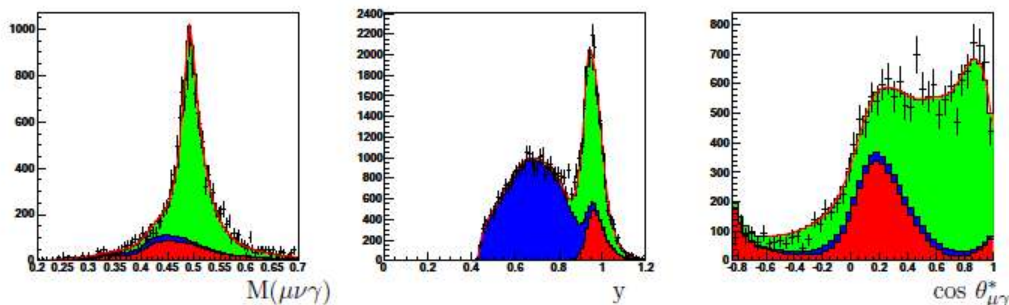


Figure 11: Simultaneous fit in stripe 2: $M(\mu\nu\gamma)$, y and $\cos \theta_{\mu\gamma}^*$. Points with errors - data, blue - $K\mu 3$, red - $K\pi 2$, green - signal, red line - signal+background. $\chi^2/\text{ndf}=111.5/95$ (for mass histogram only, see text).

На рис. представлены примеры выделения рабочих событий (зелёный цвет) от фона в некоторых областях кинематических переменных

- В плане подготовки к эксперименту по исследованию ультра редкого распада $K \rightarrow \pi \nu \nu$ в текущем году был спроектирован, изготовлен на производственной базе в ИФВЭ (г. Протвино) и собран в ЦЕРНе мюонный годоскоп — MUV3, предназначенный для выработки быстрого триггерного сигнала для подавления фона от распадов с мюонами в конечном состоянии.
- Основной результат за 2011 год. Радиационные распады К-мезонов позволяют изучать области низких энергий, где успешно работают некоторые современные теоретические модели. Например, киральная пертурбативная теория, описывающая

большинство каонных распадов. В 2011 г. в Лаборатории физики элементарных частиц была завершена и опубликована работа по изучению радиационного распада $K^- \rightarrow \mu^- \nu \gamma$ на установке ИСТРА, созданной в ИЯИ РАН и работавшей на ускорителе У-70 ИФВЭ (г. Протвино). На статистике 47 К событий, надёжно отделённых от фоновых событий, впервые в мире в новом кинематическом диапазоне была измерена величина и определён знак разности формфакторов слабого взаимодействия $F_V - F_A = 0.15 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst})$. Результаты сравниваются с предсказаниями современных теоретических моделей.

Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях KEK и J-PARC

1. В нейтринном эксперименте с длинной базой T2K впервые обнаружены осцилляции мюонных нейтрино в электронные нейтрино. Зарегистрировано 6 таких событий при ожидаемом фоне 1.5 ± 0.2 события в отсутствие осцилляций. Показано, что угол смешивания между первым и третьим массовыми состояниями нейтрино θ_{13} отличен от нуля на уровне 90% CL. Центральная величина для $\sin^2 2\theta_{13}$ составляет 0.11 для нормальной иерархии масс нейтрино ($m_3 > m_2$) и 0.14 для инверсной иерархии ($m_3 < m_2$) в случае CP нечетной фазы δ_{CP} равной 0 (рисунок 1). Этот результат открывает принципиальную возможность для поиска CP нарушения в лептонном секторе в ускорительных экспериментах с длинной базой.

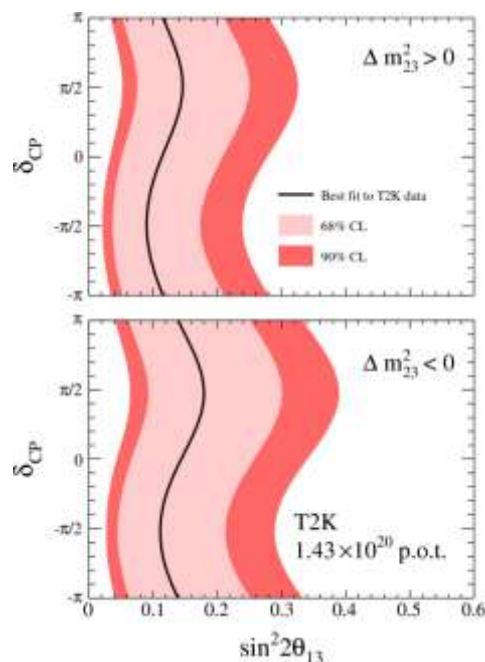


Рис.1. Интервалы значений $\sin^2 2\theta_{13}$ для всего диапазона CP нечетной фазы от $-\pi$ до π .

2. В эксперименте T2K проведены первые измерения дефицита мюонных нейтрино в процессе $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$. В отсутствие осцилляций ожидалось 104 мюонных события в активном объеме 22.5 килотонн СуперКамиоканде для интегрального числа протонов на мишени

1.43×10^{20} p.o.t. Всего в эксперименте было зарегистрировано 31 событие. В этих событиях нейтрино провзаимодействовали через заряженные токи внутри детектора, энергия рожденных частиц была полностью зарегистрирована во внутреннем объеме детектора, их появление полностью совпадало с временной структурой протонного пучка. Этот результат явился однозначным подтверждением осцилляций мюонных нейтрино с атмосферными параметрами. Спектр нейтрино имеет искаженную форму, характерную для осцилляций. Отношение зарегистрированных событий к ожидаемым в отсутствие осцилляций приведено на рисунке 2.

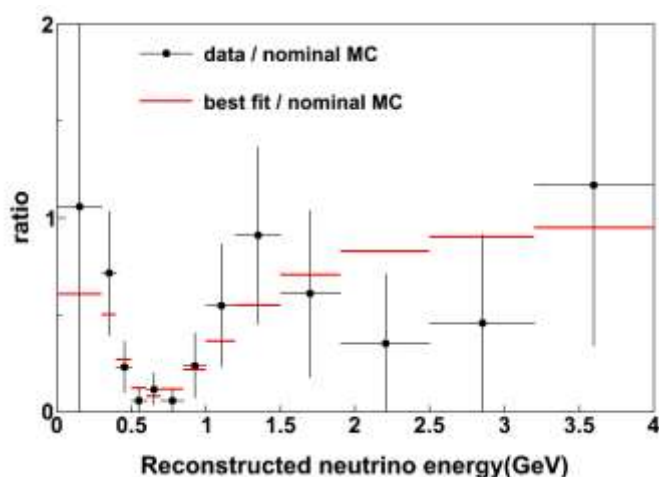


Рис.2. Отношение зарегистрированных событий к ожидаемым в отсутствие осцилляций в детекторе СуперКамиоканде.

Из анализа полученных данных определены следующие осцилляционные параметры: $\Delta m^2 = 2.6 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ и угол смешивания $\sin^2 2\theta_{23} \sim 1.0$. Полученный результат находится в прекрасном согласии с данными экспериментов Супер-Камиоканде, K2K и MINOS, а также демонстрирует высокую чувствительность выбранного внеосевого (off-axis) пучка нейтрино к осцилляциям и позволяет измерять осцилляционные параметры с высокой точностью.

Проект Коллапс и физика нейтрино на больших подземных сцинтилляционных установках

1. По данным работы нейтринных телескопов «Коллапс», LSD и LVD в течение более 34 лет получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 14.8 года на 90% уровне достоверности.

2. С целью улучшения разделения типов нейтрино, регистрируемых при гравитационных коллапсах звёзд на базе детектора LVD, проведён следующий эксперимент. В качестве дополнительной мишени на поверхности портатанка (8 сцинтилляционных детекторов) было размещено 544 кг поваренной соли. Эффективность регистрации взаимодействия электронного антинейтрино с протоном сцинтиллятора зависит от эффективности регистрации нейтрона, образующегося в реакции обратного β -распада (η_n). До

добавления соли $\eta\pi$ равна 69%, при наличии соли $\eta\pi$ стала 80%. Кроме того, добавление NaCl увеличивает более чем на 6% число регистрируемых взаимодействий электронных нейтрино в детекторе LVD.

