Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук

### «УТВЕРЖДАЮ»

Академик-секретарь Отделения физических наук РАН академик В.А.Матвеев « » \_\_\_\_\_ 2013 года

УДК 539.1.07

### ОТЧЁТ

о научно-исследовательской работе по направлению «Участие в глобальных мегапроектах фундаментальной физики» за 2012 год

Номер государственной регистрации темы: 01201050400

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

Москва 2013

### Список исполнителей

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

Группа поддержки работ по программе исследований на Большом адронном коллайдере (рук. Е.Н.Гущин)

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

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)

Лаборатория радиохимических методов детектирования нейтрино Отдела лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики и Галлий-германиевого нейтринного телескопа Баксанской нейтринной обсерватории (заведующий лабораторией чл.-корр. РАН В.Н.Гаврин)

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

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

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

### ΡΕΦΕΡΑΤ

Отчёт содержит: 190 с., 107 рис., 4 табл., 32 источника, 313 ссылок на публикации.

КОЛЛАЙДЕР, БОЛЬШОЙ АЛРОННЫЙ КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ТЯЖЁЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА СИЛЬНОВЗАИМОДЕЙ-СТВУЮЩЕЙ ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ, ДЕКОНФАЙМЕНТ, ПРОТОН-ПРОТОННЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, ЯДРО-ЯДЕРНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, РЕЛЯТИВИСТСКИЕ МНОЖЕСТВЕННОСТЬ, ПОПЕРЕЧНЫЙ ИМПУЛЬС, ФЛУКТУАЦИИ, ЭНЕРГИИ, ДАЛЬНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ, АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР, ТРИГГЕР, ВРЕМЯПРОЛЁТ-НЫЙ ДЕТЕКТОР, НЕЙТРИНО, АНТИНЕЙТРИНО, МЮОНЫ, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ НЕЙТРОНЫ, МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, СТАНДАРТНАЯ СОЛНЕЧНАЯ МОДЕЛЬ, СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ИСКУССТВЕННЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРИНО, ДВУХЗОННАЯ МИШЕНЬ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР, НУКЛОН, ФОТОН, МЕЗОН.

В проекте «Моделирование физических процессов для детектора «Компактный мюонный соленоид» объектом исследования являются процесс рождения и возможность экспериментального наблюдения тяжелого майорановского нейтрино и дополнительных калибровочных бозонов в эксперименте CMS на Большом адроном коллайдере в ЦЕРНе.

Цель работы: набор экспериментальных данных в физических сеансах измерений при энергии сталкивающихся пучков протонов до 8 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<sub>R</sub> и N<sub>e</sub> с использованием программы полного моделирования и реконструкции событий в детекторе CMS CMSSW. Моделирование фоновых событий с сигнатурой два лептона и две струи.

Изучение шумов адронного калориметра установки CMS.

Методы выполнения работы: разработка методов выделения событий рождения тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов в эксперименте CMS. Развитие Монте-Карло-генераторов для моделирования таких процессов. Анализ данных эксперимента CMS, собранных в 2010-2012 гг. Создание и поддержка необходимого программного обеспечения.

Экспериментальные результаты: в результате анализа данных, полученных коллаборацией CMS в течение 2010-2012 гг. и соответствующих полной светимости БАК 19,7 фб<sup>-1</sup>, в 2013 г. были получены предварительные ограничения на массу правого бозона  $W_R$  около 3000 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино 1800 ГэВ. Новый нижний предел на массу правого W-бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, в 3,7 раза.

Научно-технический уровень выполненной НИР: результаты, полученные в эксперименте CMS в физических сеансах измерений при энергии сталкивающихся пучков протонов до 8 ТэВ по поиску тяжёлого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов, уникальны и обозначают передовой рубеж современной науки на мировом уровне.

В рамках изучения СР-нарушения и редких распадов В-мезонов в 2013 г. в эксперименте LHCb проведен анализ данных, полученных в 2011-2012 г.г. Среди полученных результатов можно выделить несколько наиболее интересных, в том числе более точное измерение вероятности распада  $B_s \rightarrow \mu\mu$ , измерения угла  $\gamma$  унитарного треугольника матрицы смешивания, обнаружение СР-нарущения в распадах  $B^{0}_{s}$  мезона, поиски новой физики в распадах  $B \to K^{(*)}\mu\mu$  и ряд других. Измерение угла  $\gamma$  унитарного треугольника матрицы смешивания Кабиббо-Кобаяши-Маскавы выполнено в комбинации распадов  $B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}$ . Анализ распределений распадов  $B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}$  позволил установить доверительный интервал угла  $\gamma \in [42.6, 99.6]^{\circ}$  Пна 95% CL. Комбинация  $B^{\pm} \rightarrow DK^{\pm}$  и  $B^{\pm}$  $\rightarrow$  D $\pi^{\pm}$  распадов дает наилучший фит значению  $\gamma = 72.6^{\circ}$   $\Box$  доверительный интервал угла  $\gamma \in [40.2, 92.7]^{\circ}$  Пна 95% CL. Измерение вероятности редкого распада  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  важно для поиска возможных вкладов новой физики. Коллаборацией LHCb доложено наблюдение избытка событий, соответствующее вероятности распада  $B(B^0_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) =$  $(2.9_{+1,1-1,0}) \times 10^{-9}$  (4.0 стандартных отклонений). Результат соответствует стандартной модели. Произведено первое в мире наблюдение СР-нарушения в распадах B<sup>0</sup><sub>s</sub> мезона  $A_{CP}(B^0_s \rightarrow K^-\pi^+) = +0.27\pm 0.04\pm 0.01$  на уровне >5 $\sigma$ . Среди наиболее интересных результатов следует отметить также наиболее точное измерение времени жизни Ль бариона:  $\tau(\Lambda_{\rm b})/\tau({\rm B}^0) = 0.976 \pm 0.012 \pm 0.006$ , которое подтверждает предсказания Heavy Quark Expansion теории. Также представляет интерес наблюдение распада  $B^+_c \rightarrow B^0_s \pi^+$  на уровне 5σ – первое наблюдение распада В-мезона в другой В-мезон, когда b-кварк играет роль спектаторного кварка. Также произведено измерение форм-фактора независимой переменной в распаде  $B^0 \square K^*(892)^{\square 0} \mu^+$ , показано локальное по инвариантой массе двух мюонов отклонение от предсказания стандартной модели, соответствующее вероятности <0.5% (3.7σ).

Параллельно обработке данных в 2013 г. коллаборация LHCb проводила работы по подготовке модернизации установки для работы на повышенной энергии и светимости после 2018 г. Группой ИЯИ РАН, отвечающей за разработку фотодетекторов для волоконного треккера LHCb, в 2013 г. была продолжена разработка новых фотодиодов совместно с фирмой КЕТЕК (Мюнхен), было проведено изучение характеристик новых гейгеровских диодов фирмы HAMAMATSU.

По теме: «Эксперимент ALICE, поиск кварк – глюонной материи при столкновении ультрарелятивистских ядер» проведены испытания лазерной системы с применением нового оптического кабеля длиной 30 м, специально проложенного между лазерным модулем и детекторной системой T0-А установки ALICE.

Проведён демонтаж 11 детекторов T0-А системы с установки ALICE с целью испытаний на лабораторном стенде.

Проведены испытания T0-A детекторов на лабораторном стенде с применением лазера и нового короткого оптического кабеля. Были сделаны выводы, что падение трансмиссии света в коротких кабелях является результатом радиационных повреждений коротких оптических кабелей в процессе эксплуатации в жёстких радиационных условиях эксперимента ALICE. Короткие оптические кабели подлежат замене.

Проведена подготовка к перемещению электроники детектора в связи с модернизацией триггерной системы установки.

Измерено временное разрешение детектора T0 (после калибровки детектора) при проведении физических измерений при столкновениях ядер <sup>208</sup>Pb при энергии в системе центра масс  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV. В настоящее время детектор обеспечивает рекордное временное разрешение около 25-30 пикосекунд.

Выполнено измерение и мониторирование светимости по триггерным сигналам детектора T0.

Для работы детектора T0 отлажена и запущена в работу система управления (DCS), учитывающая новые возможности установки. Она обеспечивает безопасную работу подсистем детектора, контролирует параметры оборудования детектора, следит за состоянием подсистем детектора.

В эксперименте от ИЯИ участвуют 14 человек – из них 10 научных сотрудников, 2 аспиранта, 2 студента (4 сотрудника моложе 36 лет)

По теме «Исследование коллективных эффектов и ненуклонных степеней свободы в ядрах и переходных процессов в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов

и тяжёлых ионов с ядрами» для подготовки Технического проекта калориметра под малым углом по отношению к направлению пучка для сооружаемой установки MPD на коллайдере NICA было запланировано проведение исследования работы различных прототипов калориметра на выведенном пучке Нуклотрона ОИЯИ.

Для испытаний на выведенном пучке были изготовлены 4-е модуля адронного калориметра группой Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Измерения были проведены в ноябре 2013 г. Результаты обрабатываются.

По теме: «Исследование рождения адронов в адрон-адронных столкновениях на CERN SPS (эксперимент NA61)» в начале 2013 г. проведен сеанс измерений выходов заряженных частиц в реакции <sup>7</sup>Be + <sup>9</sup>Be на фрагментированном пучке ядер <sup>7</sup>Be при энергиях налетающих ядер бериллия 13 и 30 АГэВ. Таким образом, в течение 2011-2013гг полностью завершена программа измерений на ядрах <sup>7</sup>Be при энергиях 13, 20, 30, 40, 75 и 150 АГэВ. Для измерения центральности взаимодействий в этих экспериментах использовался передний адронный калориметр, разработанный и изготовленный (2006 – 2011 г.г.) в ИЯИ РАН.

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

По теме «Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерноядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)» в 2013г. проводился анализ экспериментальных данных по столкновению тяжелых ионов золота Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с фиксированной мишенью, полученных на установке XAДEC в 2012г. Продолжалась работа по разработке, моделирование и тестирование электромагнитного калориметра установки XAДEC для работы на создаваемом ускорителе SIS100 комплекса ФАИР, создаваемого в Дармштадте.

В эксперименте ХАДЕС от ИЯИ участвуют 11 человек – из них 10 научных сотрудников, (включая 2 сотрудников моложе 36 лет), 1 техник.

По теме «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Германия)» в 2013 году подготовлен Технический проект переднего адронного калориметра установки CBM. Проект получил одобрение коллаборации и отправлен в ФАИР для внешней экспертизы, которая завершается на момент составления данного отчета.

Завершен анализ экспериментальных данных по исследованию отклика модуля адронного калориметра на пучке канала T10 в ЦЕРНе при импульсах налетающих протонов 2 – 6 ГэВ/с. Результаты опубликованы в виде препринта ИЯИ РАН.

Подготовлена и отправлена в печать статья в журнал «Приборы и техника эксперимента».

Показано, что передний адронный калориметр обеспечивает наилучшую точность восстановления угла плоскости реакции по сравнению с другими детекторными системами CBM, обеспечивает необходимое энергетическое разрешение и линейность отклика калориметра при измерении энергии спектаторов.

В рамках модернизации установки ОКА закончено изготовление первых 24 (из 120), модернизированных модулей Годоскопического Детектора Адронов (ГДА).

В эксперименте NA62 проводились работы по анализу полученных ранее данных и по плановой модернизации элементов установки, в частности, по созданию новой охранной системы (SAC, IRC) и матричного годоскопа CHOD.

В рамках исследования нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах каонов проводится анализ 5% данных эксперимента E949 на предмет поиска тяжёлых стерильных нейтрино с массами 140-300 МэВ. Получен новый предел на смешивание тяжелых стерильных нейтрино с обычными нейтрино: ограничение на вероятность смешивания в области масс тяжелых нейтрино от 180 до 300 МэВ на 90%-м уровне достоверности составляет от  $2 \times 10^{-7}$  до  $2 \times 10^{-8}$  соответственно. Анализ 5% данных позволил отработать алгоритм поиска тяжелых нейтрино по пику в импульсном спектре продуктов распада каонов, а так алгоритм оценки фоновых событий. Начат анализ оставшихся данных (95%). Для эксперимента по прецизионному измерению вероятности распада положительного каона K+ ->  $\pi$ +vv ORKA (Фермилаб, США) изготовлены элементы детекторов на основе сцинтилляционных пластиков.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведен анализа данных, набранных в 2010 - первой половине 2013 года. В результате было получено убедительное доказательство осцилляций мюонных нейтрино в электронные – впервые в мире. В дальнем детекторе Супер-Камиокандэ было зарегистрировано 28 событий, идентифицированных как электроноподобные, появившиеся в результате взаимодействия в детекторе через заряженный ток электронных нейтрино с энергией от 100 до 1250 МэВ. Ожидаемое число таких событий, предполагая отсутствие осцилляций могут быть получены в результате флуктуаций фона ничтожно мала и составляет величину меньше  $10^{-12}$  (статистическая значимость 7.3 $\sigma$ ). В случае  $\delta = 0$  (нет СР-нарушения) центральная величина  $\sin^2 2\theta_{13}$  имеет значение  $0.140^{+0.038}$ -0.032 для нормальной иерархии масс нейтрино (m<sub>3</sub> > m<sub>2</sub>) и  $0.170^{+0.045}$ -0.037 для инверсной иерархии (m<sub>3</sub> < m<sub>2</sub>). Ненулевое значение угла  $\theta_{13}$  позволяет решать

задачу определения СР-нарушающей фазы δ в лептонном секторе. Для этого необходимо точно измерить другой («атмосферный») угол смешивания θ<sub>23</sub>, который измеряется при изучении «исчезновения» мюонных нейтрино («дефицит»).

При исследовании «дефицита» мюонных нейтрино (данные из 1-3 сеансов,  $3 \times 10^{20}$  POT) в дальнем детекторе получено 58 мюоноподобных событий при ожидаемом числе событий 205±17 (без осцилляций). Анализ этих событий дает величину  $\Delta m^2_{32}$  (разность квадратов масс нейтрино) на уровне  $2.44 \times 10^{-3}$  MэB/c2, а угол смешивания согласуется с величиной sin<sup>2</sup>2 $\theta_{23}$ =1.00, что подтверждает данные других экспериментов (SK и MINOS).

В рамках подготовки будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой изготовлено свыше трех тысяч пластин сцинтиллятора на основе полистирола методом экструзии (в компании Унипласт, г. Владимир). В 202-м корпусе ИЯИ РАН создан производственный участок для вырезания канавок в этих пластинах, а также для вклеивания оптического спектросмещающего волокна в данные канавки.

Проведены конструкторские работы по оптимизации дизайна оптического разъема для соединения оптоволокна, вклеенного в пластический сцинтиллятор, и фотодиода, служащего для сбора сцинтилляционного света. Произведено около двадцати тысяч этих разъемов (в компании Унипласт, г. Владимир).

На подземных сцинтилляционных детекторах ИЯИ РАН: АСД (Артёмовск, Украина) и LVD (Гран Сассо, Италия) ведутся исследования в области нейтринной физики, физики космических лучей и астрофизики.

Основной целью экспериментов является поиск нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике и Магеллановых облаках. Регистрация всех типов нейтрино является уникальной особенностью этих установок.

По данным работы нейтринных телескопов в течение 36 лет (с 1977 г по 2013 г) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 15.64 года на 90% уровне достоверности.

В эксперименте OPERA получен первый результат по поиску осцилляций  $v_{\mu} \rightarrow v_{e}$ по данным работы пучка мюонных нейтрино ЦЕРН – Гран Cacco (CNGS) 2008 – 2009 годов. Данные сопоставимы с неосцилляционной гипотезой в модели смешивания нейтрино трех ароматов. Получено ограничение на параметры углов смешивания в случае нестандартных осцилляций: sin<sup>2</sup> (2 $\theta_{new}$ ) <7.2 × 10<sup>-3</sup> (при  $\Delta m_{new}^2 > 0.1 \text{ eV}^2$ ) на 90% уровне достоверности.

По результатам обработки данных 2009-2011 эксперимента LVD получены первые результаты по поиску осцилляций  $v_{\mu} \rightarrow v_e$  в пучке нейтрино CNGS. Модульная структура установки позволяет определить топологию события и разделить события от электронного и мюонного нейтрино. Доля кандидатов на регистрацию  $v_e$  в мюоном пучке составляет  $\delta \approx 0.8$  %, что близко в доле электронных нейтрино в пучке.

В международном эксперименте OPERA, с участием российских ученых ИЯИ РАН, обнаружено три события-кандидата на появление тау нейтрино в канале ν<sub>µ</sub>→ν<sub>τ</sub>.

В проекти «Галлий-германиевый нейтринный телескоп» объектом исследования является нейтринное излучение Солнца. Цель работы — исследование физики Солнца и физики нейтрино.

Метод измерения потока солнечных нейтрино на Галлий-германиевом нейтринном телескопе уникален и на сегодняшний день дает единственную возможность детектирования низкоэнергетической части спектра солнечного нейтринного потока.

В результате исследований получена величина скорости захвата солнечных нейтрино с энергией выше 0.233 МэВ на металлическом галлии  $65.0^{+3.6}_{-3.7}$  SNU, что в предположении MSW-LMA решения солнечных нейтринных осцилляций соответствует полному потоку *pp* нейтрино ( $6.1 \pm 0.84$ )×10<sup>10</sup> ve/(см<sup>2</sup> сек). Этот результат в настоящее время в мире является наиболее статистически обеспеченным.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: наиболее низкий среди всех нейтринных телескопов порог регистрации нейтрино 0.233 МэВ, низкий фон, высокая эффективность извлечения единичных атомов германия-71 из многотонной (~50 тонн) массы металлической галлиевой мишени (~ 95%) и регистрации их распадов в низкофоновых миниатюрных пропорциональных счетчиках (~ 74 %).

В проекте «Калибровочный эксперимент с искусственным источником нейтрино на основе радионуклида 51Cr на двухзонной галлиевой мишени» объектом исследования является обнаруженный в калибровочных измерениях с искусственными источниками нейтрино 51Cr и 37Ar в галлиевых экспериментах SAGE и GALLEX физический эффект неизвестной природы, получивший название «галлиевой аномалии».

Цель работы — исследование возможных осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния на коротких расстояниях.

Метод поиска переходов активных электронных нейтрино в стерильные состоит в исследовании взаимодействия потока нейтрино от мощного компактного искусственного источника 51Cr с ядрами галлиевой мишени, разделённой на две концентрические зоны.

Этапы работ, запланированные на 2013 год, выполнены полностью.

В отчетный период на комплексе установок Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (БГНТ) выполнялись экспериментальные исследования по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких (E>10 ТэВ) энергий, по поиску магнитных монополей и массивных частиц – кандидатов на роль холодной темной материи. В период зимних экспедиций выполнялись работы по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной аппаратуры и подводных линий кабельной связи комплекса БГНТ, диктуемые условиями их эксплуатации в водной среде.

Продолжались разработка и создание глубоководной регистрирующей аппаратуры, систем управления и передачи данных кластера гирлянд – автономного базового элемента создаваемого нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба НТ1000. В зимнюю экспедицию 2013 года количество полномасштабных гирлянд регистрирующих модулей в составе кластера было доведено до трех (из восьми, предусматривающихся проектом). Основными целями проводившихся в межэкспедиционный период исследований являлись выявление ошибок в проектировании аппаратуры и разработка оптимальных алгоритмов управления системой сбора данных детектора. Испытания позволили выявить недостаточно надежные конструктивные элементы, устранять сбои, возникающие процессе работы аппаратуры, И оптимизировать алгоритмы управления, В обеспечивающие бесперебойную работу измерительной системы. В целом, результаты работы кластера в составе первых трех гирлянд НТ1000 в течение 2013 года можно считать вполне удовлетворительными, что позволило планировать создание и развертывание в 2014 году опытного образца кластера НТ1000 из пяти гирлянд, рассчитанных на подключение 24-х оптических модулей каждая. В настоящее время подготовка аппаратуры такого кластера близка к завершению и проводятся её лабораторные испытания. Работы планируется завершить до конца января 2014 года.

Выполнен значительный объём работ по систематизации и анализу данных. В качестве наиболее значимого результата здесь следует отметить завершение анализа массива данных, накопленных за 1038 дней эффективной работы детектора HT200, и получение одного из наиболее сильных в настоящее время экспериментальных ограничений в задаче исследования величины спин-зависимого сечения упругого рассеяния частицы темной материи на протоне (которые на два порядка сильнее пределов, полученных в прямых экспериментах по поиску WIMP).

Работу над проектом вела группа российских институтов – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (головная организация), НИИ прикладной физики Иркутского

государственного университета, Нижегородский государственный политехнический университет, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, НИИ ядерной физики Московского государственного университета, с участием специалистов международного центра ОИЯИ (г. Дубна), DESY-Zeuthen (Германия), Института исследований окружающей среды (Швейцария) и EvoLogics (Германия).

Отчёт по НИР за 2013 год по подтеме «Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной и космологические следствия их рождения» и по подтеме «Фотоядерные взаимодействия лептонов при сверхвысоких энергиях» содержит краткое описание содержания научных работ, опубликованных и посланных в печать в 2013 году.

Ведётся разработка новых (альтернативных) методов регистрации космических нейтрино и других частиц сверхвысоких и экстремально высоких энергий, цель работы: участие в создании нейтринного телескопа (оптического) в Средиземном море и разработка гидроакустического метода детектирования космических нейтрино; разработка радиоволнового метода регистрации космических нейтрино, взаимодействующих с массивами антарктического льда; разработка радиоастрономического метода регистрации космических энергий (нейтрино, протонов и др.), взаимодействующих с Луной; разработка полупроводниковых детекторов частиц на основе новейших микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД).

В отчете приведены новые результаты, полученные в лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН по физике электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер. Особое внимание уделено изучению поляризационных эффектов и спиновой структуры нуклонов. Начато изучение нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках электронов, релятивистских ионов и фемтосекудных тераваттных лазеров. Все приведенные в отчете результаты являются новыми и соответствуют мировому уровню.

## Содержание

Реферат	3
Введение	16
Основные результаты	25
1 Моделирование физических процессов для детектора «Компактный	
мюонный соленоид	25
1.1 Поиск тяжёлых нейтрино в эксперименте CMS.	25
1.2 Адронный калориметр HCAL	31
1b Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb.	39
2 Исследования по релятивистской ядерной физике	58
2.1 Исследование ядро-ядерных столкновений на установке ALICE на	
встречных пучках ускорителя LHC (CERN)	58
2.2 Исследование коллективных эффектов и ненуклонных степеней	
свободы в ядрах и переходных процессов в сжатой ядерной материи при	68
столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами	
2.3 Исследование рождения адронов в адрон-адронных столкновениях на	
CERN SPS (эксперимент NA61)	70
2.4. Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и	-
ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)	97
2.5 Участие ИЯИ РАН в анализе экспериментальных данных сеанса Au+Au	
при энергии налетающих ядер золота 1.24 ГэВ на нуклон.	102
2.6 Участие ИЯИ РАН в разработке, моделировании и тестировании	
электромагнитного калориметра ХАДЕС	104
2.7 Исследование свойств сжатой барионной материи на установке СВМ в	10.
GSI (Германия)	106
3 Исследование редких распадов элементарных частиц	110
4 Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных	110
СР и Т симметрий в распадах каонов	113
5 Электронные методы детектирования нейтрино	115
5.1 Поиск нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд на	110
сцинтилляционных детекторах LVD и АСД	119
5.2 Поиск осцилляций $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ в экспериментах LVD и OPERA	121
5.3 Регистрация третьего события-кандидата в детекторе OPERA	126

6 Галлий-германиевый нейтринный телескоп.	129
6.1 Баксанский галлиевый эксперимент.	129
6.2 Калибровочный эксперимент с искусственным источником нейтрино на основе радионуклида <sup>51</sup> Cr на двухзонной галлиевой мишени	130
7 Нейтринная астрофизика высоких энергий	135
7.1 Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз.Байкал	135
7.2 Проблема геофизических нейтрино	138
7.3 Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной и космологические следствия их рождения	140
7.4 Фотоядерные взаимодействия лептонов при сверхвысоких энергиях	140
7.5 Исследование характеристик потоков частиц космического излучения	
высоких и сверхвысоких энергий на комплексе установок БПСТ. Нейтринные	141
эксперименты на БПСТ	
8 Разработка альтернативных методов детектирования космических	
нейтрино сверхвысоких и экстремально высоких энергий	142
8.1 Проведение гидроакустических исследований, связанных с проектом	
НЕСТОР	143
8.2 Гидроакустический, радиоволновой и радиоастрономический методы	
детектирования космических нейтрино	145
8.3 Разработка лабораторных образцов детекторов элементарных частиц на	147
основе лавинных фотодиодов нового поколения – МЛФД	
8.4 Разработка и синтез соединений лития для изготовления	
полистирольного сцинтиллятора, регистрирующего нейтроны.	148
9 Исследование электромагнитных взаимодействий ядер	150
Заключение	154
Список использованных источников	162
9 Список научных публикаций	164

### ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте применябтся следующие термины с соответствующими определениями:

ADC – цифро-аналоговый преобразователь.

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

СКМ-матрица - Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-матрица, матрица смешивания кварков

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

CMSSW - CMS Software – пакеты программ реконструкции и моделирования различных реакций в детекторе CMS

СРТ-нарушение — нарушение фундаментальной <u>симметрия физических законов</u> при <u>преобразованиях</u>, включающих одновременную инверсию <u>заряда</u>, <u>чётности</u> и <u>времени</u>.

DAQ – система сбора данных;

eV (эВ) - электронвольт - широко используемая в физике единица энергии, равная энергии получаемой электроном при ускорении в электростатическом поле, когда разность потенциалов между двумя позициями частицы составляет один Вольт;

fm (фм) – единица длины в ядерной физике равная 10<sup>-15</sup> метра

FPGA – Field Programmed Grid Array - программируемая логическая интегральная схема;

FEE – Front-End-Electronics - детекторная электроника;

HADES - (High Acceptance DiElectron Spectrometer)

МАРД- микропиксельный лавинный фотодиод;

MPD - (Multi- Purpose Detector)

mV (мВ) – единица измерения амплитуды сигнала, равная 10<sup>-3</sup> вольта;

NA61/SHINE - SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment - эксперимент на SPS

ns (нс) – наносекунда – 10<sup>-9</sup> секунды;

ps (пс) – пикосекунда – 10<sup>-12</sup> секунды;

PVDF - поливинилиденфторид

Pythia - стандартная программа моделирования взаимодействий адронов высоких энергий

SAGE – Российско-Американский галлиевый эксперимент.

SMT – (Surface Mount Technology) - поверхностная технология монтажа.

SNU – (Solar Neutrino Unit) Солнечная Нейтринная Единица, обозначает один захват нейтрино в день в мишени, содержащей 10<sup>36</sup> атомов нейтрино-абсорбирующего изотопа.

SPS – Супер-протонный синхротрон, кольцевой ускоритель в ЦЕРНе

TeV (ТэВ) – единица энергии, равная 10<sup>12</sup> эВ;

ZDC - (Zero Degree Calorimeter)

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

ВС – внутренний стандарт.

ВТИ - внутреннее тормозное излучение

ГИП - газоизостатическое прессование

ИБП – источник бесперебойного питания

КХД - квантовая хромодинамика - современная теория сильных взаимодействий

ЛВС – локальная вычислительная сеть

 $\Pi M \Phi \Pi$  - Лаборатория моделирования физических процессов при высоких энергиях

ЛПСМ - лево-правосимметричная модель

ПО - программное обеспечение

ППД – полупроводниковый детектор

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

Тэватрон - ускоритель Национальной лаборатории им. Э.Ферми, США

Фб - фемтобарн, 10<sup>-15</sup> барн

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

ЦЕРН (CERN) - Европейский центр ядерных исследований

ЭРХ – электрорафинированный хром

ЭХ – электролитический хром

### Введение

Открытие нейтринных осцилляций и, следовательно, ненулевой массы покоя нейтрино является на сегодняшний день одним из самых ярких и надёжных указаний на существование новой физики за пределами Стандартной модели (СМ). Малость масс нейтрино может быть связана с существованием их партнеров – более тяжёлых нейтрино, возникающих во многих расширениях СМ, что делает их поиск актуальной и важной задачей.

Сотрудниками Лаборатории моделирования физических процессов при высоких энергиях (ЛМФП) в 2013 г. было продолжено исследование процесса рождения и возможности экспериментального наблюдения тяжёлого майорановского нейтрино и дополнительных калибровочных бозонов в рамках минимальной лево-правосимметричной модели (ЛПСМ) в эксперименте «Компактный мюонный соленоид» (Compact Muon Solenoid – CMS) в ЦЕРНе. Модель объясняет нарушение чётности в слабых взаимодействиях и предсказывает существование дополнительных калибровочных бозонов W<sub>R</sub> и Z', а также семейства тяжёлых нейтрино N майорановского типа. Распады W<sub>R</sub> и N с массами вплоть до 3,5 ТэВ и 2,3 ТэВ соответственно могут быть обнаружены на установке CMS на уровне достоверности 5σ при интегральной светимости БАК порядка L<sub>t</sub> = 30 фб<sup>-1</sup>. 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. 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.

Наиболее привлекательными являются модели, которые содержат массивные нейтрино. Так, например, тяжёлые 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–правосимметричных моделях. Малая масса нейтрино может также генерироваться, например, с помощью механизма «see-saw». Этот механизм основан на

майорановской массе - в нем тяжёлое майорановское нейтрино смешивается с обычным нейтрино или, другими словами, проводит очень малое время в виде легкого нейтрино. Такой механизм генерирует массы порядка  $Y^2V^2/M_N$ , где V = 246 ГэВ, 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  $Y^2V^2/M_N$ .