3. На статистике 2×10^6 мюонных событий с помощью детектора LVD получены характеристики мюонных групп на глубине 3300 м.в.э. и измерено среднее число нейтронов (Рисунок), генерируемых одиночными мюонами, мюонными группами и ливнями, в 1 г/см^2 сцинтиллятора ($Y_n = (4.1 \pm 0.5) \cdot 10^{-4} (\mu \cdot \text{г} \cdot \text{см}^{-2})^{-1}$)

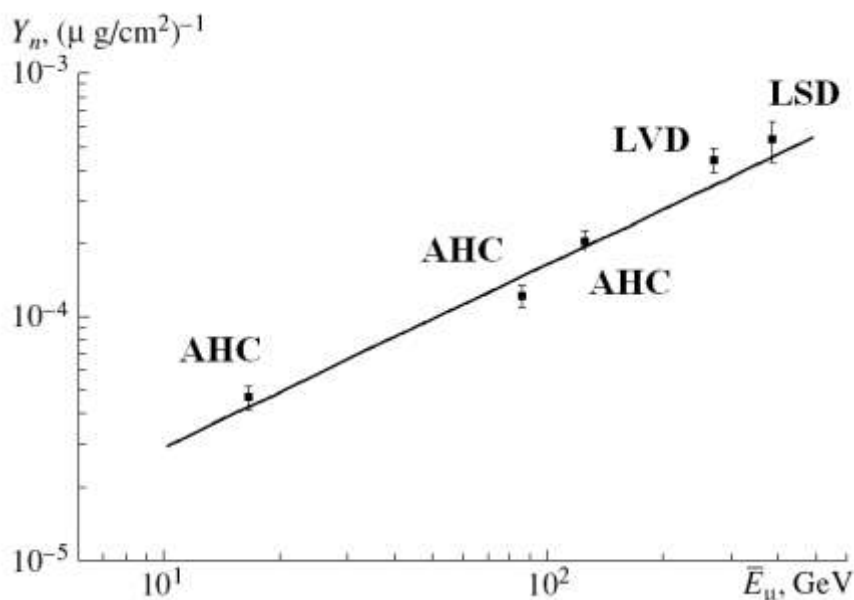


Рис. Число нейтронов, генерированных одним мюоном в 1 г/см^2 в зависимости от средней энергии мюонов на глубинах 25 [АНС], 316 [АНС], 570 [АНС], 3650 [LVD] и 5200 [LSD] м.в.э.; сплошная линия – расчет (Г. Т. Зацепин, О. Г. Ряжская, Изв. АН СССР. Сер. физ. 29, 1946 (1965); О. Г. Ряжская, Препринты №18, 24 ФИАН (Москва, 1966).)

Поиск двойного безнейтринного бета распада ^{76}Ge (эксперимент GERDA)

В рамках Международной Европейской коллаборации Герда начиная с 2005 г разрабатывается проект установки нового поколения по поиску двойного безнейтринного бета распада ^{76}Ge

В июне 2010 г закончен монтаж всех основных элементов установки и начат первый этап эксперимента. На этом этапе эксперимента используется связка из трех германиевых детекторов (Рис.2) из германия натурального состава, погруженных в жидкий азот. Цель этого этапа достичь индекса фона 10^{-2} /кэВ.год.кг, после чего в установку будут установлены детекторы из обогащенного состава.

Начиная с сентября 2010г получена первые данные за несколько сотен часов экспозиции с различным положением детекторов и начата обработка полученных данных. Показано, что в полученных спектрах фона нет никаких гамма линии от урана, тория и их дочерних продуктов в пределах набранной статистики 1.3-килограмма-года.

Это обеспечивает строгие пределы на достигнутую радио-чистоту, которая отвечает требованиям эксперимента.

Однако, в энергетическом спектре присутствует одна неожиданная особенность : линия 1525 кэВ года с интенсивностью приблизительно 1 отсчет/ (кг.сутки).

Сигнал возникает от распада ^{42}K , образующегося в свою очередь от распада ^{42}Ar . Есть также события с энергиями выше 1525 кэВ, попадающие в область $0\nu2\beta$ распада ^{76}Ge . По крайней мере большая часть этих событий создается бета и гамма взаимодействиями от распада ^{42}K . Скорость счета в линии больше чем на порядок выше величины, ожидаемой при гомогенном распределении ^{42}K в жидком аргоне. Показано, что скорость счета сигнала от ^{42}Ar (^{42}K) зависит от распределения электрических полей в жидком аргоне в окрестности германиевых кристаллов. Сделан вывод, что положительно заряженный ион ^{42}K после его образования и дрейфует в пределах электрических полей, что и приводит к повышению скорости счета детекторов. Для исследования этого эффекта вокруг детекторов установлен экран из тонкостенной меди, подавая напряжение на который можно менять конфигурацию электрических полей в окрестности германиевых кристаллов.

В дальнейшей стадии эксперимента была исследована зависимость величины сигнала от ^{42}Ar (^{42}K) распада от напряжения на германиевых диодах, держателе датчиков, окружающего цилиндрического медного электрода и радоновом экране. Исследования продолжаются.

Экспериментальная работа дополнена обширными расчетами Монте Карло и моделированием электрических полей и путей дрейфа ионов в этих полях. Несмотря на то, что полученный к настоящему моменту фон выше чем ожидаемый, коллаборация считает, что дальнейшая оптимизация электрических полей в окрестности германиевых диодов позволит далее уменьшать фон от распадов ^{42}Ar (^{42}K) до требуемого уровня.

Детекторы для второй фазы эксперимента

Коллаборацией принято окончательное решение использовать в фазе 2 эксперимента германиевые BEG детекторы. В рамках этой программы была разработана методика очистки исходного материала до чистоты 6N.

Была исследована возможность подавления фона в детекторах такого типа по анализу формы импульса. Для исследования был выбран детектор диаметром 80 мм и массой 878 г. Детектор был помещен в экспериментальный стенд с жидким аргонном. Энергетическое разрешение детектора составляет 2,0 кэВ при энергии 1,33 МэВ. Получено, что спепень подавления фона в области $0\nu2\beta$ распада ^{76}Ge составляет $0,6 \times 10^4$ при облучении гамма источником ^{228}Th .



Рис 1. Общий вид установки Gerda

Разработка и создание альтернативных (оптического, гидроакустического, радиоволнового и радиоастрономического) методов детектирования космических нейтрино ультравысоких и экстремально высоких энергий (10^{15} - 10^{21} эВ и выше) (НЕСТОР-САДКО-РАМАНД-РАМХАНД-МЛФД)

НЕСТОР



Рис. 1а. На фото: экспериментальный действующий макет глубоководного МСЗ «Баклан», размещенный на комплексе CTD-Rosette вместе с акустическим профилографом скорости течений ADCP, начало ускоренного погружения на стартовую глубину 1,5 км, май 2009г



Рис. 16. На фото: экспериментальный действующий макет глубоководного МСЗ «Баклан», завершающая фаза зондирования микроструктуры в придонном слое толщиной 250 м на глубине 1,5 км.

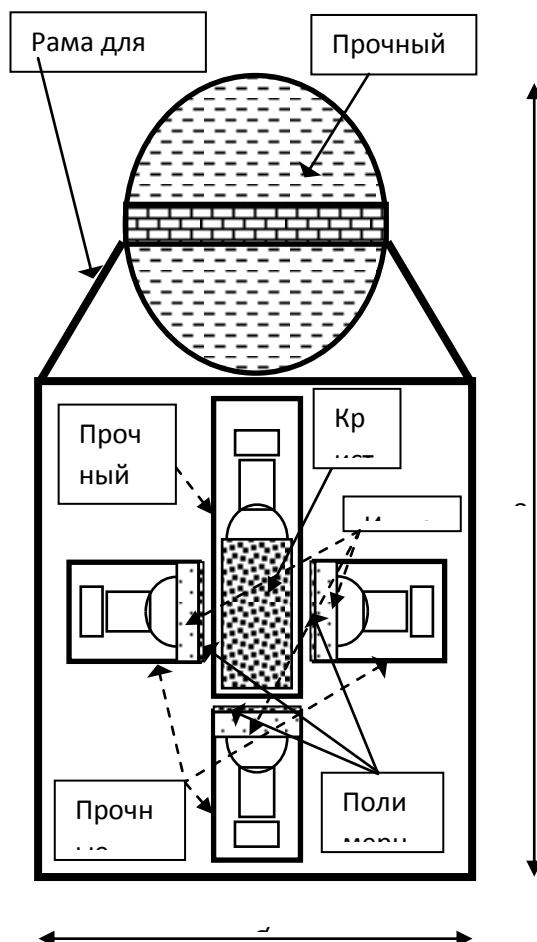


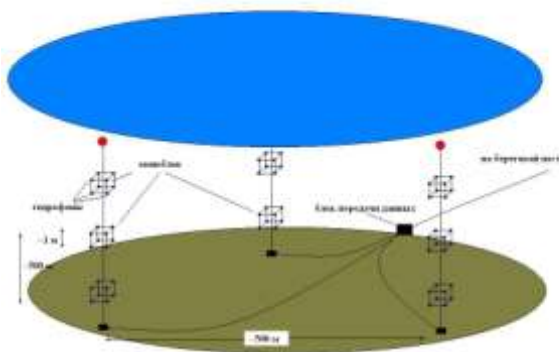
Рис.1в. Принципиальная схема погружного сцинтилляционного спектрометра α, β, γ - совпадений в составе прочного корпуса для электроники обработки информации, γ -спектрометра на кристалле NaI(Tl) и пяти α, β -счетчиков на полимерном сцинтилляторе.