Тяжёлые 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 тяжёлых нейтрино является одним из актуальных и, возможно, оптимальных путей, которые могут привести к созданию новой, более полной, теории.

В рамках изучения СР-нарушения и редких распадов В-мезонов в 2013 г. в эксперименте LHCb проведен анализ данных, полученных в 2011-2012 г.г. Среди полученных результатов можно выделить несколько наиболее интересных, в том числе более точное измерение вероятности распада  $B_s \rightarrow \mu\mu$ , измерения угла  $\gamma$  унитарного треугольника матрицы смешивания, обнаружение СР-нарущения в распадах B<sup>0</sup><sub>s</sub> мезона, поиски новой физики в распадах  $B \rightarrow K^{(*)}$   $\mu\mu$  и ряд других. Параллельно обработке данных в 2013 г. коллаборация LHCb проводила работы по подготовке модернизации установки для работы на повышенной энергии и светимости после 2018 г. Группой ИЯИ РАН, отвечающей за разработку фотодетекторов для волоконного треккера LHCb, в 2013 г. была продолжена разработка новых фотодиодов совместно с фирмой КЕТЕК (Мюнхен), было проведено изучение характеристик новых гейгеровских диодов фирмы HAMAMATSU.

По теме «Исследования по релятивистской ядерной физике» в комплексе детекторов установки ALICE (A Large Ion Collider Experiment) важную роль играет

стартовый время - пролетный и тригтерный детектор T0 (рис.1), созданный при определяющем вкладе лаборатории релятивистской ядерной физики ИЯИ РАН. Главная научная цель эксперимента – всестороннее исследование свойств и процессов эволюции кварк – глюонной материи. T0 детектор располагается вблизи номинальной точки столкновения релятивистских ионов и обеспечивает проведение измерений множественности рожденных частиц, мониторирование и определение светимости, измерение времени пролёта рождённых заряженных частиц, диагностику пучка и формирует триггерные сигналы нулевого уровня.

Одним из наиболее важных параметров необходимых для обнаружения смешанной кварк-глюонной фазы при взаимодействии тяжелых ионов в проекте MPD/NICA является определение центральности столкновения для прецизионного отбора событий при поиске флюктуаций в области критической опалесценции.

С этой целью 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. Ранее подобный слоистый калориметер был предложен сотрудниками ИЯИ РАН для экспериментов NA61 и CBM. Главным отличием в использовании калориметра в проекте MPD/NICA является его работа при существенно более низких энергиях до 5-6 ГэВ. Изучение работы подобных калориметров при таких энергиях ранее не проводилось.

Одной из основных задач эксперимента NA61(SHINE) в ЦЕРНе является поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи и детальное исследование начала деконфаймента. Для поиска критической точки необходимы измерения наблюдаемых, чувствительных к исследуемым эффектам. Такими наблюдаемыми являются множественность рождения и спектральные характеристики адронов, включая странные барионы/антибарионы, и пособытийные вторичных флуктуации некоторых физических величин, таких как множественность, заряды, поперечные импульсы, отношения выхода странных и нестранных мезонов. Резкое увеличение величины флуктуаций может являться отличительной чертой физических явлений вблизи критических областей. Программа исследований NA61 включает проведение измерений выходов заряженных частиц в центральных столкновениях ядер <sup>7</sup>Be + <sup>9</sup>Be, Ar + Ca и Xe + La при энергиях 13, 20, 30, 40, 80, 158 ГэВ на нуклон. Программа работ включает также исследование распределений заряженных частиц с большим поперечным импульсом В протон-протонных И протон-ядерных взаимодействиях. Наблюдение подавления выхода адронов с большим поперечным

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

Для определения потоков нейтрино в эксперименте T2K и минимизации систематических ошибок в определение параметров смешивания, в эксперименте NA61 измерены с высокой точностью выходы заряженных пионов и каонов в реакции р + С при энергии налетающих протонов 31 ГэВ.

Обсерватория Пьера Оже и эксперимент КАЅКАDЕ анализируют широкие атмосферные ливни с целью получения информации об источниках происхождения космического излучения. В эксперименте NA61 выполнены измерения сечений образования заряженных частиц при взаимодействии пионов с ядрами углерода при энергии пионов 158 и 350 ГэВ. Эти сечения необходимы для реконструкции событий космического излучения. Результаты NA61 помогут улучшить разрешение экспериментов на космических лучах, необходимые для определения элементного состава космического излучения при высоких энергиях.

NA61/SHINE начал детальное сканирование в двумерном пространстве параметров: размер сталкивающихся ядер (p + p, p + Pb, Be + Be, Ar + Ca, Xe + La) и энергия столкновений (13A, 20A, 30A, 40A, 80A, 158A ГэВ/с) в 2009 г. До настоящего времени использовались вторичные пучки протонов и ядер Ве, полученные фрагментацией ядер свинца на бериллиевой мишени и сформированные каналом транспортировки установки NA61.В 2013г. завершено сканирование для реакции Be + Be. В дальнейшем планируется использовать первичные пучки ядер Ar, Xe и свинца, что обеспечивает совместимость с программой LHC.

Физическая программа работ на широкоапертурном магнитном спектрометре ХАДЕС направлена на поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии \_ фундаментальной симметрии сильных взаимодействий. При нулевой температуре и барионном химическом потенциале физический КХД-вакуум обладает двумя основными характеристиками: конфайнментом и спонтанно нарушенной киральной симметрией. Нарушение киральной симметрии определяет базовые свойства наблюдаемого мира, в частности, массовый спектр легких адронов. В столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях устанавливаются экстремальные температуры и плотности, при которых ожидается «плавление» кирального конденсата и формирование кирально-симметричной среды. Однако, уже при

энергиях налетающих ядер порядка 1 ГэВ на нуклон в лабораторной системе данные эффекты могут проявиться, в частности, в изменении свойств легких векторных мезонов (сдвиг массы и изменение ширины резонансов), рожденных в ядро-ядерных столкновениях. Изучение свойств этих мезонов посредством детектирования их распадов с испусканием электрон-позитронных пар является важнейшим направлением исследований на установке ХАДЕС.

Исследование коллективных потоков заряженных частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ядер, также является одним из важных направлений на ХАДЕСе. При энергиях пучка порядка 1-2 ГэВ на нуклон, основная мотивация для изучения потоков связана с исследованием уравнения состояния ядерной материи. Исследование уравнения состояния ядерной материи посредством оценки её сжимаемости позволяет на макроскопическом уровне поставить предел массам нейтронных звезд, что важно для понимания эволюции звезд и астрофизики в целом.

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

Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке СВМ (Compressed Barionic Matter) направлена на исследования фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи. На коллайдерах RHIC и LHC фазовая диаграмма КХД изучается при очень высоких температурах и очень низкой барионной плотности. Для больших значений барионной плотности и меньших температур ожидается фазовый адронной и партонной или кварковой материей переход первого рода между заканчивающийся критической точкой, а также киральный фазовый переход. Экспериментальное открытие этих процессов было бы важным прорывом в нашем понимании свойств ядерной материи. Область высокой плотности на фазовой диаграмме будет экспериментально исследована в ядро-ядерных столкновениях с энергиями пучка 2-45 ГэВ/нуклон на создаваемой установке СВМ сильноточного ускорительного комплекса ФАИР. На первом этапе комплекса ФАИР ядро-ядерные столкновения будут изучаться с использованием пучков ускорителя SIS100 с энергиями до 11 ГэВ/нуклон для столкновений AuAu. На втором этапе создания комплекса ФАИР (ускоритель SIS300) энергия пучка будет увеличена до 35 ГэВ/нуклон для ядер золота.

Как показывают расчеты, основанные на транспортных моделях, уже при энергиях SIS100 в центральных столкновениях тяжелых ионов будут достигаться плотность ядерной материи вплоть до 7 ро и исследование уравнения состояния ядерной материи (EoS) при таких больших плотностях, близких к плотности нейтронных звезд, имеет приложения к вопросам астрофизики.

Для определения таких глобальных характеристик событий как центральность и угол плоскости реакции, получаемых в ядро-ядерных столкновениях на установке CBM, ИЯИ РАН разрабатывает передний адронный калориметр фрагментов, PSD – Projectle Spectator Detector. Этот калориметр необходим для изучения большого набора наблюдаемых в зависимости от центральности столкновения, которая используется для определения плотности энергии, достигаемой в этих реакциях, а также для исследования пособытийных флуктуаций и явления коллективных потоков идентифицированных адронов и редких пробников, включая J/Ψ.

Исследование редких распадов элементарных частиц является важной задачей как для расширения наших знаний о природе и свойствах элементарных частиц и их взаимодействий, так и для поиска новых физических явлений. Исследованиям редких распадов К-мезонов посвящены эксперименты ОКА в Протвино, Россия, и NA62, ЦЕРН, Швейцария, в которых активное участие принимают сотрудники ИЯИ РАН.

Исследование редких распадов элементарных частиц является важной задачей как для расширения наших знаний о природе и свойствах элементарных частиц и их взаимодействий, так и для поиска новых физических явлений.

В рамках исследования нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах каонов проводится анализ данных эксперимента Е949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску тяжёлых стерильных нейтрино с массами 140-300 МэВ. Результатом этого анализа может быть либо открытие тяжелого стерильного нейтрино, либо новое ограничение на параметры смешивания этой гипотетической частицы с активными нейтрино.

Для будущего эксперимента по прецизионному измерению вероятности распада положительного каона K<sup>+</sup> -->  $\pi^+\nu\nu$  (ORKA, Фермилаб, США) проводится разработка триггерных детекторов и фотонных детекторов на основе пластиковых сцинтилляторов.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведена работа по набору и анализу данных. За 2010-2013 гг. набрана статистика, соответствующая 6.6×10<sup>20</sup> POT – протонов на мишени (всего по плану ожидается около 8×10<sup>21</sup> POT). Анализ данных проводится как по изучению избытка электронных нейтринных событий, так и по дефициту мюонных

нейтрино в дальнем детекторе. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования СР-нарушения в лептонном секторе.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой продолжается разработка прототипа ближнего нейтринного детектора, работающего в сильном магнитном поле и состоящего из 9000 сцинтилляционных сегментов на основе экструдированных пластиков, спектросмещающих волокон и лавинных фотодиодов.

Эксперименты, осуществляемые в подземных лабораториях Гран Сассо и Артёмовске, органично дополняют фундаментальные исследования элементарных частиц и их взаимодействий, проводимые на ускорителях. Поиск редких явлений в природе является единственным способом достичь, пусть даже косвенным образом, энергий, где начинают проявляться теория объединения сил и квантовые аспекты гравитации. Такие энергии нельзя получить на ускорителях. Подземные лаборатории обеспечивают очень низкий радиоактивный фон, необходимый для поиска этих редких ядерных и субъядерных явлений.

Космические лучи – галактические и внегалактические частицы - постоянно проникают в атмосферу Земли. Взаимодействие этих частиц с атмосферой приводит к возникновению ливней вторичных частиц, что является значительной помехой для экспериментальных установок, предназначенных для изучения чрезвычайно редких явлений и детектирования нейтрино или частиц темной материи.

Роль нейтрино в астрофизических исследованиях является весьма важной. Рождаясь в ядерных реакциях в глубине звезд, эти частицы легко выходят на поверхность, давая ценную информацию о процессах, скрытых от наблюдателя огромными толщами звездного вещества. Получение этой информации и ее правильная интерпретация – задача экспериментаторов, занимающихся нейтринной астрофизикой.

На Галлий-германиевом нейтринном телескопе (ГГНТ) в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН выполняется программа исследования нейтринного излучения от термоядерных реакций, протекающих в Солнце. Эти измерения обеспечивают постоянный мониторинг низкоэнергетической части потока нейтрино. Галлий-германиевый нейтринный телескоп входит в мировую сеть подземных телескопов по исследованию потоков нейтрино от Солнца. В настоящее время из всех действующих солнечных нейтринных экспериментов только измерения на ГГНТ с порогом регистрации нейтрино 0.233 МэВ обеспечивают получение уникальной информации о потоке нейтрино с низкими энергиями.

Проект «Калибровочный эксперимент с искусственным источником нейтрино на основе радионуклида <sup>51</sup>Cr на двухзонной галлиевой мишени» направлен на использование

уникальных возможностей Галлий-германиевого нейтринного телескопа ЛЛЯ исследования осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния. В центр Ga жидкометаллической мишени телескопа массой 50 тонн, разделенной на две независимые зоны, внутреннюю 8 т, и внешнюю 42 т, обеспечивающими равные средние длины пробега нейтрино, помещается источник электронных нейтрино <sup>51</sup>Cr активностью 3 МКи и измеряются скорости захвата нейтрино одновременно в каждой зоне. В случае статистически обеспеченного различия между величинами скорости захвата нейтрино в зонах, либо статистически обеспеченного отличия между средней скоростью захвата в обеих зонах и ожидаемой величиной, будет получено прямое указание на нестандартные свойства нейтрино. Полученные отношения измеренных в зонах скоростей к ожидаемым позволяют определить области разрешенных параметров осцилляций нейтрино. Простота интерпретации результатов обеспечивается тем, что искусственный источник производит монохроматический поток нейтрино, и нет систематических неопределенностей, связанных с неточным знанием спектра нейтрино. В комбинации с данными реакторных экспериментов полученные результаты могут быть использованы для получения ограничения на область СРТ нарушения в секторе электронных нейтрино.

Ключом к решению задач, предусмотренных планом работ по Байкальскому нейтринному проекту, и одной из главных целей ежегодных экспедиций на оз.Байкал является обеспечение стабильной работы Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (БГНТ) в режиме постоянного круглогодичного набора данных и проведение испытаний новых узлов и элементов проектируемого детектора кубокилометрового масштаба НТ1000. Одним из существенных этапов этой работы стало проведение зимней экспедиции 2012 года, в течение которой удалось выполнить при работе с ледового покрова озера весьма внушительный объем работ по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной регистрирующей и управляющей аппаратуры комплекса БГНТ.

В настоящее время во всем мире обсуждаются проекты создания больших сцинтилляционных детекторов для исследования слабых нейтринных потоков природного происхождения. Известно, что потоки нейтрино природного происхождения несут информацию как об их источниках, недоступных прямому наблюдению, так и о свойствах самого нейтрино.