САДКО



Рис. 2 Экспериментальный образец гидроакустической станции на базе широкоапертурной (порядка 150 метров) кабельной антенны для долговременного мониторинга акустического поля на морском полигоне.

Экспериментальный образец гидроакустической антенны(ИПФ РАН) в процессе морской постановки



Предложение ИПФ РАН по архитектуре гидроакустической приемной системы.

РАМАНД

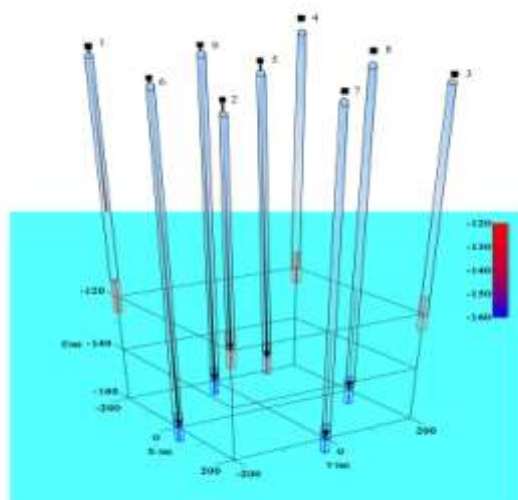


Рис. 3. Предлагаемое расположение 9-ти скважин и погруженных в них антенн для регистрации радиоволнового излучения во льду Антарктиды

РАМХАНД



Рис. 4. В рамках настоящего проекта будут начаты новые наблюдения Луны с целью поиска всплесков черенковского радиоизлучения в диапазоне метровых волн. С этой целью будет изготовлен 16-элементный антенный модуль, служащий экспериментальным прототипом базового модуля не только для нового радиоастрономического детектора нейтрино экстремально высоких энергий, но и прототипом радиотелескопа метровых волн нового поколения, использующего новейшие

достижения компьютерных технологий. В дальнейшем на основе четырех модулей будет создана установка для регистрации всплесков черенковского радиоизлучения в диапазоне около 60 МГц. Первый макет будущего модуля представлен на Рис. 4.

МЛФД

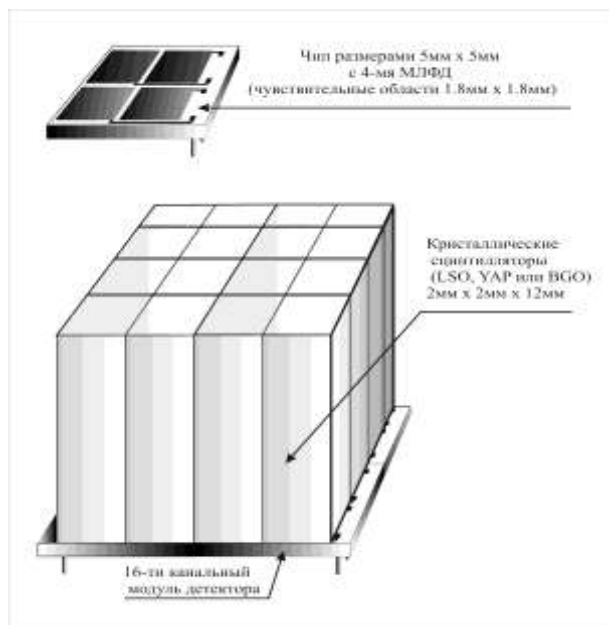


Рис. 5. Предполагаемый вид сборки многоканального детектора гамма квантов на основе микропиксельных лавинных фотодиодов и кристаллических сцинтилляторов

«Разработка новых оптических, радио-физических, акустических детекторов и зондов для исследований по физике высоких энергий, астрофизике и мониторинга состояний ледовой и водной сред на полигонах в Антарктиде и Средиземном море.

Для выполнения проекта была создана широкая коллаборация российских институтов – ИЯИ РАН (ведущая организация), ФИАН, ИПФ РАН, АО ИОРАН, были привлечены ученые Арктического и Антарктического НИИ и Российской антарктической экспедиции (С.Петербург), АКИН (Москва), МГУ, ОИЯИ (Дубна).

Так для глубоководных исследований, связанных с созданием

крупномасштабного нейтринного телескопа в Средиземном море (KM3 NeT), и для мониторинга гидросферы (ядерно-физических, гидроакустических и гидрографических измерений параметров водной среды) с целью обеспечения радиационной и экологической безопасности были предложены следующие новые разработки и новая техника:

- **Универсальный комплекс** (АО ИО РАН) с использованием бескабельных зондов для проведения океанологических исследований в районе глубоководных оптических и гидроакустических экспериментов в Средиземном море, а именно для измерения

вертикальной структуры физических полей, в т.ч. температуры, скорости звука, взвешенных и растворенных веществ, и др. Комплекс пригоден для размещения на малотоннажном судне.

- **Гидроакустическая донная антенна** (ИПФ РАН) на основе цифровых гидрофонов со встроенными микропроцессорами для приема и выделения слабых сигналов, позволяющая в течение длительного времени в автоматическом режиме анализировать и накапливать редкие события по характерным сигнатурам сигнала и волнового фронта. На базе данных антенн вертикальной постановки может быть основана архитектура глубоководного акустического детектора нейтрино с наращиваемой объемной апертурой.

- **Погружной сцинтилляционный спектрометр** для определения состава и измерения концентрации растворенных в морской воде радионуклидов (радий, радон и др.). С целью подавления фона и получения спектра γ -квантов применен отбор детектируемых кристаллом NaI(Tl) γ -квантов, совпадающих по времени с сигналом от тонкопленочного полимерного сцинтиллятора, регистрирующего α - и β -частицы (его сцинтилляционная эффективность 150 - 200% эффективности полистирольного сцинтиллятора, а характеристики не изменялись после месячного пребывания в морской воде). Подавление фона примерно в 1000 раз. Создан лабораторный образец спектрометра ($\alpha\beta$)- γ -совпадений, разработана конструкция погружного спектрометра (ИСПМ РАН).

- **В рамках проекта НЕСТОР** В.А. Жуковым (ИЯИ РАН) совместно с греческой стороной **выполнены измерения прозрачности воды** на полигоне НЕСТОР вблизи г. Пилос на глубинах от 2000 м до 4100 м и на итальянском полигоне Капо Пассеро на глубинах от 2000 до 3100 м (см. <http://www.nestor.noa.gr/vlvnt09/> в разделе “programme”). Показано, что для всех длин волн и на всех глубинах вода на полигоне НЕСТОР более прозрачна.

Полученные результаты имеют важное значение для выбора места размещения европейского нейтринного телескопа KM3 NeT.

- **Сделан анализ** (совместно с ПРАО ФИАН) **перспектив использования радиотелескопов** дециметрового и метрового диапазона и будущего гигантского радиотелескопа СКА для поиска радио импульсов от Луны, производимых космическими частицами (нейтрино, протонами и др.) экстремально высоких энергий, бомбардирующими Луну.

- **Создана быстродействующая автоматизированная система регистрации и анализа временных и аналоговых сигналов** на основе компьютера-контроллера КАМАК в ОС Линукс для измерения характеристик лавинных фотодиодов на многоканальном измерительном стенде ИЯИ РАН. Разработано цифровое управление напряжением питания детекторов и других приборов.

- В рамках инновационной составляющей проекта **начата работа по изотопному анализу энергоресурсов** (твёрдых, жидких, газообразных). Выполнен активационный анализ образцов угольного месторождения с целью определения содержания в них

полиметаллов. На низкофоновом спектрометре ИЯИ измерено содержание в угле естественных радиоактивных изотопов. Результаты в стадии анализа. На основе полученных данных начата работа по составлению изотопного портрета месторождения.

Разработка глубоководных детекторов нейтрино (проекты НЕСТОР-САДКО).

Об измерении термоупругих свойств воды на больших глубинах

Для разработки и создания гидроакустического детектора нейтрино необходимо точно знать термоупругие свойства воды вблизи места его размещения. В частности для расчёта основных характеристик детектора, а именно: порога регистрации и эффективного объёма детектирования, необходимо знать коэффициент Грюнайзена для воды на различных глубинах. Одним из решений такой задачи может быть создание автономного измерителя термоупругого коэффициента морской воды на глубинах вплоть до 5-6 км.

Для моделирования и изучения термоакустического механизма генерации звука в воде изготовлен измерительный стенд в составе гидроакустического бассейна размером 50x50x120 см и измерительной аппаратуры.

Стенд включает в себя измерительный гидрофон, мал шумящий предварительный усилитель, селективный усилитель UNIPAN 232B, осциллограф Tektronix 2465A и аналого-цифровой преобразователь с системой сбора и обработки данных с частотой дискретизации 48 кГц и разрешением 16 бит на основе персонального компьютера в среде Windows. Стенд позволяет регистрировать и обрабатывать в реальном времени гидроакустические сигналы в диапазоне 0,1 - 48(96) кГц. Проведены испытания стенда с использованием пьезоэлектрического излучателя акустических импульсов

Разработка модели быстрого расчёта электронно-адронных каскадов и производимых каскадами акустических сигналов в воде.

Для уменьшения времени расчётов высокоэнергетических электронно-адронных каскадов с использованием гибридной модели Л.Г.Деденко было произведено обновление аппаратной части компьютера. Установлена и отлажена новая версия операционной системы, Scientific Linux 5, рекомендованная разработчиками пакета GEANT4, с возможностью распараллеливания процессов. В системе Scientific Linux установлена библиотека CLHEP и мощный общепризнанный пакет программ для расчета каскадов методом Монте-Карло - GEANT4.

Была осуществлена инсталляция пакета и его адаптация к новой операционной системе.

В ближайшем будущем будет проводиться программирование и расчёты акустических сигналов от каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий в воде в рамках «гибридной» модели и при помощи GEANT4.

Разработка радиоволнового детектора нейтрино в Антарктиде

Выполнен обзор экспериментов в Антарктиде по поиску радио импульсов от электронно-фотонных каскадов, производимых космическими нейтрино сверхвысоких энергий в Антарктическом льду. Нейтринные радио эксперименты в Антарктиде классифицированы согласно способам размещения антенн: 1) на поверхности ледника (впервые предложено ИЯИ РАН), 2) в скважинах во льду на глубинах несколько сотен метров, 3) на борту стратосферного аэростата, летающего на высоте порядка 40 км.. Предложена альтернативная возможность, а именно использовать для размещения антенн привязные аэростаты на высотах 1-2 км над ледовой поверхностью. Такая антенная конфигурация уменьшит (если сравнивать со стратосферным вариантом) энергетический порог детектирования нейтрино и позволит увеличить время наблюдения.

Разработка координатно-чувствительных сцинтилляционных детекторов гамма квантов, нейтронов и заряженных частиц на основе новейших мультипиксельных лавинных фотодиодов

разработаны:

- технологический процесс,
- технологический маршрут,
- микро фотошаблоны,
- необходимая документация

для изготовления МЛФД с техническими параметрами мирового уровня или превосходящими мировой уровень.

Параметры создаваемых МЛФД:

- Плотность пикселей в МЛФД -10000-40000 пикселей/кв. мм,
- Рабочее напряжение 40-130 В,
- Размеры рабочей площади ЛМФД 1мм*1мм;
- Спектральная область чувствительности -250 – 950 нм,
- Квантовый выход на длине волны 500 нм - 70%,
- Эффективность детектирования фотона ~30 %,
- Коэффициент усиления фото сигнала - 10^4 - 10^6 .

Также согласно ТЗ проведена **разработка универсального автоматизированного стенда ИЯИ РАН** для измерения временных, амплитудных и шумовых характеристик МЛФД, многоканальных детекторов электромагнитных излучений и ядерных частиц на основе МЛФД, их отладки и калибровки.

Новизна применяемых решений.

Использование в разработанных МЛФД принципа локальной отрицательной обратной связи, технологии микро-ям и других конструктивных решений позволяет получить образцы, основные параметры которых (коэффициент усиления, диапазон линейности

фотоотклика) на порядки превосходят параметры лучших мировых аналогов (например, ЛФД фирмы Хамамацу, Япония, одного из главных мировых производителей кремниевых ЛФД).

Создание в рамках данного проекта многоэлементных матриц МЛФД для регистрации слабых световых импульсов в связках с различными сцинтилляторами позволит изготовить **лабораторные образцы координатно-чувствительных, сверхбыстрых детекторов гамма квантов, заряженных частиц, нейтронов нового поколения** для физики высоких энергий и медицины.

Результаты НИР вошли с февраля 2011 г. в виде дополнений/изменений в уже существующий курс И.М. Железных «Детекторы нейтрино высоких энергий» (МФТИ, факультет. Проблем физики и энергетики, кафедра В.А. Матвеева «Фундаментальных взаимодействия и космология»).

На основе НИР по разработке и созданию автоматизированного стенда ИЯИ РАН и на его основе в ходе выполнения проекта будет внедрен в НОЦ ИЯИ РАН Лабораторный практикум «Измерение фотометрических, спектральных и временных характеристик вакуумных и полупроводниковых фотоприёмников».

Исследование электромагнитных взаимодействий ядер

Фоторождение тяжелых мезонов.

1) На пучке монохроматических поляризованных фотонов с энергией от 500 до 1500 МэВ в совместном эксперименте ИЯИ РАН с коллаборацией ГРААЛЬ (Гренобль) впервые экспериментально установлено, что принцип зарядовой инвариантности в фотоядерных взаимодействиях нуклонов справедлив не только в асимптотической области энергий, но и в области нуклонных резонансов.

Фоторождение мезонов на легких ядрах

1) Создана и введена в действие мишень с замороженной поляризацией протонов и дейтронов, обладающая рекордными на мировом уровне параметрами: рабочая температура 25 мК (стабильность температуры 0,2 мК), поляризация протонов 85%, поляризация дейтронов 75%, время релаксации поляризации 1500 ч. В отчетный период мишень отработала на пучке более 5000 ч.

2) На пучке циркулярно поляризованных меченых фотонов ускорителя МAMI-C с использованием новой поляризованной мишени и детектирующей системы CrystalBall/TAPS впервые измерены поперечные спиновые асимметрии T и F в фоторождении π^0 и η -мезонов на протоне и дейтроне в области $S_{11}(1535)$ резонанса. Исследовались интерференционные эффекты между нуклонными резонансами $S_{11}(1535)$ и $D_{13}(1520)$ для определения энергозависимых фазовых сдвигов между s - и d -волнами, которые не были учтены в изобарных моделях (MAID, SAID).

Завершен цикл исследований угловой анизотропии альфа-распада ориентированных ядер трансурановой области.

Исследование рождения мезонов на пучках протонов и фотонов при средних энергиях

Выполнен теоретический анализ данных по рождению мезонов на протонах. Изучены механизмы рождения каон-антикаонных пар с изучением роли вкладов скалярных мезонов.

Исследование изовекторных гигантских резонансов и двойного бета-распада ядер

Основанный на континуумной версии приближения случайной фазы и феноменологическом учете фрагментационного эффекта полумикроскопический подход применен к описанию сечений фотопоглощения, "прямых+полупрямых" фотонейтронных и обратных реакций с возбуждением изовекторных гигантских дипольного и квадрупольного резонансов. Наряду с бесспиновой частью взаимодействия Ландау-Мигдала и частично самосогласованным феноменологическим средним полем ядра в реализованной версии подхода учтены изовекторные сепарабельные скоростные силы, а также эффект фрагментационного сдвига энергии гигантских резонансов. По указанной схеме были вычислены парциальные сечения $^{208}\text{Pb}(n,\gamma)$ и $^{208}\text{Pb}(p,\gamma)$ -реакции в области ГДР с заселением одночастичных состояний ядер ^{209}Pb и ^{209}Bi , соответственно. В области возбуждения ИКР были вычислены сечения $^{208}\text{Pb}(\gamma,n)$ -реакции и асимметрия этой реакции относительно 90° , а также асимметрия реакций $^{208}\text{Pb}(n,\gamma_0)$ и $^{209}\text{Bi}(n,\gamma_i)$.