Научно – исследовательская работа по подтеме «Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной и космологические следствия их рождения» имеют целью теоретическое исследование тех сценариев космологического расширения ранней Вселенной, которые предсказывают рождение достаточно больших концентраций первичных чёрных дыр

(ПЧД). На характеристики таких космологических сценариев можно получить существенные ограничения, на основе астрофизических и космологических данных по поискам ПЧД, что и является главной целью исследования. Вторая подтема «Фотоядерные взаимодействия лептонов при сверхвысоких энергиях» связана с физикой космических лучей: мюоны очень высоких энергий, рождающиеся при прохождении космических лучей через атмосферу, тратят часть энергии на такие взаимодействия (не электромагнитные), которые не описываются методами теории возмущений квантовой хромодинамики (КХД). В работах по этой подтеме показывается, что такие взаимодействия можно описывать в рамках двухкомпонентной схемы (модель доминантности векторных мезонов плюс КХД).

Для создания современных нейтринных телескопов гигантских размеров еще в 80-х годах в ИЯИ РАН впервые были предложены альтернативные методы детектирования нейтрино, а именно радиоволновой и радиоастрономический методы с использованием антарктического льда и Луны как нейтринных мишеней. Проект создания радиоволнового нейтринного телескопа РАМАНД в Антарктиде, разработка метода глубоководного акустического детектирования нейтрино в Средиземном море, также как и разработка нового класса лавинных фотодиодов - микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД), предложенных в ИЯИ РАН (З.Я. Садыгов и др.), успешно выполнялись до 1991 г. в рамках программы М.А. Маркова «Советский ДЮМАНД». В те годы ИЯИ РАН опережал зарубежных научных конкурентов на 5-10 лет. Сейчас продолжается разработка новых (альтернативных) методов регистрации космических нейтрино, и разработка детекторов элементарных частиц с использованием новейших лавинных фотодиодов.

За последние годы изучение электромагнитных взаимодействий ядер в ведущих научных центрах США, Японии, Германии и других стран характеризовалось существенным расширением тематики исследований и применением новых методов. Это включало в себя прецизионное измерение амплитуд фоторождения мезонов на свободных и связанных нуклонах, изучение спиновых структурных функций и формфакторов нуклонов, исследование коллективных возбуждений ядер (гигантских резонансов), фото – и электроделения ядер. Эксперименты выполнялись на пучках реальных и виртуальных фотонов, релятивистских ионов и фемтосекундных лазеров с большой импульсной мощностью. На этой основе развивались прикладные исследования с использованием фотоядерных методов для создания систем безопасности, детектирования взрывчатых веществ и делящихся материалов, медицинской диагностики и др. В настоящем отчете приведены результаты исследований, выполненных в лаборатории фотоядерных реакции ИЯИ РАН в рамках указанной тематики.

### Основные результаты

# 1 Моделирование физических процессов для детектора «Компактный мюонный соленоид».

1.1 Поиск тяжёлых нейтрино в эксперименте CMS.

### 1.1.1 Лево-правосимметричная 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 CM. Среди нескольких расширений CM, которые могут быть исследованы на CMS, ЛПСМ определенно является одной из наиболее привлекательных. Действительно, эта модель включает CM 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 тяжёлых калибровочных бозона, WR± и Z', а также три правых тяжёлых майорановских нейтрино, NI. 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 тяжёлых 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. В противоположность этому, в ЛПСМ четность первоначально сохраняется на уровне лагранжиана и нарушается спонтанно, вместе с калибровочной симметрией. В течение долгого времени полагалось, что ЛПСМ не является экспериментально интересной, т.к. массы новых калибровочных бозонов WR 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 тяжёлые нейтрино, могущие быть партнерами легких нейтрино, являются составной частью моделей, во–вторых, локальная B-L-симметрия, не позволяющая тяжёлым нейтрино иметь массы порядка планковских, также является

калибровочной симметрией моделей. Это позволяет надеяться, что WR, Z' и N могут рождаться уже при энергиях БАК.

В т.н. минимальной SU(2)L SU(2)R U(1) ЛПСМ обычные левые калибровочные бозоны, их правые партнеры WR и калибровочный бозон группы U(1) смешиваются, образуя физические заряженные W± и W'±, нейтральные Z и Z' калибровочные бозоны и Взаимодействия этих бозонов описываются константами gR, gL и фотон. 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 KL–KS, 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  $M(W') > 786 \Gamma B$  в предположении, что массы N лежат в кэвной области, и M(W') >650 ГэВ в предположении, что массы M(N) < M(W')/2. Эти ограничения являются более сильными в обобщенных ЛПСМ.

Среди нескольких возможных реакций генерации WR и N в pp-столкновениях наибольший интерес представляют реакции p+p  $\rightarrow 2l\pm + X$  через процесс слияния WR (a), а также две реакции p+p  $\rightarrow$  WR + X  $\rightarrow$  Nl + l± + X (б) и p+p  $\rightarrow 2$ Nl + X (в) с последующим распадом тяжёлого нейтрино на заряженные лептоны и струи. Реакция типа (a), 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 тяжёлого нейтрино через Z'-бозон (слева) и W<sub>R</sub>-бозон (справа).

Сечения этих реакций зависят от следующих параметров ЛПСМ: значений констант связи gR, величин масс MW и MN, значений СКМ-матрицы смешивания для правого сектора, углов смешивания WR-WL и Z-Z', и значений масс тяжёлых нейтрино Nl. В дальнейшем используются общепринятые предположения относительно этих параметров: значения констант связи gR и gL равны, значения СКМ-матрицы смешивания для левого и правого секторов идентичны друг другу, углы смешивания WR-WL и Z-Z' равны. В рамках этих предположений Z' приблизительно в 1,7 раза тяжёлее, чем WR и, следовательно, процессы, идущие через обмен Z', имеют меньшее сечение. Поэтому в дальнейшем основное внимание уделено изучению процесса  $p+p \rightarrow WR + X \rightarrow Nl+l\pm + X$ , идущего через прямое рождение WR. Для простоты предполагается, что только нейтрино Ne, связанное с электронным ароматом, может рождаться при энергиях БАК, тогда как другие нейтрино являются более тяжёлыми и не доступны на БАК.

Как показано на рисунке 1, правое майорановское нейтрино распадается главным образом на заряженный лептон и на виртуальный бозон WR, 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 Ne $\rightarrow$  eWR $\rightarrow$  e+2jets, конечное состояние, очевидно, представляет собой комбинацию двух пар e1e2 и j1j2. В случае, когда массы Nl вырождены, в конечном состоянии появляются также мюоны и тау–лептоны. Кроме того, сечение реакции p+p  $\rightarrow$  WR + X  $\rightarrow$  Ne+e± + X отличается от невырожденного случая на фактор порядка 20% ввиду небольшого отличия в парциальной ширине распада WR. Таким образом, пренебрегая этим небольшим различием сечений, можно рассматривать в конечном итоге для процесса p+p  $\rightarrow$  WR + X  $\rightarrow$  Ne+e± +X только две независимые переменные, а именно, массы MW и MN.

### 1.1.2 Моделирование сигнальных и фоновых событий

Моделирование сигнальных событий и вычисление сечений было выполнено с помощью пакета РҮТНІА 6.2, в котором использовались функции распределения партонов программы CTEQ5L. Доля положительно заряженных бозонов, рожденных в ppстолкновениях, зависит от его массы и изменяется от 70% при MW  $\approx$  1 ТэВ до 95% при MW  $\approx$  10 ТэВ. Таким образом, при больших массах рождаются преимущественно WR+. Полное сечение процесса p+p  $\rightarrow$  WR + X  $\rightarrow$  Ne+e± + X более чем на порядок превосходит сечение реакции p+p  $\rightarrow$  Z' + X  $\rightarrow$  2Ne+ X, делая его, таким образом, наиболее предпочтительным для поиска тяжёлых нейтрино.

Моделирование сигнальных событий от распадов WR и Ne 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 тригтеру L1, т.е. наличие в событии одного или двух электронов. Эффективность отбора событий по тригтеру L1, соответствующих регистрации в электромагнитном калориметре одновременно двух электронов с поперечной энергией Et > 20 ГэВ, была близка к 100%. При этом эффективность регистрации этих событий по тригтеру 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 Et > 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 (j1j2), 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 e1e2j1j2 (µ1µ2j1j2) находится в определенном энергетическом диапазоне.

При реконструкции инвариантной массы MNcand использовалась комбинация со вторым по энергии лептоном e2j1j2(µ2j1j2).

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 Lt = 30 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 РҮТНІА 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 MW = 1,2 TэB и MN = 0,5 TэB. 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 ZH и WH 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+jets+... Так как сечение этого процесса примерно на пять порядков превосходит сечение сигнального процесса при MW = 1,2 ТэВ и MN = 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 ZW. Например, требование Mee > 200 ГэВ существенно подавляет этот фоновый процесс.

Процесс рождения ZW, сечение которого по порядку величины совпадает с сечением сигнального процесса при значениях масс MW = 1,2 ТэВ и MN = 0,5 ТэВ, тоже является фоновым. Ввиду того, что лептонные пары от сигнальных событий имеют существенно большие значения инвариантной массы, требование Mee > 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 e1e2j1j2 в этом же событии была больше, чем 1 ТэВ, уровень фона под пиком существенно уменьшается. Распределение масс для WR-событий в присутствии фона показывает, что пик WR 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(e1e2j1j2) > 1 ТэВ. Для области масс MW < 1,5 ТэВ следует отбирать события, удовлетворяющие условию M(e1e2j1j2) > 0,5 ТэВ.

### 1.1.3 Результаты очередного этапа эксперимента

В результате предварительного анализа данных, полученных коллаборацией CMS в течение 2013 г. и соответствующих полной светимости БАК 19,7 фб-1, были получены ограничения на массу WR около 3000 ГэВ, при ограничении на массу тяжёлого нейтрино 800 ГэВ. Для установки пределов был применен как одномерный анализ, так и двумерный, позволивший улучшить ограничения на массы (рисунок 2).



Рисунок 2 - Пределы на массы нейтрино для разных типов анализа.

Новый нижний предел на массу правого W-бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, более чем в 4 раза. Диапазон исключаемых масс WR получен для каждого из лептонных каналов по отдельности (т.е. для электронного и мюонного) и может быть расширен вплоть до 3,5 ТэВ в предположении, что массы соответствующих тяжёлых нейтрино вырождены. Полученные результаты находятся в стадии подготовки к докладам в соответствующих группах анализа данных CMS или к публикациям в печати.

### 1.2 Адронный калориметр HCAL

### 1.2.1 Изучение шумов адронного калориметра HCAL

Одной из основных задач, связанных с участием ЛМФП 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. В течение 2013 г. сотрудниками ЛМФП также выполнялись работы по тематике группы, изучающей шумы (фоновые события) адронного калориметра (HCAL Noise WG). Данная группа входит в состав группы HCAL DPG, изучающей характеристики работы всего адронного калориметра.

В процессе работы изучалась возможность описания энерговыделения в одиночном акте срабатывания HCAL (hit energy – хит-энерговыделение) с помощью одного временного интервала (time slice, TS) от зарядо-цифрового преобразователя по сравнению со стандартной схемой использования двух временных интервалов. Зарядово-цифровой преобразователь адронного калориметра раскладывает заряд в десяти последовательных временных интервалах длительностью 25 нс каждый. При этом в баррельной и торцевой частях адронного калориметра окно триггера совпадает с временными интервалами TS4 и TS5, и энерговыделение в одиночном акте срабатывания (хит-энерговыделение) описывается суммой зарядов в TS4 и TS5 с соответствующими калибровочными коэффициентами и поправочными множителями, связанными с формой наведенного заряда в этих интервалах. Схема с использованием одного временного интервала важна для подавления влияния наложения сигналов от срабатываний калориметра вне данного временного интервала (до или после) в случае использования пучков от работы ускорителя в режиме высокой загрузки, когда временные ворота триггера могут быть уменьшены до 25 нс (одного интервала TS).

Хит-энерговыделение описывалось с помощью заряда в TS4, помноженного на соответствующий калибровочный коэффициент и поправочный множитель, связанный с формой заряда. Описание хит-энерговыделения выполнено с помощью полиномов в трех интервалах значений энергии, как показано на рисунке 3. Разрешение по энергии, определенной с помощью одного временного интервала, по отношению к стандартно определенной энергии с помощью двух временных интервалов приведено на рисунке 4 (слева - интервал 0 < E < 100 ГэВ,  $\sigma \sim 0.8\%$ ; в середине - 100 < E < 200 ГэВ,  $\sigma \sim 1.8\%$ ; справа - E > 200 ГэВ,  $\sigma \sim 2.3\%$ ).



Рисунок 3 - Хит-энерговыделение как функция энерговыделения в TS4.



Рисунок 4 - Сравнение разрешения по энергии, определенной с помощью одного и двух временных интервалов.

Характеристики восстановленной по одному временному интервалу энергии изучались в условиях высокой загрузки (pile-up – наложение событий) детектора. Высокая загрузка имитировалась путем сложения экспериментально полученных зарядов из набора временных интервалов от нескольких срабатываний детектора с разными временными сдвигами, кратными одному временному интервалу, т.е. фактически имитировалось событие, образованное наложением сдвинутых по времени других аналогичных событий. Энергия в исследуемом временном интервале затем корректировалась с учетом

возможной примеси заряда от предыдущих временных интервалов и с использованием полученной заранее формы наведенного заряда на разные временные интервалы. Вследствие того, что заряд в последовательных интервалах спадает достаточно быстро, высокую загрузку в TS4 необходимо учитывать только от двух предыдущих временных интервалов - от TS2 и TS3. Для описания поведения заряда в последовательных временных интервалах определялась форма заряда в TS5, TS6 и TS7 по отношению к TS4. Соответствующие формы зарядов в виде функций показаны на рисунке 5. Данные распределения описывались с помощью суперпозиции полиномов до 4-й степени включительно на четырех интервалах зависимости от TS4.



Рисунок 5 – Распределения форм зарядов в TS5, TS6 и TS7 по отношению к TS4.

Разрешение по энергии в результате проведенных коррекций после прибавления от одного до четырех фоновых событий представлено на рисунке 6: для одного фонового события (слева, σ ~ 1,64 фКл ~ 0,36 ГэВ), для двух фоновых событий (справа, σ ~ 2,36 фКл ~ 0,52 ГэВ) и для четырех фоновых событий (внизу, σ ~ 3,45 фКл ~ 0,76 ГэВ).



Рисунок 6 – Разрешение по энергии после коррекции на высокую загрузку.

Аналогичный результат после коррекции на высокую загрузку без предварительного подмешивания фона приведен на рисунке 7 ( $\sigma \sim 0,56$  фКл  $\sim 0,12$  ГэВ).



Рисунок 7 - Разрешение по энергии после коррекции на высокую загрузку без предварительного добавления событий.

Приведенные результаты получены из набора событий с триггером HTMHT. В качестве событий высокой загрузки использовались события с триггером MinimumBias. События были реконструированы при помощи стандартной программы реконструкции. Наряду с указанным выше триггером изучались также события с другими триггерами, в частности, MET, MultiJet и SingleMu. Полученные результаты согласуются с приведенными выше результатами изучения событий с триггером HTMHT.