Исследование механизмов возбуждения нуклонов и ядер в области энергий до 800 МэВ

Исследованы гигантские электрические дипольные резонансы на возбужденных состояниях ядер. Для изотопов олова получены данные об энергиях возбуждения, правилах сумм, ширинах, угловых моментах в зависимости от энергий возбуждения компаунд системы..

Ускорители, детекторы излучения, ускорительные и рентгеновские методы и в научных исследованиях, медицине, экологии и материаловедении.

Отработка фотоядерного (^{12}N ; ^{12}B)-активационного детектора взрывчатых веществ

Совместно с ФИАН проведены пучковые испытания прототипа фотоядерного детектора взрывчатых веществ и наркотиков на основе микротрона РАМ-55 МэВ.

Математическое моделирование физических процессов, связанных с ускорением заряженных частиц.

Исследована зависимость ускоряющей силы, действующей на электрон, и его фазы от продольной координаты при движении электрона вдоль оси периодической ускоряющей структуры. Произведено численное интегрирование для ускоряющей силы с изменением фазы на 2π на длине одной ячейки с нулевыми краевыми условиями. Найден способ определения зависимости длины ячейки от начальной энергии электрона, удовлетворяющий краевым условиям. Вычислены длины последовательного ряда ячеек, позволяющего ускорить частицы от низкой (нерелятивистской) энергии инжекции до релятивистской величины.

Оптимизация параметров и обеспечение работы ЛУЭ-8 МэВ .

1. Разработана и смонтирована система стабилизации температуры с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ секции линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8.
2. Разработана и смонтирована система автоматического поддержания в заданных пределах уровня воды в накопительном баке системы охлаждения ускорителя ЛУЭ-8.
3. Спроектирован, изготовлен и смонтирован дополнительный участок тракта, соединяющий ускорительную секцию и развертку пучка.

4. Установлена и смонтирована телевизионная система дистанционного наблюдения за облучаемым образцом.

Исследование спектров запаздывающих нейтронов при фотоделении ядер актинидов тормозными гамма-квантами с энергией 50 МэВ

1. Разработан, изготовлен и испытан полный комплекс аппаратуры сцинтилляционного спектрометра запаздывающих нейтронов и программ для сбора и первичной обработки информации,

2. На пучке разрезного микротрона 50 МэВ НИИЯФ МГУ выполнены измерения временных и амплитудных характеристик запаздывающих нейтронов от фотоделения ядер урана-238.

3. Написаны программы тестирования работоспособности и надежности работы системы сбора информации, определены необходимые условия обеспечения допустимой величины мертвого времени системы при измерении амплитудных и временных распределений событий..

4. Выполнено компьютерное моделирование работы системы дискриминации по форме сцинтилляционного импульса. Исследовано влияние различных параметров системы на качество дискриминации нейтронов от гамма-квантов.

Исследования радиационно-химического воздействия электронов на сернокислые водные растворы солей металлов

1. На основе результатов экспериментальных исследований рассчитан, разработан и изготовлен лабораторный макет промышленной установки для эффективного непрерывного радиационно-химического воздействия ускоренным пучком электронов на раствор, содержащий извлекаемые реагенты.

2. Подана заявка на получение патента на оригинальную установку для эффективного непрерывного радиационно-химического воздействия ускоренным пучком электронов на раствор, содержащий извлекаемые реагенты. установку .

Заключение

Указание на существование бозона Хиггса

Сотрудниками ИЯИ РАН внесён важный вклад в экспериментальные исследования на Большом адронном коллайдере на установках CMS, ALICE, LHC-b, связанные с поиском бозона Хиггса, суперсимметрии, тяжёлых нейтрино и кварк-глюонной материи. В эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере произведён поиск бозона Хиггса на основе данных 2010-2011 годов и показано, что его масса не может превышать 127 ГэВ. Найден небольшой ожидаемый избыток над уровнем фона возможных продуктов распадов бозонов Хиггса, что можно трактовать как указание на существование бозона Хиггса с массой в районе 125 ГэВ.

Осцилляции мюонных нейтрино в электронные нейтрино

В нейтринном эксперименте с длинной базой T2K впервые обнаружены осцилляции мюонных нейтрино в электронные нейтрино. Зарегистрировано 6 таких событий при ожидаемом фоне 1.5 события в отсутствие осцилляций. Определена величина осцилляций на уровне достоверности 90%. Этот результат открывает принципиальную возможность для поиска эффектов нарушения комбинированной CP симметрии взаимодействия лептонов в ускорительных экспериментах с длинной базой.

Измерение угла смешивания нейтрино в коллаборации Double Chooz

9 ноября 2011 года Международной коллаборацией Double Chooz, изучающей свойства реакторных нейтрино, объявлен первый результат измерения ранее неизвестного угла смешивания электронного и тау нейтрино, который имеет важные следствия для физики элементарных частиц и астрофизики. В эксперименте участвуют учёные из ИЯИ РАН и Курчатовского института.

Запущен международный эксперимент по изучению двойного бета-распада - GERDA

В подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) запущена в режиме набора данных первая фаза международного эксперимента по изучению двойного бета-распада - GERDA, в разработку идейных и методических основ которого весьма значительный вклад внесли специалисты ИЯИ РАН.

Экспериментально установлена зарядовая инвариантность электроядерных взаимодействий в области нуклонных резонансов

На пучках монохроматических поляризованных фотонов средних энергий (в области нуклонных резонансов) изучена спиновая структура свободных и связанных нуклонов. В совместных экспериментах ИЯИ РАН с коллаборациями ГРААЛЬ (Гренобль) и МАМИ (Майнц) изучены спиновые асимметрии сечений фоторождения мезонов.

Экспериментально установлено, что принцип зарядовой инвариантности в процессах фотоядерных взаимодействий нуклонов справедлив не только в асимптотической области энергий, но и в области нуклонных резонансов. Полное сечение фотопоглощения на протоне и нейтроне при энергии фотонов от 0.7 до 1.5 ГэВ

Ограничение на массу правого W бозона

По экспериментальным данным, полученным в 2010 и 2011 годы на детекторе CMS LHC CERN при полной энергии сталкивающихся протонов 7 ТэВ и интегральной светимости 240 пб-1, произведён поиск правого W бозона и тяжёлых нейтрино, которые естественно возникают в лево-право симметричном обобщении Стандартной модели. Показано, что экспериментальные данные согласуются с предсказаниями Стандартной модели, и получено новое ограничение сверху на массу правого W бозона 1700 ГэВ, в 2 раза более сильное, чем полученное ранее на ускорителе TEVATRON.

Стартовый и триггерный детектор установки ALICE на Большом адронном коллайдере

В комплексе детекторов установки ALICE важную роль играет созданный в ИЯИ РАН стартовый времяпролётный и триггерный детектор T0, который обеспечивает проведение измерений множественности рождённых частиц, мониторингирование и определение светимости, измерение времени пролёта рождённых частиц, диагностику пучка. Детектор имеет рекордное временное разрешение около 25-30 пикосекунд и позволяет идентифицировать пионы, каоны и протоны при значениях поперечного импульса от 0.5 до 2.5 ГэВ/с.

Модульный калориметр для исследования свойств сжатой барионной материи

Завершена разработка концепции модульного калориметра компенсационного типа - переднего адронного калориметра для определения центральности взаимодействия и угла плоскости реакции в ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте CBM на ускорительном комплексе FAIR в ЦЕРНе. Каждый модуль калориметра состоит из 60 слоёв свинцовых и сцинтилляционных пластин. Для детектирования света в калориметре используются микропиксельные лавинные фотодиоды с плотностью пикселей 15000 на квадратный миллиметр, что необходимо для обеспечения линейности отклика калориметра в широком динамическом диапазоне. Разработка данного детектора является пионерской в применении современных технологий в калориметрии.

Образование электрон-позитронных пар в нейтрон-протонных взаимодействиях

Завершен анализ данных по образованию электрон-позитронных пар в нейтрон-протонных взаимодействиях по данным эксперимента по исследованию рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке

HADES (GSI, Германия), полученным в 2007 году на пучке дейтронов с энергией 1,25 ГэВ/нуклон, налетающем на протонную мишень. Обнаружена значительная изоспиновая зависимость выхода электрон-позитронных пар для нейтрон-протонных и протон-протонных столкновений. Полученные данные являются реперными для анализа спектров электрон-позитронных пар в ядро-ядерных столкновениях.