В TS4 могут наблюдаться фоновые срабатывания только в одном временном интервале (TS4), которые могут иметь энергию до 1,5 ТэВ. При этом в соседнем временном интервале (TS5) не будет никакого сигнала и после вычитания пьедестала зарядово-цифрового преобразователя там будет отрицательный заряд (отрицательная энергия). Такие энерговыделения должны быть отбракованы во время реконструкции событий, при этом нужно принимать во внимание возможные флуктуации зарядов в TS4 и TS5. Соответствующая работа по изучению отрицательной энергии в TS5 и установке фильтра отрицательной энергии находится в стадии выполнения.

### 1.2.2 Проверка работоспособности МЛФД в реальных условиях

#### эксперимента.

В рамках работ по модернизации адронного калориметра HCAL установки CMS изучались характеристики МЛФД на основе экспериментальных данных, набранных в 2012-13 гг. Во внешнем блоке HO адронного калориметра HCAL были установлены 132 МЛФД фирм Hamamatsu и Zecotek с целью проверки их работоспособности в реальных условиях эксперимента и дальнейшей замены используемых в настоящее время лавинных фотодиодов на МЛФД. На рисунке 8 показано расположение трех групп МЛФД на внешнем блоке HO калориметра: одна группа производства фирмы Zecotek в количестве 36 штук и две группы производства фирмы Hamamatsu в количестве 36 и 60 штук.



Рисунок 8 - Расположение кремниевых фотоумножителей на внешнем блоке НО.
В качестве экспериментальных данных были взяты данные, соответствующие 25 фб-1 набора при энергии 8 ТэВ, с мюонным и адронным триггерами. Количество обработанных событий составило 300 тыс. Для анализа формы импульса и формы спектров отбирались события, содержавшие ровно один мюон или одну струю в соответствующей группе фотоумножителей.

Форма импульса фотоумножителей для мюонных и адронных событий показана на рисунке 9. Видно, что задний фронт импульса фотоумножителей Hamamatsu уходит ниже пьедестала.

На рисунке 10 показаны спектры мюонного и адронного сигналов для группы фотоумножителей Hamamatsu II. В качестве сигнала бралась сумма зарядов преобразователей в 4-7 временных отсчетах. Для мюонных событий виден пик в районе 100-го канала, соответствующий прохождению одиночного мюона.



Рисунок 9 - Форма импульса для разных групп МЛФД.



Рисунок 10 - Спектры мюонного и адронного сигналов.



Рисунок 11 - Адронные и мюонные спектры для трех групп МЛФД.

Спектры адронных сигналов, как видно из рисунка 11, практически не отличаются для групп фотоумножителей с одинаковым числом детекторов. Различия в форме мюонных спектров определяются сравнительно небольшой статистикой. Дальнейшая обработка данных с увеличением статистического материала позволит уточнить форму спектров.

Анализ работоспособности кремниевых фотоумножителей на основе экспериментальных данных позволяет сделать вывод о стабильности их характеристик и возможности их использования с целью модернизации адронного калориметра. Результаты анализа были доложены на рабочем собрании группы HCAL Installation, Integration & Comissioning.

#### 1b Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb.

Основная цель эксперимента LHCb – исследование CP-нарушения и поиск Новой Физики в редких распадах В-мезонов. ИЯИ РАН сделан большой вклад в создание калориметрической системы установки LHCb. Среди важнейших результатов, полученных LHCb в 2013 году можно выделить следующие:

Измерение угла  $\gamma$  унитарного треугольника матрицы смешивания Кабиббо-Кобаяши-Маскавы в комбинации распадов  $B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}$  (опубликовано в Phys. Lett. В 726 (2013) 151-163). Комбинация  $B^{\pm} \rightarrow DK^{\pm}$  и  $B^{\pm} \rightarrow D\pi^{\pm}$  распадов дает наилучший фит значению  $\gamma=72.6^{\circ}$ , доверительный интервал угла  $\gamma \in [40.2,92.7]^{\circ}$  на 95% CL.

Улучшено измерение вероятности редкого распада  $B^0_s \rightarrow \mu + \mu$ -, наиболее чувствительной к возможным вкладам новой физики. Коллаборацией LHCb доложено (Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 101805) наблюдение избытка событий, соответствующее вероятности распада  $B(B^0s \rightarrow \mu^+\mu^-) = (2.9+1.1-1.0) \times 10^{-9}$  (4.0 стандартных отклонений). Результат соответствует стандартной модели.



Рисунок 12 - Результаты измерения вероятности распада  $B^{_0s} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ , полученные в разных экспериментах.

Измерение форм-фактор независимой переменной в распаде  $B^0 \rightarrow K^*(892)^0 \mu^+ \mu^-$ (arXiv:1308.1707, направлено в *Phys. Rev. Lett.*) показало локальное по инвариантой массе двух мюонов отклонение от предсказания стандартной модели, соответствующее вероятности <0.5% (3.7 $\sigma$ ).



Рисунок 13 - Измеренные значения наблюдаемой Р5' в распаде В<sup>0</sup>→ К\*(892)<sup>0</sup> µ<sup>+</sup> µ<sup>-</sup> в сравнении с предсказаниями Стандартной Модели.

Первое в мире наблюдение СР-нарушения в распадах  $B^{0s}$  мезона  $A_{CP}(B^{0s} \rightarrow K^{-}\pi^{+})=+0.27\pm0.04\pm0.01($ *Phys. Rev. Lett.* 110 (2013) 221601) на уровне >5 $\sigma$ . Также доложен результат измерения  $A_{CP}(B^{0} \rightarrow K^{+}\pi^{-})=-0.080\pm0.007\pm0.003$ , что является наиболее точным результатом в мире.

Наиболее точное измерение времени жизни  $\Lambda_b$  бариона:  $\tau(\Lambda_b)/\tau(B^0) = 0.976\pm0.012\pm0.006$  (*DOI:10.1103/PhysRevLett.111.102003*), подтверждает предсказания Heavy Quark Expansion теории (*H.-Y. Cheng, Phys. Rev. D56, 2783 (1997)*). Предыдущие измерения сделанные на LEP (*arXiv:hep-ph/0304132*) расходились с теорией на 20%, теперь загадка разгадана.

Наблюдение распада  $B^+_c \rightarrow B^0_s \pi^+$  на уровне 5 $\sigma$  (*Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 181801) – первое наблюдение распада спектаторного кварка в В-мезонах.



Рисунок 14 - Диаграмма распада  $B^+_c \rightarrow B^0_s \pi^+$ , идущего через распад с-кварка.

Измерение параметров смешивания  $D^0 - \overline{D^0}$ :  $x'2=(5.5\pm4.9)\times10^{-5}$ ,  $y'=(4.8\pm1.0)\times10^{-3}$ , и RD=(3.568±0.066)×10^{-3}.

Параллельно обработке данных в 2013 г. коллаборация LHCb проводила работы по подготовке модернизации установки для работы на повышенной энергии и светимости после 2018 г. Группой ИЯИ РАН, отвечающей за разработку фотодетекторов для волоконного треккера LHCb, в 2013 г. была продолжена разработка новых фотодиодов совместно с фирмой KETEK (Мюнхен), было проведено изучение характеристик новых гейгеровских диодов фирм HAMAMATSU. Основные результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Измерения параметров новых прототипов гейгеровских многопиксельных фотодиодов SiPM фирмы HAMAMATSU (Japan) показали улучшение основных характеристик: эффективность регистрации фотонов возросла до 50%; оптическая связь между пикселями за счет применения свето-изолирующих канавок уменьшена в 4-5 раз.

2. В 2013 г. запущено производство новой партии SiPM фирмы КЕТЕК. Основные направления разработки: улучшенная эффективность (до 65%), дополнительное уменьшение коэффициента оптической связи в 2-3 раза, увеличение числа каналов до 64 шт/чип. Кроме этого разрабатывается новый корпус со стеклянным окном.

3. Для модернизации мониторной системы электромагнитного калориметра разработан тестовый стенд, промерены и отобраны светодиоды с улучшенными временными и амплитудными характеристиками.

4. Подготовлена замена 250 фотоумножителей адронного калориметра, показавших ухудшение загрузочных характеристик по итогам сеансов 2011-2012 г.г. Для этого был собран измерительный стенд и отобраны фотоумножители на замену с временными и амплитудными характеристиками, удовлетворяющими требованиям эксперимента.

5. Произведены измерения функции отклика 31 модуля электромагнитного калориметра. Модули предназначены для замены центральной части, в наибольшей степени подверженной радиационным повреждениям. Измерения производились на специализированном стенде сканированием радиоактивным у-источником <sup>137</sup>Cs.

Участие ИЯИ РАН в модернизации калориметра LHCb в 2013 г.

После остановки ускорителя LHC в 2012 г. на доработку основными задачами всех экспериментов, использовавших пучки ускорителя, стали обработка накопленной статистики и обновление установок. За три года интенсивной работы появились как вышедшие из строя детали детекторов, так и компоненты, деградировавшие под действием высоких доз радиации. Замена или ремонт многих частей установок были

невозможны из-за их недоступности в условиях нормальной эксплуатации. Доступ к таким частям потребовал бы переборки детектора с затратой очень большого времени и, соответственно, потерей пучкового времени. Другим фактором, препятствующим своевременной замене деталей детекторов, является высокий уровень остаточной радиации некоторых компонентов. Двухгодичный перерыв в работе ускорителя LHC позволит провести все необходимые ремонтно-восстановительные работы и подготовить установки к планируемому переходу на проектную энергию 7 ТэВ.

В эксперименте LHCb Институт ядерных исследований РАН отвечал за разработку и изготовление предливневого детектора калориметрической системы. В нее входят предливневый детектор, электромагнитный калориметр и адронный калориметр. Сотрудники ИЯИ РАН принимали участие в обеспечении нормальной работы калориметрической системы, дежурствах на сеансах и обслуживании детектора.

За время эксплуатации предливневого детектора не было выявлено существенных изменений параметров элементов детектора. Аккумулируемая доза в сцинтилляторах сравнительно низка, а фотоприемники и регистрирующая электроника вынесены за пределы облучаемой зоны. Редкие отказы регистрирующей электроники или модулей питания устранялись во время плановых остановок ускорителя заменой вышедших из строя модулей.

В электромагнитном калориметре, где уровень радиации существенно выше, наблюдается уменьшение световыхода модулей с ростом накопленной дозы в центральной части калориметра. Снижение световыхода компенсируется увеличением напряжения питания на фотоумножителях. Этот эффект ожидаем и соответствует расчетным данным. Во время следующей длинной остановки ускорителя предполагается замена модулей калориметра центральной части. Соответствующее число запасных модулей (30 штук) было изготовлено во время создания калориметра, однако они не были проверены ни на пучке, ни с радиоактивным источником. Для обеспечения своевременной замены модулей было принято решение провести измерения функций отклика модулей с радиоактивным источником.

составляющей Другой электромагнитного важной калориметра является калибровочная система. Она позволяет контролировать уровни сигналов фотоумножителей и обеспечивает стабильность работы каналов калориметра. В процессе работы установки обнаружилось, что из-за радиационных повреждений уровни сигналов от светодиодов системы калибровки падают со временем (Рис.1). Естественным объяснением этого является помутнение пластмассовых волокон, через которые свет от светодиодов передается на модули. В связи с важностью системы калибровки для

нормального функционирования электромагнитного калориметра было принято решение о замене пластмассовых волокон (~6000 т. штук) на кварцевые с одновременной заменой светодиодов (~500 штук).





Адронный калориметр демонстрирует в целом стабильную работу, однако на нем был выявлен эффект разброса параметров фотоумножителей: у примерно 250 из 6000 фотоумножителей амплитуда сигнала начинает расти с ростом среднего тока, у некоторых на 40-50%. Поскольку информация с калориметров используется для выработки тригтера нулевого уровня, этот эффект является крайне нежелательным. Никакой корреляции с положением фотоумножителя на калориметре не выявлено, поэтому было продположено, что этот эффект связан с коструктивными особенностями фотоумножителей. Часть таких фотоумножителей будет заменена, а остальные предполагается переместить на периферию калориметра, где интенсивность вторичных частиц существенно ниже и этот эффект ухода амплитуды будет мал. В дальнейшем предполагается закупка партии из 1000 фотоумножителей и изготовление для них дополнительных делителей Кокрофт-Уолтона.

Измерение функции отклика модулей электромагнитного калориметра.

Модули электромагнитного калориметра изготовлены по технологии "шашлык". Они представляют собой набор чередующихся пластин из сцинтиллятора и свинца с отверстиями. Через отверстия пропущены спектросмещающие волокна, передающие свет со сцинтилляционных пластин на фотоприёмники – фотоумножители (Рис.5). Элементами, наиболее подверженными действию радиации, являются сцинтилляционные пластины и оптические волокна.

На предварительном этапе был произведен визуальный осмотр модулей с подсветкой светодиодом отдельных оптических волокон с одного конца для обнаружения возможных обрывов волокон. Были найдены два модуля, в которых оказалось по одному обломанному волокну. Поскольку у модулей, окружающих ионопровод, внутренние части не используются из-за больших доз радиации, было принято решение не перебирать дефектные модули из-за трудоёмкости, а использовать их во внутренней части калориметра, сориентировав таким образом, чтобы дефектные части оказались вблизи пучка.



Рисунок 16 - Конструкция модуля электромагнитного калориметра.

Процедура измерения функции отклика заключается в сканировании модуля гамма-источником <sup>137</sup>Cs. Критерием качества модуля при этом является совпадение функции отклика исследуемого модуля с функцией эталонного, который прошел тестовые измерения на пучке частиц и обладает среднестатистическими по всем модулям калориметра характеристиками, в пределах 10%.

Для проведения измерений был собран стенд, показанный на Рис.14. В измерениях используются электронные платы интеграторов и управления делителями Кокрофт-

Уолтона, разработанные и изготовленные для калориметра в ИФВЭ, Протвино. Сканирование идёт под управлением персонального компьютера, расположенного за защитой.



Рисунок 17 - 1 – проверяемый модуль; 2 – блок фотоумножителей в сборе с делителями Кокрофт-Уолтона; 3 – устройство однокоординатного перемещения; 4 – свинцовая защита радиоактивнго источника; 5 – блок управления перемещением источника; 6 – плата управления делителями Кокрофт-Уолтона; 7 – плата интеграторов тока.

На Рис.18 показана функция отклика эталонного модуля электромагнитного калориметра (#1) и функции модулей, облученных на тестовом пучке с набором 2 и 4 Мрад. Характерная гребёнка на графике соответствуют прохождению радиоактивного источника мимо сцинтилляционных пластин модуля.



Рисунок 18 - Измерения функции отклика модуля с гамма-источником <sup>137</sup>Сs

Отбор фотоумножителей по загрузочной характеристике.

Из двусот пятидесяти фотоумножителей, показавших сильную зависимость от среднего тока, были отобраны 50, у которых наблюдался повышенный темновой ток, для демонтажа, остальные будут перемещены на периферию детектора, где их влияние на триггер будет минимальным. Фотоумножители припаяны непосредственно на платы делителей и их демонтаж, вообще говоря, не предполагался, так как при перепайке возможна порча печатного монтажа. Замена всех "плохих" фотоумножителей в настоящее время невозможна ввиду отсутствия необходимого количества делителей.

Для проверки фотоумножителей был собран стенд, показанный на Рис.19. Процедура проверки состояла в засветке фотоумножителя световыми импульсами от светодиода при низкой частоте и при среднем токе 10 мкА, что сответствует частоте около 300 кГц при амплитуде импульса около 200 мВ. Измерения проводились в одинаковых условиях - при фиксированном напряжении на фотоумножителе 1100 В, поэтому не было необходимости использовать плату управления делителем Кокрофт-Уолтона, на него подавались фиксированные опорное и управляющие напряжения непосредственно от источников питания.



Рисунок 19 - 1 – делитель Кокрофт-Уолтона, 2 – фотоумножитель

Поскольку наблюдаемый эффект зависимости амплитуды импульса от среднего тока связан с конструктивными особенностями данной конкретной модели фотоумножителя, к которым можно отнести разогрев динодной системы и накопление статического заряда на непроводящих элементах крепления динодной системы, перед измерениями фотоумножитель прогревался при рабочем напряжении в течение 30 минут, а после увеличения тока до 10 мкА – ещё в течение часа.



Рисунок 20 - На гистограмме показано распределение относительных амплитуд фотоумножителей до выдержки при токе 10 мкА (сплошная гистограмма) и после. Видно смещение медианы распределение в сторону меньших амплитуд. На правом рисунке по горизонтальной оси отложены относительные амплитуды до выдержки в течение часа при токе 10 мкА, по вертикальной – после. Исходя из опыта использования фотоумножителей в реальных условиях были забракованы экземпляры, у которых уход амплитуды импульса превышал 5%.

Для оценки динамики изменения амплитуды импульсов фотоумножителя была измерена её зависимость от тока. Результат показан на Рис.21



Рисунок 21 - Зависимость относительной амплитуды импульса фотоумножителя от среднего тока.

При каждом значении тока умножитель выдерживался 15 мин. Последняя точка, обозначенная кружком, получена спустя 9 часов после начала измерения. Наличие гистерезиса с большой временной постоянной говорит о том, что за чувствительность амплитуды от среднего тока отвечают медленно идущие процессы в колбе

фотоумножителя, такие как нагрев динодной системы или рассасывание объёмных зарядов.

Отбор светодиодов для калибровочной системы электромагнитного калориметра.

Наряду с заменой пластиковых оптических волокон на кварцевые модернизация мониторной системы электромагнитного калориметра предполагает и замену светодиодов. Поскольку радиокомпоненты изготавливаются ограниченными партиями, параметры изделий могут варьироваться от партии к партии. При заказе большого количества изделий есть вероятность того, что разброс параметров окажется большим. Для обеспечения лучшей однородности параметров мониторной системы была заказана партия светодиодов из 1000 штук при необходимом количестве 485 штук, с задачей отобрать необходимое количество с возможно меньшим разбросом по амплитуде.

Для отбора светодиодов был собран стенд, включающий осциллограф, генератор, драйвер светодиодов, фотоумножитель с делителем Кокрофт-Уолтона и блоки питания. Светодиоды устанавливались в держатель и на них подавался импульс с генератора фиксированной амплитуды. Для контроля стабильности измерительного тракта регулярно замерялись амплитуды от светодиодов, выбранных в качестве реперных. В случае необходимости подстраивалась амплитуда сигнала на выходе драйвера светодиодов. Амплитуды импульсов замерялись непосредственно на экране осциллографа.

На Рис. 22 показано распределение измеренных амплитуд для всей партии светодиодов.



Рисунок 22 - Распределение амплитуд импульсов светодиодов

Стрелками выделена область отобранных светодиодов. Наличие двух пиков в распределении отражает тот факт, что светодиоды были получены тремя партиями, из которых одна оказалась со светодиодами с меньшей яркостью.

Изучение старения сцинтилляционно-падового годоскопа (SPD) установки LHCb с помощью космических мюонов.

В 2013 году ускоритель LHC был остановлен на модернизацию, поэтому возникла возможность для изучения подсистем установки с помощью космических мюонов. Подобная работа уже проводилась в 2009 г., когда космические мюоны использовались для предварительной калибровки и синхронизации посистем калориметра LHCb. В 2013 г. одним из изменений условий работы с космическими мюонами на установке LHCb оказалось существенное увеличение радиационного фона, возникшее в результате накопления радиационной активации после 3-х лет работы LHC.

Мотивацией для проведения исследований с помощью космических мюонов явились результаты изучения старения SPD, проведенные в течение 2012 г. Применялись взаимодополняющие методы, основанные на изучении эффективности регистрации треков, а также загруженности ячеек. Второй метод свободен от специфики применяемого в триггере отбора событий.



Рисунок 23 - Слева представлены данные по именению эффективности за период апрельоктябрь 2012 г., после усреднения по каждой VFE карте электроники (64 канала). Наблюдаемое падение до 10%; в отдельном VFE эффективность упала на 22%, но усиление соответствующего многоанодного ФЭУ оказалось значительно ниже, чем в других. На рисунке справа показано изменение загруженности каналов SPD детектора за тот же период. Внутренней части детектора соответствуют номера VFE карт в интервале

50-70. Таким образом, сравнение результатов двух методов подтверждает, что наблюдается действительно старение детектора вызванное набором светимости ~1.5/fb.

Средние по зонам детектора данные падения эффективности приведены в следующей таблице.

	<efficiency> April '12</efficiency>	<efficiency> October '12</efficiency>	<drop 2012=""> (1.5fb<sup>-1</sup> interval)</drop>	<drop 2011=""> jun-oct (0.5fb<sup>-1</sup> interval)</drop>
Inner	91.0%	84.8%	- 6.2%	-0.9%
Middle	94.1%	90.7%	- 3.4%	-0.2%
Outer	95.0%	92.0%	-3.0%	-0.6%

Старение детектора более заметно во внутренней области. Причинами старения могут быть: а) падение усиления ФЭУ, может быть скорректированно изменением рабочего напряжения; б) радиационные повреждения элементов детектора, приводящие к потере прозрачности и световыхода ячеек и волокна. Наиболее вероятна первая из указанных причин [1], учитывая соответствие падения эффективности загрузкам ячеек. Для более точной идентификации причин, требуются дополнительные исследования.

Изучение эффективности детектора на космических мюонах позволяет стандарным образом мониторировать состояние детектора в течение длительной (более 1.5 года) остановки ускорителя, и соответственно, измерить эффект возможного восстановления. Также возможно, это избавит от необходимости полной перекалибровки в начале следующего рабочего периода в начале 2015 г. Использование светодиодов мониторной системы не достаточно для определения порогов регистрации из-за большого разброса световых сигналов от светодиодов в отдельных картах электроники. Также удобством для работы на космических мюонах является то, что триггер множественности SPDmult является составляющей частью триггера нулевого уровня, и позволяет системе сбора данных SPD работать в независимом от других подсистем режиме.

SDPMult>	0	1	2	3	4
2009	400	5,2	1,5	0,7	0,39
2013	6600	9,1	2,1	1	0,61

Результат измерения скорости счета (Гц) SPDmult триггера в 2009 и 2013 г.г. приведен в таблице. Увеличение частоты триггера может быть вызвано как наведенной радиоактивностью материалов детектора, так и уменьшением порога регистрации электроники на 20%, произведенным за период времени между двумя измерениями.

Для подавления вклада от наведенной радиоактивности требуется включение в совпадение предливневого детектора PS. Так как два детектора SPD и PS разделены слоем свинцового конвертора 1.5 см толщиной, проникновение треков от радиактивных

распадов из одного детектора в другой практически исключено. Результат от включения в совпадение PS детектора для выбранных VFE карт с номерами 102, 82 и 65 показан в следующей таблице.

VFE	Region	Occupancy no coincidence	Occupancy coincidence	Ratio
102	Outer	1.1 10-6	9.6 10 <sup>-4</sup>	910
82	Middle	2.4 10 <sup>-7</sup>	5.6 10 <sup>-5</sup>	236
65	Inner	7.0 10 <sup>-8</sup>	6.0 10 <sup>-6</sup>	85

Видно, что основной вклад в триггер SPDmult следует от радиактивного шума и эффективно подавляется включением в совпадение PS детектора.



Рисунок 24 - Результат измерения загруженности ячеек SPD детектора на космических мюонах (23 М событий за 1 час) показан на рисунке справа. Слева приведено для сравнения распределение падения эффективности к трекам за апрель-октябрь 2012 г.

Сравнение этих измерений показывает, что измерение загруженности ячеек на космических мюонах

1. дает результат, соответствующий измерениям эффективности к трекам.

 Может быть использовано для мониторирования восстановления усиления ФЭУ в нерабочие периоды ускорителя.

3. Возможно, позволит избежать перекалибровки детектора с продолжительным сканированием порогов электроники в начале 2015 г.

Участие ИЯИ РАН в разработке треккера LHCb на основе сцинтилляционных волокон в 2013 году.

Основная цель модернизации установки LHCb – обеспечение возможности работы на светимости до 2\*10<sup>33</sup>/см<sup>2</sup>/сек, что в 5 раз превышает достигнутый уровень. В этой связи

необходимо проведение модернизации системы идентификации частиц и трековой системы, основным вариантом которой является треккер на основе тонких сцинтилляционных волокон (SciFi), разработка которого была начата в 2011-2012 г.г. ИЯИ РАН совместно с другими российскими институтами и участниками из CERN и других групп принимают участие в разработке этого варианта треккера, в том числе в разработке технологии производства полномасштабных модулей и разработке фотоприемников на основе кремниевых фотоумножителей (SiPM).

В феврале 2013 года был пройден важный этап в развитии проекта SciFi – подтверждена положительная оцена жизнеспособности опции волоконного треккера. Один из важных вопросов, сформулированных реффери к будущему развитию проекта – необходимость поднять эффективность регистрации фотонов PDE фотодетекторами на 10-20%. Хотя по результатам тестов 2012 г. SiPM фирмы КЕТЕК превзошли по этому показателю MPPC приборы фирмы HAMAMATSU, дальнейшее увеличение PDE является необходимым и для них. Кроме PDE ряд других параметров фотоприемников тоже требует улучшения, таких как радиационная стойкость, оптическая связь между ячейками, чувствительность к зеленому свету. Определенные шаги по разработке улучшенных фотодетекторов были заложены при запуске производства в 2013 г. новых партий диодов фирмами КЕТЕК и НАМАМАТSU с учетом требований LHCb.

Разработка новых чипов SiPM (КЕТЕК) для LHCb.

Ниже приведены основные цели и новые направления для производства прототипов SiPM (КЕТЕК) в 2013 г.:

1) Повышение геометрической эффективности SiPM за счет увеличения размеров пикселей до 60 μм × 62.5 μм (GE=69.6%) и 82.5 μм × 62.5 μм (GE=73.5%);

 Увеличение размеров SiPM до необходимых: 64 канала/чип и 108 пикселей/канал для варианта с 6 рядами волокон;

3) Для улучшения чувствительности к зеленому свету и повышения радиационной стойкости планируется попробовать варианты структуры с разной толщиной эпитаксиального слоя и глубиной залегания p-n перехода.

 Уменьшение времени восстановления пикселя за счет большей толщины структуры (меньшей емкости пикселя) и уменьшения гасящего сопротивления R<sub>Q</sub>.
Учитывается также зависимость R<sub>Q</sub>(T).

5) Применение новых материалов для канавок между пикселями в целях улучшения светоизоляции и уменьшения оптической связи.

Основные геометрические и электрические параметры приведены на рисунке и в таблице ниже.





Рисунок 25 - Показаны параметры базового сегмента пластины, включающего в себя 3 чипа по 64 канала в каждом, а также контрольный чип из партии (Ref CERN03) 2012 г. и тестовую структуру. Ширина чипов увеличена до 2.450 мм, верхний чип 'Chip1' имеет ширину чувствительной зоны 1.620 мм для возможности использования с 6 слоями волокон. 'Chip2' и 'Chip3' имеют стандартную ширину чувствительной зоны 1.320 мм, но за счет увеличенной полной ширины позволяют увеличить расстояние от края пикселя до разварочной площадки, что может позволить использовать вариант корпусирования со

Pixel Pitch	Total Pixel Area (µm2)	GE from Anode Area (Layout)	Relative increase of C (τ) compared to MP60x57.5 (Trench)	Estimated PDE [%]	Estimated recovery time for RQ=300k without Epi
60 x 57.5 (CERN 03)	3450	68.4%	1.0	45%	110
60 x 62.5	3750	69.6%	1.1	46%	122
66 x 62.5	4125	70.9%	1.2	47%	136
82.5 x 62.5	5156	73.5%	1.6	48%	177

стеклом, закрывающим только чувствительную зону чипа.

В таблице приведены геометрические параметры пикселей партии 2013 г., а также оценки PDE и времени восстановления пикселей. Видно, что даже при увеличении размеров п икселей в 1.6 раза по сравнению с вариантом CERN03 (2012г) время восстановления остается в допустимых пределах (177 нсек). Разработка нового корпуса для SiPM (КЕТЕК).

В 2013 г. коллаборацией Russia-CERN совместно с фирмой MSE(GE) начата разработка нового корпуса для чипов фирмы КЕТЕК. Основная идея заключается в применении кварцевого стекла толщиной до 100 µм, непосредственно приклеимаевого на чувствительную поверхность фотодетектора. При этом площадки и проволочки для разварки остаются не закрытые стеклом и покрываются специальным компаундом (gloptop), как показано на рисунке ниже.

	Quartz glass lid	
1111111		1 2 2 3 K
Bond wire	Glop top for bond wire protection	
Chip size: 16.2 mm x 2.	4 mm	

Рисунок 26 - Справа приведена схема покрытия чувствительной зоны фотодетектора стеклом. На фотографии слева показаны изготовленные образцы стеклянных полос

#### толщиной 0.1 мм.

В лаборатории ЦЕРНа было изготовлено несколько образцов стеклянных окон толщиной 0.1 мм и размерами 1.4 mm x 16.3 mm, 1.4 mm x 32.8 mm, 1.7 mm x 16.3 mm и 1.7 mm x 32.8 mm для 64- и 128-канальных фотодетекторов. В 2014 г. на фирме MSE по этой технологии планируется изготовить несколько макетных образцов для LHCb, используя чипы КЕТЕК. В дальнейшем эти образцы будут испытаны на механические, температурные и оптические свойства.

Измерение температурных характеристик SiPM (КЕТЕК).