Адронный калориметр фрагментов в ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН

Одной из основных задач эксперимента NA61(SHINE) на ускорителе SPS в ЦЕРН является поиск критической точки сильнодействующей ядерной материи и детальное исследование начала деконфаймента (освобождения кварков), при центральных столкновениях различных ядер и энергиях в диапазоне от 13 до 158 ГэВ на нуклон. В 2011г. проведены первые измерения для столкновений ядер бериллия и впервые в этом эксперименте был использован передний адронный калориметр фрагментов, разработанный и изготовленный в ИЯИ РАН, который обеспечивает точное определение числа спектаторов (всех участников взаимодействия), необходимого для исследования флуктуаций вблизи критической точки.

Ограничение времени осцилляции нейтрон-антинейтрон из данных SNO по стабильности дейтерия

Из новых данных нейтринной обсерватории в Сэдбери (SNO) по стабильности дейтерия получено ограничение на время осцилляции нейтрон-антинейтрон в вакууме. Время жизни дейтрона, согласно SNO, превышает $3 \cdot 10^{31}$ лет, откуда время перехода нейтрон-антинейтрон в вакууме превышает $1.8 \cdot 10^8$ сек, что вдвое превышает ограничение, полученное в эксперименте с нейтронами от реактора в Гренобле, но меньше результата, полученного из данных по стабильности кислорода (Super-Kamiokande).

Ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд

По данным работы нейтринных телескопов Коллапс (Украина), LSD и LVD (Италия) в течение более 34 лет получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 14.8 года на 90% уровне достоверности.

Повышение эффективности регистрации нейтрона с помощью поваренной соли

С целью улучшения разделения типов нейтрино, регистрируемых при гравитационных коллапсах звёзд на базе детектора LVD в Италии проведён эксперимент, в котором в качестве дополнительной мишени на поверхности объёма, содержащего 8 сцинтилляционных детекторов, было размещено 544 кг поваренной соли. При этом эффективность регистрации нейтрона, образующегося при поглощении нейтрино в сцинтилляторе, возросла с 69% до 80%. Добавление NaCl более чем на 6% увеличивает число регистрируемых взаимодействий электронных нейтрино в детекторе LVD.

Характеристики мюонных групп глубоко под землёй

На статистике 2-х миллионов мюонных событий с помощью детектора LVD (Италия) получены характеристики мюонных групп на глубине 3300 м.в.э. (метров водного эквивалента) и измерено среднее число нейтронов на мюон, генерируемых одиночными мюонами, мюонными группами и ливнями: 4.1 в 1г/кв.м весовой толщины сцинтиллятора.

Подтверждено существование обрезания Грейзена-Зацепина-Кузьмина

Подтверждено существование обрезания Грейзена-Зацепина-Кузьмина в спектре космических лучей сверхвысоких энергий по данным установки Telescope Array

Обнаружение высокоэнергичного гамма-излучения от четырёх гамма-всплесков по данным Fermi LAT

Проведен поиск гамма-излучения высоких энергий, связанного с 581 известными гамма-всплесками, находящимися в поле зрения спутника Fermi LAT. При сравнении с ожидаемым фоном числа фотонов с энергией выше 100 МэВ и выше 1 ГэВ, пришедших за первые 1500 секунд с момента регистрации всплеска из той же пространственной области, обнаружено высокоэнергичное излучение от 19 всплесков, четыре из которых наблюдаются в данном энергетическом диапазоне впервые.

Публикации, доклады

Компактный мюонный соленоид

- 1) Курепин А.Б., Дерменев А.В., Голубева М.Б. Поиск аномальных и экзотических явлений космических лучей в эксперименте CMS на установке CASTOR на Большом адронном коллайдере // Изв. РАН сер.физ. т.75: 428-430, 2011
- 2) Gninenko S.N., Ignatiev A.Yu. and Matveev V.A. Two photon decays of Z' as a probe of Bose Symmetry Violation at CERN LHC // JIMPA 26: 4367, 2011
- 3) The CMS Collaboration. Search for a heavy neutrino and right-handed W of the left-right symmetric model in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV // CMS-PAS-EXO-11-002, 2011
- 4) The CMS Collaboration. ECAL 2010 Performance Results // CMS-DP-2011-011, 2011

Список докладов

- 1) Yu.Musienko. State of the art in SiPMs // Industry-academia matching event (workshop) on SiPM and related technologies, CERN, Geneva, Switzerland, Feb 16-17, 2011
- 2) Д.С.Горбунов. LHC - конец или начало новой физики? // Четвертые Черенковские чтения: новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц, ФИАН, Москва, Россия, 12 апреля 2011
- 3) Yu.Musienko. CMS APD Capsule response to Am-Be neutrons // ECAL Upgrade Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, Apr 18, 2011
- 4) D.Gorbunov. Invisible Higgs in weak bosons associative production // 15th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, Alushta (Crimea), Ukraine, May 22-28, 2011
- 5) D.Kirpichnikov. Vector bosons escaping from the brane: $e+e^- \rightarrow \gamma + \text{nothing}$ // 15th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, Alushta (Crimea), Ukraine, May 22-28, 2011
- 6) M.Kirsanov. Search for W_R and Heavy Neutrino of the Left-Right Symmetric Model in CMS // 15th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, Alushta (Crimea), Ukraine, May 22-28, 2011
- 7) Yu.Musienko. Development of new photosensors for the CMS HCAL Upgrade // 15th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, Alushta (Crimea), Ukraine, May 22-28, 2011
- 8) Yu.Musienko. Studies of large dynamic range silicon photomultipliers for the CMS HCAL upgrade // 6th International Conference "New Developments in Photodetection", Lyon, France, Jul 4-8, 2011
- 9) Yu.Musienko. Response of avalanche photodiodes to alpha particles, fast neutrons, low energy gammas and electrons // 6th International Conference "New Developments in Photodetection", Lyon, France, Jul 4-8, 2011
- 10) D.Tlisov. Search for W_R and heavy neutrino of the Left-Right Symmetric Model in CMS // 15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, Aug 18-24, 2011
- 11) D.Gorbunov. Light inflation in Bottom decays: a close look at the dawn of the Universe // XXth International Workshop "High Energy Physics and Quantum Field Theory", Sochi, Russia, Sep 24 – Oct 1, 2011
- 12) N.Krasnikov. Search For a Heavy Neutrino and a Right-Handed W of the Left-Right Symmetric Model with the CMS Detector // International Conference "Advances of Quantum Field Theory", Dubna, Russia, Oct 4-7, 2011
- 13) Н.В.Красников. Поиск правого W -бозона и тяжелого нейтрино на БАК (эксперимент CMS) // Объединенный семинар RDMS "Физика на LHC", Дубна, Россия, 26 октября 2011
- 14) D.Tlisov. Search for $W_R \rightarrow eN$ // CMS Exotica Workshop, Rome, Italy, Oct 26-28 2011
- 15) D.Kirpichnikov. Vector bosons escaping from the brane // International Workshop "LHC on March", Protvino, Russia, Nov 16-18, 2011

- 16) M.Kirsanov. Search for W_R and Heavy Neutrino of the Left-Right Symmetric Model in CMS // International Workshop "LHC on March", Protvino, Nov 16-18, 2011
- 17) M.Kirsanov. Search for SUSY in CMS // International Workshop "LHC on March", Protvino, Russia, Nov 16-18, 2011
- 18) Yu.Musienko. New photosensors for the CMS HCAL Upgrade // International Workshop "LHC on March", Protvino, Russia, Nov 16-18, 2011
- 19) Н.В.Красников. Поиск правого W -бозона и тяжелого нейтрино в лево-право симметричной модели на детекторе CMS // Научная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, Москва, Россия, 21-25 ноября 2011

AEGIS

- 1) AEGIS: Progress Report to the CERN SPSC . By AEGIS Collaboration, January 2011, 13 pp. CERN-SPSC-2011-007 / SPSC – SR- 07917/01/2011.
- 2) Antihydrogen Physics: Gravitation and Spectroscopy in AEGIS . By AEGIS Collaboration (R. Ferragut, A.S. Belov et al.) May 2011, 6 pp. Published in *Canad. J. Physics* , 89 (2011) 17-24.
- 3) Positronium oscillations to Mirror World revisited S. V. Demidov, D. S. Gorbunov, A. A. Tokareva Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, e-Preprint: ArXiv:1110.6727[hep-ph]
- 4) Two photon decays of Z' as a probe of Bose Symmetry Violation S.N. Gninenko, A.Yu. Ignatiev, and V.A. Matveev Published in *IJMPA* 26 (2011) 4367. e-Preprint: ArXiv:1102.5702 [hep-ph]
- 5) С. Гниненко. Прецизионный соленоид для накопителя позитронов на установке AEGIS: необходимость внешнего магнитного экрана. Совещание коллаборации, ЦЕРН, октябрь 2011.
- 6) С. Гниненко. Поиск пространственной анизотропии в распадах поляризованных позитрониев. Совещание коллаборации, ЦЕРН, октябрь 2011.