Кроме чувствительности и оптической связи, другой важнейший параметр SiPM для применения в волоконном треккере LHCb – шум фотодетектора после облучения. Известно, что генерация шумов в кремнии падает вместе с температурой, в 2 раза на 10-12 °C. Для удовлетворения требованиям LHCb (шум < 2 МГц/128 каналов) необходимо охлаждать фотоприемники до 40-50°C. Так как точное поведение шумов при охлаждении может зависеть от детальной структуры SiPM, нами были проведены измерения чипов серии CERN03 (2012 г.) с разными структурами после облучения нейтронами дозой  $10^{12}$  н/см<sup>2</sup>, соответствующей примерно 10 годам работы LHCb. Изучалась зависимость шумого тока, шумового счета и усиления от температуры в пределах от -60 до +28 °C. Зависимость тока от напряжения для разных значений температуры показана на рисунке ниже.



Рисунок 27 - Слева на рисунке приведены I-V кривые для стандартной структуры, справа – для новой структуры с толщиной эпитаксиального слоя 0.8 µм.



Рисунок 28 - Слева показана зависимость шумового счета от температуры при перенапряжении V-V<sub>breakdown</sub>=1В. Скорость счета импульсов падает с температурой в 2 раза на 10°С и 12°С для новой и стандартной структуры. Это значит, что толстый эпитаксиальный слой улучшает шумовые характеристики при низких температурах, до 2 раз при T=-40°C. На рисунке справа показана зависимость напряжения пробоя V<sub>breakdown</sub> от температуры. Было измерено, что V<sub>breakdown</sub> падает с температурой на 21 и 34 мВ/°С в

случае стандартной и новой структур.

Была также изучена зависимость гасящего сопротивления  $R_Q$  от температуры. Было обнаружено, что для применяемой технологии сопротивление растет с понижением температуры на 15-20%/20°C, что приводит к увеличению времени восстановления пикселей и должно быть учтено в конечном дизайне SiPM.

Создание системы измерения параметров SiPM в ЦЕРН.

Для успешного проведения разработок элементов волоконного треккера потребуется, в том числе, стандартизованное измерение параметров фотоприемников. Впервую очередь это касается основных характеристик: PDE, шумовой счет, вольтамперные характеристики, усиление и оптическая связь. Первый шаг в направлении создания подобной системы был нами сделан в 2013 г. Система, предназначенная для измерения зависимости PDE от длины волны падающего света, состоит из нескольких компонентов: монохроматора (см. рисунок), и стенда для измерения усиления и оптической связи.



Рисунок 29 - Слева на рисунке приведена фотография монохроматора, справа показана его схема. Принцип работы основан на использовании широковолнового источника света (ксеноновая лампа), системы оптических решеток для выделения нужной волны света, а также калиброванного фотодиода для измерения абсолютного значения светового потока. Для того, чтобы получить величину квантовой эффективности измеряемого прибора (DUT), необходимо знать величину его отклика на единичный фотон. В случае гейгеровского лавинного диода для этого нужно знать величину его усиления, а также оптической связи между пикселями и после-импульсов. Для измерения этих характеристик нами был разработан стенд, основанный на анализе временных и

амплитудных характеристик сигналов с помощью цифрового осциллографа (Picoscope-6403), подключенного к компьютеру.

Результаты измерения новых образцов SiPM от фирм HAMAMATSU и SensL.

Кроме фирмы КЕТЕК, интересные разработки производят также другие фирмы, среди которых очень обещающими выглядят последние образцы от HAMAMATSU и SensL. Для сравнения мы также измерили характеристики SiPM (КЕТЕК). Нами были изучены новые 1 мм2 диоды с размером пикселей 50 µм. Основные результаты можно сформулировать следующим образом:

1) Новые образцы от HAMAMATSU демонстрируют улучшение основных параметров: PDE достигает 40-45% в диапазоне волн 400-550 нм; оптическая связь уменьшена за счет применения канавок и достигает 11% при перенапряжении 5В;

шумовой счет уменьшен до рекордных 80 кГц/мм<sup>2</sup>. Результат очень обнадеживающий для SciFi треккера.

2) Образцы от SensL также демонстрируют улучшение PDE (35%) и уменьшение оптической связи до 10%. Фирма SensL не рассматривается в качестве поставщика для LHCb, но ее разработки представляют академический интерес, указывая путь к дальнейшему развитию технологии.



Рисунок 30 - На рисунке представлены результаты измерений PDE новых фотодиодов НАМАМАТЅU. Справа вверху представлены измеренные значения усиления и оптической связи (XT) для разных значений перенапряжения. Справа внизу на фотографии, сделанной через микроскоп, показана конструкция пикселей с разделительными канавками между ними. Таким образом HAMAMATSU удалось



Рисунок 31 - На рисунке приведено сравнение величины оптической связи в зависимости от перенапряжения для SiPM фирм SensL, KETEK (50D-adv) и HAMAMATSU(MPPC). Новые образцы MPPC демонстрируют наилучшие характеристики.

### 2 Исследования по релятивистской ядерной физике.

# 2.1 Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC (CERN).

2.1.1 Основные результаты исследований.

2.1.1.1 Испытание лазерной оптической системы детектора «ТО».

Испытания лазерной системы проводились с целью выявления причин общей тенденции к падению амплитуд сигналов от лазерной системы в детекторах T0-A и T0-C в течение физических измерений в 2011-2013 гг.

Проведены испытания лазерной системы с применением нового оптического кабеля длиной 30 м, специально проложенного между лазерным модулем и детекторной системой ТО-А установки ALICE (Рис.1). Результат испытаний показал, что значительный разброс амплитуд в индивидуальных 12 шт. ТО-А детекторах не изменился. Проведён демонтаж (июль 2013 г.) 11 детекторов ТО-А системы с установки ALICE с целью испытаний на лабораторном стенде. Детектор №10 был недоступен для демонтажа.

Проведены испытания T0-A детекторов на лабораторном стенде с применением лазера и нового короткого оптического кабеля. Отношение амплитуды сигналов для новых (не использованных ранее) и старых оптических кабелей показаны на рис 2. Были сделаны выводы, что падение трансмиссии света в коротких кабелях является результатом радиационных повреждений коротких оптических кабелей (см. рис.2) в процессе эксплуатации в жёстких радиационных условиях эксперимента ALICE. Короткие оптические кабели подлежат замене.

# 2.1.1.2 Подготовка к перемещению электроники детектора в связи с модернизацией триггерной системы установки

Триггерная система установки ALICE представляет собой многоуровневую систему ( L0,L1,L2,HLT) и предполагает наличие сигнала «wake-up» для детектора переходного излучения (Transition Radiation Detector (TRD)). В настоящее время по результатам обработки данных принято решение отказаться от сигнала «wake-up» и ввести дополнительный уровень триггерных сигналов LM ( L0 минус 1, таблица 1)



Все триггерные сигналы детектора Т0 принято перенести на уровень LM.

Это приводит к необходимости сократить до 425 нс время выработки тригтерных сигналов и передачу их на центральный тригтерный процессор (СТР). Анализ времени выработки тригтерных сигналов детектора показал, что это можно сделать только за счет сокращения кабелей от детектора к стойкам электроники и от детектора к СТР. Проведен анализ состояния электроники детектора, определено новое расположение электороники, подготовлена новая спецификация необходимых кабелей. Разработаны и изготовлены два модуля линий задержек с шагом 25 нс для независимой настройки триггерных сигналов со стороны А и С (ТОА и ТОС).

Таблица 1.

item	description	effect	
			us
T0,V0,CTP with LM	introduce fast trigger level (LM) needs T0&V0 FEE relocation, new CTP L0 hardware	>10% recovery of TRD participation efficiency, & clear bias problems	goin
CTP upgrade	more #class, #cluster	clear many restrictions	

## 2.1.1.2 Калибровка данных LHC10h (столкновениях ядер свинца)

Использование времяпролётной системы позволяет идентифицировать пионы, каоны и протоны при значениях поперечного импульса от 0.5 до 2,5 GeV/c. Т0 является стартовым детектором, формирующим точную временную отметку (сигнал «T0») для времяпролётного детектора (TOF), осуществляющего идентификацию частиц по методу времени пролёта частиц (time-of-flight) от вершины события до TOF. Положение сигнала «T0» на временной оси не должно меняться в зависимости от положения точки столкновения, центральности взаимодействия.

На рис.34 приведено полученное временное разрешение детектора T0 (после калибровки детектора) при проведении физических измерений при столкновениях ядер <sup>208</sup>Pb при энергии в системе центра масс  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV.

. В настоящее время детектор обеспечивает рекордное временное разрешение около 25-30 пикосекунд.



На рис.35 Приведено временное разрешение детектора в зависимости от номера измерения (run).



# 2.1.3 Измерение и мониторирование светимости по триггерным сигналам детектора T0

Точное определение светимости и его мониторинг необходим, поскольку значение светимости входит в расчеты сечений всех физических процессов. Светимость на ALICE измеряется передними детекторами: V0, T0, и ZDC. Во время фазы запуска LHC, для того чтобы оценить качество пучка, V0 и T0 используются для оценки светимости. Во время р-р столкновений в течении 2011 года для этих целей использовался детектор T0. В качестве основного сигнала для оценки светимости использовался триггерный сигнал

C0TVX (сигнал генерируется, если вершина столкновении находится в пределах +-10 см). Во время pb-pb этот сигнал был включен в триггеную систему установки ALICE. Анализ данных показал, что детектор со 100% эффективностью регистрирует центральные и полуцентральные взаимодействия при столкновениях ионов свинца и обеспечивыает стабильность тиггерных сигналов (рис. 36, 37).





## 2.1.4 Модернизация программного обеспечения DCS

Во время зимней 2011-2012 г. технической остановки ускорителя была проведена модернизация системы DCS (detector control system), AMORE (on-line data quality). Для каждого детектора, участвующего в эксперименте ALICE, создана уникальная система управления, удовлетворяющая специфики конкретного детектора и требованиям центральных систем управления установкой ALICE.

Для работы детектора T0 отлажена и запущена в работу система управления учитывающая новые возможности установки. Она обеспечивает безопасную работу подсистем детектора, контролирует параметры оборудования детектора, следит за состоянием подсистем детектора.

# 2.1.5. Проведение испытаний детектора ТО-А

Тестирование оптической системы показало, что падение трансмиссии света в коротких кабелях является результатом радиационных повреждений коротких оптических кабелей в процессе эксплуатации в жёстких радиационных условиях эксперимента ALICE. В октябре были изготовлены короткие оптические кабели длиной 1,5 метра и произведена замена старых оптических кабелей на новые на детекторе T0-A. Старение оптических кабелей оказало влияние на калибровку детектора и выбор режима работы ФЭУ. Для подготовки к калибровке лазерной системы в ноябре были проведены испытания всех элементов детектора T0-A с использованием космических лучей.

Таблица 2. Результаты подборки высокого напряжения для детектора T0-A с использованием космических лучей и сравнение этих значений со значениями, используемых во время физических измерений 2011-2013 гг.

No.	$HV_{old}$	Amp.[mV	HV	Amp.[mV]	Recommended	Delta	Comments
	from	]	October-	Oct2006	$HV_{new}$	$\mathrm{HV}_{\mathrm{new}}$	
	22.02.201	1 mip on	2006	1 mip	for 1 mip amplitude	and	
	1	short 1.5		pions	130-150 mV on	$\mathrm{HV}_{\mathrm{old}}$	
	(physical	m cable	pion test	(recalcula	short 1.5 m cable		
	Runs,	(cosmic	in PS T10	ted for	(100-120 mV on		
	without	test, Nov-		short	long cables)		
	magnetic	2013)		cable)			
	field)						
1	-1300	85			-1450	150	
2	-1510	75	-1360	60-70	-1650	140	
3	-1700	60-70					
		110	-1815	200	-1870	170	
4(B	-1330	90-100	-1220	70	-1380	50	
5	-1720	125	-1520	70	-1750	30	
6	-1485	90	-1380	70	-1580-1600	≈ 100	
7	-1770	80			-1910	140	
8	-1620	90-100			-1730	110	

9	-1620	110		-1650	30	
10	-1670			-1750	80	
11	-1420	75		-1550	130	High noise at discrim. thresh. 30- 50 mV
12	-1690	70		-1860	170	

Эти измерения указывают также на возможность старения самих ФЭУ.

Для уточнения причины изменения напряжения и калибровки лазерной системы планируется проведения тестовых испытаний на пучке SPS в Церне в 2014 году.

# 2.1.6 Перемещение электроники детектора в связи с модернизацией триггерной системы установки ALICE.

В четвертом квартале были выполнены работы по модернизации схемы быстрой электроники и перенос всех подсистем систем детектора на новое место, проведена прокладка оптических и сигнальных кабелей (таблица 3.)

Detecto r	Cable description	Cable Name	Cable reference (CERN store)	Label
TO	ELMB CANbus	VG18CAN - 1.0	04.21.60.491.2	ELMB T0
T0	VME CANbus	EIA/TIA RS485 - vert	04.21.60.010.0	VME Can T0
T0	CAEN ctrl (50 wire)	MA50	04.21.51.550.4	Caen Ctrl T0
T0	CAEN 48V	2x4 mm2	04.08.82.040.2	Caen 48V T0-1
T0	CAEN 48V	2x4 mm2	04.08.82.040.2	Caen 48V T0-2
T0	Signal to T0-A	CB50 -brun	04.61.11.225.6	Sig T0A-01 Sig T0A-25
T0	Signal to T0-C	CB50 -brun	04.61.11.225.6	Sig T0C-01 Sig T0C-25
T0	L0 inputs to CTP		LVDS cable	T0 L0-1 T0 L0-6

Габлица 3. Новые оптические и сигнальные кабели детектора 🕻	Γ0.
---	-----

T0	Busy-Fast electronic		LVDS cable	T0-BUSY
T0	Link LCS to C34	CB50 -brun	04.61.11.225.6	T0-C34-1
TO	Link LCS to C34	CB50 -brun	04.61.11.225.6	T0-C34-2

Обработка экспериментальных данных при столкновениях p-Pb и Pb-p при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  TeV.

В 2013 году проводился специальный физический сеанс при столкновениях р-Рb и Pb-р при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  TeV. T0 детектор участвовал (100%) во всех измерительных сеансах эксперимента . Временное разрешение детектора T0 при столкновениях ядер <sup>208</sup>Pb при энергии в системе центра масс  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV составляет около 22 пикосекунд, а при столкновениях p-Pb при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  TeV около 35 пикосекунд (рис. 34, 38). Стартовое время для время-пролетного детектора (TOF) определяется с помощью детектора T0. TOF обеспечивает идентификацию пионов и каонов до значений поперечного импульса 2.5 GeV/*c* для столкновения протонов с ядрами (рис. 33)







Рисунок 39 - Идентификация электронов, пионов, каонов и протонов по время пролетному методу при столкновениях p-Pb при энергии в системе центра масс  $\Box s = 5.02$  TeV

## Модернизация детектора ТО

Достигнутые параметры детектора T0 и высокая надежность работы детектора позволили на его основе подготовить в 2013 году предложение (TDR) по новому детектору **FIT (Fast Interaction Trigger, T0-plus ),** который заменит детектор T0 (из-за его недостаточного аксептанса) и необходимости создания нового мюонного трекера. FIT детектор состоит из двух колец детекторов на основе микроканальных фотоумножителей (MCP-PMT) (рис. 40, 41).