CAST

- 1) Latest Results and Prospects of the CAST Axion Solar Telescope
A. Belov (Moscow, INR), S. Borghi (CERN), H. Brauner (Garching, Max Planck Inst., MPE), G. Cantatore (Trieste U. & INFN, Trieste), J.M. Carmona (Zaragoza U.), S.A. Cetin (Dogus U., Kadikoy), J.I. Collar (Chicago U., EFI & Chicago U., KICP) *et al.*. 2011. 7 pp. Published in *J.Phys.Conf.Ser.* 309 (2011) 012001.
- 2) CAST search for sub-eV mass solar axions with ^3He buffer gas.
CAST Collaboration (S. Aune *et al.*). June 2011. 5 pp.
e-Print: arXiv:1106.3919 [hep-ex]. Принято к публикации в *Physical Review Letters*
- 3) Towards a new generation of axion experiments.
I.G. Irastorza (Zaragoza U.), F.T. Avignone (South Carolina U.), S. Caspi (LBL, Berkeley), J.M. Carmona, T. Dafni (Zaragoza U.), M. Davenport, A. Dudarev (CERN), G. Fanourakis (Democritos Nucl. Res. Ctr.), E. Ferrer-Ribas (DAPNIA, Saclay), J. Galan (Zaragoza U. & DAPNIA, Saclay) *et al.*. Mar 2011. 37 pp. Published in *JCAP* 1106 (2011) 013 e-Print: arXiv:1103.5334 [hep-ex]

ALICE

- 1) Higher harmonic anisotropic flow measurements of charged particles in Pb-Pb collisions at 2.76 TeV By ALICE Collaboration; *Phys. Rev. Lett.* 107, 032301 (2011)
- 2) Light vector meson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV.
By ALICE Collaboration (B. Abelev *et al.*). Dec 2011. Temporary entry e-Print: arXiv:1112.2222
- 3) J/ψ polarization in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV.
B. Abelev *et al.* CERN-PH-EP-2011-182, Nov 2011. Temporary entry e-Print: arXiv:1111.1630
- 4) Luminosity determination in ALICE with T0 and V0 detectors.
By ALICE T0 and V0 Collaborations (T. Malkiewicz *et al.*). 2011. 6pp.

Prepared for Quark Matter 2008: 20th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus Nucleus Collisions (QM 2008), Jaipur, India, 4-10 Feb 2008.

Published in Indian J.Phys.85:965-970,2011.

5) Rapidity and transverse momentum dependence of inclusive J/psi production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV.

By ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). CERN-PH-EP-2011-057, May 2011. 23pp.

Published in Phys.Lett.B704:442-455,2011. e-Print: arXiv:1105.0380 [hep-ex]

6) Production of pions, kaons and protons in pp collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV with ALICE at the LHC.

By ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). CERN-PH-EP-2010-085, Jan 2011. 30pp.

Published in Eur.Phys.J.C71:1655,2011. e-Print: arXiv:1101.4110 [hep-ex]

7) Femtoscopy of pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV at the LHC with two-pion Bose-Einstein correlations.

By ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). CERN-PH-EP-2010-083, Jan 2011. 21pp.

e-Print: arXiv:1101.3665 [hep-ex]

8) Two-pion Bose-Einstein correlations in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV.

By ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). CERN-PH-EP-ALICE-2010-006, Jan 2011. 18pp.

Published in Phys.Lett.B696:328-337,2011. e-Print: arXiv:1012.4035 [nucl-ex]

9) Strange particle production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV with ALICE at the LHC.

By ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). CERN-PH-EP-2010-065, Dec 2010. 34pp.

Published in Eur.Phys.J.C71:1594,2011. e-Print: arXiv:1012.3257 [hep-ex]

10) Centrality dependence of the charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV.

By ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). Dec 2010. 14pp.

Published in Phys.Rev.Lett.106:032301,2011. e-Print: arXiv:1012.1657 [nucl-ex]

Выступления на международных совещаниях, конференциях и научно-информационных мероприятиях в 2011 г.:

1. I.A. Pshenichnov, «*Electromagnetic fragmentation of Pb nuclei at the LHC: remarks on models, recent data and proposals for future measurements*», talk given at ALICE Collaboration Physics Forum at CERN, June 15th, 2011

2. I.A. Pshenichnov, I.N. Mishustin, "Electromagnetic fragmentation of nuclei at the LHC", invited talk at the Third International Conference on Nuclear Fragmentation, Kemer (Antalya), Turkey, October 2-9, 2011

Редкие распады

1. Extraction of kaon formfactors from $K^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu$ decay at ISTRA + setup. Physics Letters B 695 (2011) стр. 59-66.

2. Test of lepton flavour universality in $K^+ \rightarrow e^+ \nu$ decays. Physics Letters B 698 (2011) 105-114.

Search for Heavy Neutrino in $K^- \rightarrow \mu^- \nu_h (\nu_h \rightarrow \nu_\mu)$. Направлено в Physics Letters B

3. Study of Ultra rare Decay $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$. Proceeding of Conference "New Trends in High0Energy Physics

4. Диссертация: В. А. Дук «Измерение каонных формфакторов в распаде $K^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu \gamma$ на установке «ИСТРА+»», Москва 2011

Коллапс

1. Н.Ю. Агафонова и др. LVD Коллаборация, "Поиск различных типов нейтрино от коллапсирующих звезд с помощью детектора LVD" Изв. РАН Сер. Физ., т. 75, №3, (2011), 445-447;
2. V. Dadykin, O. Ryazhskaya "Search for neutrino flux from collapsing stars", , Proc. of XV Lomonosov Conference , 18-24/08/2011. (in press);
3. LVD Collaboration, "Neutrino burst from gravitational stellar collapses with LVD", Astroph. Space Sci. Trans., 7, 2011;
4. LVD Collaboration, "Supernova neutrino type identification with adding sodium chloride in LVD", Proc. of XV Lomonosov Conference 2011 (в печати);
5. Агафонова Н.Ю. и др. Коллаборация LVD "Одиночные и множественные мюоны и генерация ими нейтронов в эксперименте LVD", Изв. РАН Сер. Физ., т. 75, №3, (2011), 437-439.

Новые методы детектирования

1. 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. A (2011).

ЭМ взаимодействия ядер

1. L.Z. Dzhilavyan, A.I. Karev, V.G. Raevsky. "Possibilities to produce radioisotopes for nuclear medicine by photonuclear reactions" Phys. Atomic Nuclei, 2011, No 7.
2. Е.Е.Журавлев, А.И.Карев, В.Г.Раевский, Е.В.Ржанов, Л.З.Джилавян, В.Д.Лаптев, Н.И.Пахомов, В.И.Шведун, В.И.Рыкалин, L.Brothers, L.Wildhide. «Предварительные испытания фотоядерного детектора скрытых взрывчатых веществ». Труды VI Международной научно-практической конференции «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам» (Санкт-Петербург, 19-21 октября 2010 года) / Сост. Г.Ф. Архипов, Ю.А. Волкова, М.В. Чернышов. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2011.
3. «Разрезной микротрон на 50 МэВ (математическое моделирование)» «Известия РАН. Серия физическая, 2011, том 75, № 2, с. 256-262. «Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2011 number = 2)»
4. С.С. Вербицкий¹, А.М. Лапик², В.Г. Недорезов², А.В. Русаков², Г.В. Солодухов², А.А. Туринге². Применение фотоядерной методики для обнаружения делящихся материалов. ». Известия РАН сер. Физ., 2011, в печати.
5. V.G.Nedorezov, A.M.Lapik, N.V.Rudnev, A.A.Turinge . "Recent GRAAL Results on Nucleon Spectroscopy at 750-1500 MeV", submitted to Eur.J.of Phys, 2011.

6. A.A.Turinge, V.G.Nedorezov, A.M.Lapik, N.V.Rudnev, "Simultaneous photo-production measurement of π and η mesons on nucleons at 680 – 1500 MeV". Submitted to Prog.Part.Nucl.Phys., 2011.
7. V.G.Nedorezov, A.M.Lapik, N.V.Rudnev, A.A.Turinge . "Recent GRAAL Results on Nucleon Spectroscopy at 750-1500 MeV", STORI- 2011, Frascati, Italy..
8. A.A.Turinge, V.G.Nedorezov, A.M.Lapik, N.V.Rudnev, "Simultaneous photo-production measurement of π and η mesons on nucleons at 680 – 1500 MeV". , Int.School on Nucl.Phys. Eriche, 2011, Italy.
9. В.Г.Недорезов. Новые данные ГРААЛЬ по спектроскопии нуклонов. Сессия ОЯФ РАН, Москва, ИТЭФ, 2011.
10. A.A.Turinge, V.G.Nedorezov, A.M.Lapik, N.V.Rudnev, 61 Международная конференция «ЯДРО 2011» по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Саров, 10-14 октября 2011 г.). Сборник тезисов докладов, 2011
- 11 J.Ahrens, R. Kondratiev, V. Lysin, e.a. :Measurement of the helicity dependent total cross section for the $\gamma n \rightarrow p \pi^- \pi^0$ reaction". EPJ A 47 (2011) 36.
12. Berghäuser, R. Kondratiev, V.Lysin, A. Polonski e.a. "Determination of the η -transition form factor in the $\gamma p \rightarrow p \eta \rightarrow p \gamma e^+ e^-$ reaction". Phys.Lett.B701:562-567,2011
13. J.Ahrens, R. Kondratiev, V. Lysin, e.a. *First Results on the Helicity Dependent Deuteron Photodisintegration between 160 and 480 MeV*. Submitted to EPJ A.
14. N.S.Borisov, G.M.Gurevich, R.L.Kondratiev e.a. Frozen-spin target for experiments at MAMI C. Submitted to Nuclear Instruments and Methods A.
15. Г.М. Гуревич, А.Л.Ерзинкян, В.П.Парфенова. Угловые распределения альфа-частиц, испускаемых ориентированными ядрами, и их связь с ядерной деформацией. Известия РАН (сер. Физ.) 75, 4 (2011) 556-561.
16. G.M.Gurevich, A.L.Erzinkyan, V.P.Parfenova. Angular distributions of alpha particles emitted by oriented nuclei and their relation to nuclear deformation. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics 75, 4 (2011) 520-525.
17. Г.М. Гуревич, А.Л.Ерзинкян, В.П.Парфенова. О возможности ускорения β^- -распада: к проблеме ликвидации радиоактивных ядерных отходов. Известия РАН, Серия физическая (в печати).
18. G.M.Gurevich, A.L.Erzinkyan, V.P.Parfenova. About a possibility of β^- -decay acceleration: to the problem of radioactive nuclear waste disposal. Submitted to Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics

19. P.Adlarson,..V.Grishina e.a. Phys. Rev. Lett., Vol. 106, 242302 (2011)
20. Tulupov B.A., Urin M.H., Semimicrisopic Description of the Fast Neutron Radiative Capture, ISINN-19, 19th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: «Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics», Dubna, Russia, May 25-28, 2011.
21. Б.А.Тулупов, М.Г.Урин, Полумикроскопическое описание простейших фотоядерных реакций с возбуждением изовекторных гигантских дипольного и квадрупольного резонансов, «ЯДРО 2011» 61 Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Саров, 10-14 октября 2011.
22. Б.А. Тулупов, М.Г. Урин, «Полумикроскопическое описание простейших фотоядерных реакций с возбуждением гигантских изовекторных E1 и E2 резонансов» (научная сессия МИФИ, февраль 2011)
23. Л.З. Джилавян, А.И. Карев, В.Г. Раевский. «Обнаружение и идентификация скрытых взрывчатых веществ в системах фотоядерного детектирования». Известия РАН. Серия физическая, 2011, том 75, № 2, стр. 277-282.
24. L.Z. Dzhilavyan, A.I. Karev, V.G. Raevsky. "Detection and Identification of Hidden Explosives in Photonuclear Detection Systems". Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2011, Vol. 75, No 2, pp. 257-262.
25. Л.З. Джилавян, А.И. Карев. "О радиационной безопасности фотоядерного метода обнаружения взрывчатых веществ при досмотре багажа авиапассажиров". Известия РАН. Серия физическая, 2011, том 75, № 11, с. 1655-1659.
26. L.Z. Dzhilavyan, A.I. Karev. "Radiation Safety of the Photonuclear Method for Detecting Hidden Explosives in Examining Airline Passengers' Luggage". Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2011, vol. 75, No 11, pp.1557-1561.
27. Л.З. Джилавян, А.И. Карев, В.Г. Раевский. «Возможности наработки с помощью фотоядерных реакций радиоизотопов для задач ядерной медицины». Ядерная физика, 2011, Том 74, № 12, с. 1728-1734.
28. L.Z. Dzhilavyan, A.I. Karev, V.G. Raevsky. "Possibilities for the Production of Radioisotopes for Nuclear Medicine by Photonuclear Reactions" Physics of Atomic Nuclei, 2011, Vol. 74No 12, pp. 1690-1696.
29. С.С. Бельшев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, А.И. Кареев, В.Г. Раевский, В.И. Шведун. «Образование изотопа ^{18}F в реакции $^{23}\text{Na}(\gamma, n)$ при $E_{\gamma \text{ max}}$ до 55 МэВ». Вестник МГУ. Физика, астрономия (послано в печать)

29. А.М.Громов. «Разрезной микротрон на 50 МэВ (математическое моделирование)» Известия РАН. Серия физическая, 2011, том 75, № 2, с. 256-262. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2011 number = 2)
30. С.С. Вербицкий¹, А.М. Лапик², В.Г. Недорезов², А.В. Русаков², Г.В. Солодухов², А.А. Туринге². Применение фотоядерной методики для обнаружения делящихся материалов. Известия РАН сер. Физ., 2011, в печати.
31. Вербицкий С.С., В.Н.Емохонов, А.М.Лапик, А.В.Русаков, Г.В.Солодухов, М.А.Тиканов, А.Н.Целебровский Дискриминация частиц по форме сцинтилляционного импульса (при энергиях электронов 0,5 - 4 МэВ) методом регистрации времени пересечения сигналом нулевого уровня. ПТЭ, 2010, № 3, с.55-60
32. С.С. Вербицкий¹, А.М. Лапик², В.Г. Недорезов², А.В. Русаков², Г.В. Солодухов², А.А. Туринге². Применение фотоядерной методики для обнаружения делящихся материалов. Доклад на международной конференции Ядро 2010, СПб, 2010
33. А.М.Громов, К.М.Нестеров и др. «Интенсификация химических реакций в водных растворах при воздействии пучком ускоренных электронов. Изв.РАН.сер. Физ., 75, 11 (2011) 1664-1668.
34. A. V.Gromov, K.N.Nesterov e.a. Ensification of chemical reactions in aqueous solutions upon irradiation with an accelerated electron beam. Bull.of Rus.Academy of sci. Phys. 75,11 (2011) 1566-1570.
35. Громов А.М. , Солодухов Г.В. И др. «Установка для непрерывного извлечения металлов из руд». Заявка на получение патента № 2011123160 от 09.06.2011
36. Заявка на патент. Устройство для обнаружения скрытых взрывчатых веществ и наркотических средств. Карев Александр Иванович, Раевский Валерий Георгиевич, Джилавыян Леонид Завенович, Лаптев Валерий Дмитриевич, Пахомов Николай Иванович, Шведунув Василий Иванович, Рыкалин Владимир Иванович, Бразерс Луис Джозеф (Brothers Louis Joseph), Уилхайд Лэрри Кеннет (Wilhide Larry Kenneth).
37. Заявка на патент. Способ идентификации скрытых взрывчатых веществ и наркотиков. Карев Александр Иванович Раевский Валерий Георгиевич, Джилавыян Леонид Завенович, Лаптев Валерий Дмитриевич, Пахомов Николай Иванович, Шведунув Василий Иванович, Рыкалин Владимир Иванович, Бразерс Луис Джозеф (Brothers Louis Joseph), Уилхайд Лэрри Кеннет (Wilhide Larry Kenneth).