Определение плоскости реакции с использованием детектора FIT.

Моделирование плоскости реакции было выполнено с использование GeVSim (embedded in Aliroot) для псевдобыстроты  $|\eta| < 7$ , и поперечного импульса от from 0 to 9 GeV. Геометрия детектора, которая использовалась для моделирования, показана на рис. 42. Модули расположены на расстоянии  $R_{min} = 6 \ cm$  and  $R_{max} = 18 \ cm$  и  $z = -71 \ cm$ 



Для определения второй гармоники плоскости реакции использовалась формула 1.

 $\Psi_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\sum_i w_i \sin(2\phi_i)}{\sum_i w_i \cos(2\phi_i)} \right)$  формула 1, де  $\phi_i$  это угол центральной части элемента детектора *i* и  $w_i$  - количество МІР на элемент детектора. Разрешение плоскости реакции определяется как  $R = \langle \cos(2(\Psi_2 - \Psi_R)) \rangle$ 

Где  $\Psi_R$  вычисляется по данным с детектора FIT.

Результаты расчетов разрешения плоскости реакции для различных значений центральности взаимодействий приведены на рисунке 43.



Статистическая ошибка для определения плоскости реакции составляет 2%.

# 2.2 Исследование коллективных эффектов и ненуклонных степеней свободы

# в ядрах и переходных процессов в сжатой ядерной материи при

### столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами

Для подготовки Технического проекта калориметра под малым углом по отношению к направлению пучка для сооружаемой установки MPD на коллайдере NICA было запланировано проведение исследования работы различных прототипов калориметра на выведенном пучке Нуклотрона ОИЯИ.

Для испытаний на выведенном пучке были изготовлены 4-е модуля адронного калориметра группой Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (рис.32). Измерения были проведены в ноябре 2013 г. Результаты обрабатываются.

Раннее на пучке T10 в ЦЕРНе были проведены исследования отклика модуля адронного калориметра с выполненным условием компенсации адронной и электромагнитной компоненты (рис.43) производства ИЯИ РАН при энергиях протонов и пионов 1 – 5 ГэВ. Результаты приведены на рис. 44 и опубликованы.

Модуль перевезен в Дубну и будет испытан на пучке Нуклотрона в 2014 г. Ведется разработка физической программы измерений на коллайдере NICA.



Рисунок 44 - Модули адронного калориметра на канале 4В (установка СФЕРА) подготовленные для проведения измерений на выведенном пучке. Модули установлены на устройство позиционироваия УП 1000. Перед модулями установлены триггерные сцинтилляционные счетчики

# 2.3 Исследование рождения адронов в адрон-адронных столкновениях на CERN SPS (эксперимент NA61)

1. Участие ИЯИ РАН в 2013 г. в работах по калибровке и анализу данных, полученных в эксперименте NA61(SHINE) на SPS, разработке и поддержке вспомогательного программного обеспечения эксперимента NA61 и в модернизации экспериментальной установки.

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

Точное положение критической точки на фазовой плоскости неизвестно. Поэтому в эксперименте NA61(SHINE) ее положение на фазовой плоскости предлагается искать, сканируя эту плоскость посредством реакций с различными ядрами при энергиях налетающих ядер в диапазоне от 13 до 158 ГэВ на нуклон (рис.45, слева).



Рисунок 45 - Слева - область сканирования на фазовой плоскости в программе исследований эксперимента NA61(SHINE). Справа - ожидаемое увеличение флуктуаций множественности, среднего поперечного импульса и т.д. для системы с вымораживанием вблизи критической точки.

Первые экспериментальные свидетельства наступления начала деконфайнмента были получены в эксперименте NA49 на ускорителе SPS в ЦЕРНе [2, 3]. Они основаны на наблюдаемых свойствах адронов, измеренных в центральных Pb + Pb столкновениях. Было показано, что наблюдается сильная энергетическая зависимость для измеренных

выходов и отношений выходов заряженных частиц при импульсе налетающего пучка 30А ГэВ / с (или области энергии √E<sub>NN</sub> ≈7,6 ГэВ), которые авторы называют как рог, излом и Дэйл [3], и что эти зависимости согласуются с предсказаниями для начала деконфайнмента.

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

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

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

Полученные ранее данные при максимальных энергиях AGS и SPS показывают, что отношение выходов пионов и странных адронов практически не зависит от размера сталкивающихся ядер для центральных столкновений ядер с  $A \ge 30 - 40$ . Это означает, что для средних величин простые термодинамические модели могут быть использованы уже для центральных Ar + Ca столкновений в области энергией SPS. C другой стороны, длительность стадии расширения с чисто адронными степенями свободы возрастает с увеличением массы сталкивающихся ядер. Следовательно, температуры теплового и химического вымораживания уменьшаются с увеличением размера сталкивающихся ядер (рис. 18 в [1]). Материя вымерзает достаточно далеко от границы фазового перехода.

Чтобы свести к минимуму роль адронного перерассеяния столкновения малых ядер с размером порядка ядра аргона кажутся оптимальными для исследования свойств перехода между кварк-глюонной плазмой и адронным газом. Поэтому особое значение в этой программе имеют измерения для центральных Ar + Ca столкновений при значениях импульса пучка 13, 20, 30, 40, 80 и 158 ГэВ/с на нуклон, которые должны быть реализованы уже в 2015 г. Исследования реакций Xe + La и Pb + Pb запланированы на 2015 - 2016 г.г. и 2017 – 2018 г.г. соответственно, как показано на диаграмме (рис.46.)



Рисунок 46 - Диаграмма сбора данных для ионной программы эксперимента NA61/SHINE. Зелеными квадратами показаны уже законченные измерения, красными - программа измерений на период 2015-2016 г.г. Серыми квадратами показаны планируемые измерения Pb + Pb, но которые еще не утверждены программным комитетом ЦЕРНа. [6].

Как уже отмечалось, резкое увеличение величины флуктуаций является отличительной чертой физических явлений вблизи критических областей (рис.45, справа). Поэтому основное внимание к физической программе исследований эксперимента NA61 уделяется именно измерению величины флуктуаций данной наблюдаемой от события к событию.

В связи с этим, необходимо более детально остановиться на источниках экспериментально наблюдаемых флуктуаций в столкновениях тяжелых ионов. В самом общем описании существуют два источника флуктуаций. Первый – это интересующее нас физическое явление, а именно, критическая область фазовой диаграммы, вызывающая усиление флуктуаций. Второй источник – это варьируемая геометрия столкновения тяжелых ионов, иначе говоря, переменное количество взаимодействующих нуклонов. Понятно, что второй источник флуктуаций, определяющий геометрию столкновений, никак не связан с существованием критических флуктуаций. Поэтому эти два источника флуктуаций должны быть учтены надлежащим образом. Как правило, в экспериментах с фиксированной мишенью геометрия столкновения тяжелых ионов измеряется передним
адронным калориметром, детектирующим энергию непровзаимодействовавших нуклонов налетающего ядра, из которой определяется число непровзаимодействовавших нуклонов налетающего ядра. Разница между атомным числом налетающего ядра и измеренным количеством непровзаимодействовавших нуклонов И дает искомое число взаимодействующих нуклонов. Таким образом, использование переднего адронного калориметра с энергетическим разрешением, необходимым для определения числа нуклонов с точностью до одного нуклона, является необходимым условием изучения критических флуктуаций. Для эксперимента NA61 такой калориметр разработан и изготовлен в Институте ядерных исследований РАН. Основная активность группы ИЯИ РАН в данном проекте связана с созданием адронного калориметра высокого разрешения, его использованием в физических экспериментах NA61 и участием в анализе экспериментальных данных с получением конечных физических результатов.



Рисунок 47 - Фазовая диаграмма

Первые измерения ядро-ядерных взаимодействий проведены в 2011 г. для реакции <sup>7</sup>Ве + <sup>9</sup>Ве при энергиях 40, 80, 158 ГэВ на нуклон с использованием фрагментированого пучка ядер <sup>7</sup>Ве. В конце 2012 г. – начале 2013 г. проведен сеанс измерений выходов заряженных частиц в реакции <sup>7</sup>Ве + <sup>9</sup>Ве на фрагментированном пучке ядер <sup>7</sup>Ве при энергиях налетающих ядер бериллия 13, 20 и 30 АГэВ. Таким образом, в течение 2011-2013 г.г. была полностью завершена программа измерений на ядрах бериллия при энергиях 13, 20, 30, 40, 75 и 150 АГэВ. Для измерения центральности взаимодействий в

этих экспериментах впервые использовался передний адронный калориметр, разработанный и изготовленный в ИЯИ РАН. Группы ИЯИ РАН и СПбГУ участвовали в сеансе, группа ИЯИ РАН поддерживала работоспособность калориметра и проводила online обработку экспериментальных данных во время сеанса.

### Краткое описание экспериментальной установки NA61/SHINE

Эксперимент NA61(SHINE) является единственным оставшимся экспериментом на SPS в ЦЕРНе, который имееет утвержденную в ЦЕРНе программу по исследованиям ядро-ядерных взаимодействий при энергиях 10-158 ГэВ на нуклон. Экспериментальная установка NA61 - это существенно модернизированная установка предыдущего эксперимента NA49 [3]. Схема установки показана на рис.48. На вставке показано расположение пучковых счетчиков.



Рисунок 48 - Схема экспериментальной установки NA61 (вид сверху).

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

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

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

- две время-проекционные камеры (VTPC-1 и VTPC-2), размещенные в зазорах дипольных магнитов. Каждая из этих камер имеет длину 250 см, ширину 280 см и высоту

98 см. Эти камеры используются для реконструкции вершины взаимодействия, определения импульса частиц и идентификации типа частиц путем измерения ионизационных потерь в газе детекторов;

 две большие время-проекционные камеры (МТРС) с размерами 390 см х 390 см х 110 см, которые располагаются за дипольными магнитами вне области магнитного поля симметрично относительно оси пучка. Они используются дополнительно для измерения импульсов частиц высоких энергий и идентификации типа частиц по их ионизационным потерям;

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

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

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

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

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

- группой ИЯИ РАН ИЯИ РАН разработан и изготовлен новый передний адронный калориметр фрагментов (PSD – Projectile Spectator Detector), который используется для измерения энергии спектаторов, имеет высокое энергитеческое разрешение и способен

пособытийно определять с точностью до одного нуклона число непровзаимодействовавших нуклонов в центральном ядро-ядерном взаимодействии. Это является очень важным фактором в исследовании флуктуаций различных наблюдаемых. Концепция калориметра, электроники и система анализа данных полностью является разработкой ИЯИ РАН [9, 10].

Калориметр состоит из 44 модулей (рис.49, слева), которые перекрывают поперечную область 120 х 120 см<sup>2</sup>, необходимую при регистрации спектаторов налетающих ядер в эксперименте NA61. Центральная часть калориметра состоит из 16 маленьких модулей с поперечным размером 10 х 10 см<sup>2</sup>. Внешняя часть калориметра состоит из 28 больших модулей с поперечными размерами 20 х 20 см<sup>2</sup>. Такая поперечная сегментация калориметра уменьшает также загрузку отдельных центральных модулей (так как в данном калориметре отсутствует отверстие для пропускания налетающего пучка). Каждый модуль собран из 60 слоев свинца с расположенными между ними сцинтилляционными пластинами.. Толщина каждой свинцовой пластины составляет 16 мм, а толщина сцинтиллятора 4 мм. При таком соотношении толщин свинца и сцинтиллятора (4:1) выполняется условие так называемой компенсации. При этом, как известно [6,7], константный член (b) в выражении для энергетического разрешения  $a/\sqrt{E}(\Gamma эB) + b$  должен быть равен нулю, а величина стохастического члена (а) должна составлять порядка 55%.

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



Рисунок 49 - Схема переднего вида (слева) и фотография полностью собранного и установленного на пучке переднего адронного калориметра эксперимента NA61 (справа).

Передний адронный калориметр (PSD) (рис 49, справа) располагается на расстоянии от 17 до 23 метров от мишени, в зависимости от энергии налетающих ядер. Калориметр и электроника полностью изготовлены в ИЯИ РАН. Эта работа велась в течение последних 6 лет и в уже в конце 2011 г. впервые часть калориметра использовалась в физическом сеансе на фрагментированном пучке легких ядер в эксперименте NA61. В 2012 г. калориметр был полностью собран и использован в декабрьском (2012 г.) и январьском (2013 г.) сеансах измерений.

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

Модернизированная эспериментальная установка NA61 имеет следующие основные характеристики:

- достаточно большой аксептанс ~50%;

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

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

- высокую эффективность детектирования заряженных частиц: > 95%;

- скорость считывания событий ~80 событий/sec.

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

Калибровка калориметра фрагментов для Be<sup>7</sup>+Be<sup>9</sup> экспериментальных данных сеансов 2011-2013 г.г.

Одной из задач группы ИЯИ РАН является обеспечение высокого качества экспериментальных данных, получаемых с помощью переднего адронного калориметра (PSD), созданного в ИЯИ РАН. С этой целью в 2011-2012 г.г. были проведены несколько энергетических калибровок детектора на протонных и мюонных пучках. Полученные калибровочные коэффициенты обеспечили корректное восстановление энергий протонного пучка и требуемое энергетическое разрешение калориметра. Однако, проведение сеансов по набору экспериментальных данных на пучках ионов бериллия коэффициентов температурный дрейф усиления фотодетекторов выявило И. соответственно, временное изменение калибровочных коэффициентов в отдельных модулях адронного калориметра. Как известно, используемые микропиксельные фотодиоды имеют сильную температурную зависимость коэффициента усиления от температуры, порядка 4 %/0С. Для компенсации этого эффекта в калориметре использовалась система температурной стабилизации, разработанная совместно с инженерной службой ЦЕРН и использующая сжатый воздух. К сожалению, сильные колебания температуры окружающей среды В зимний период проведения экспериментальных сеансов не были полностью компенсированы данной системой температурной стабилизации. В результате, был обнаружен температурный дрейф величины энерговыделения в калориметре от первичных частиц ионного пучка (рис. 50).



Рисунок 50 - Слева – зависимость выделенной энергии в калориметре от времени измерений. Справа – зависимость температуры в одном из модулей калориметра для того же промежутка времени измерений.

С целью компенсации данного дрейфа в 2013 г. была разработана и успешно применена новая схема энергетической калибровки адронного калориметра с использованием набранных экспериментальных данных. Данная схема обеспечила

непрерывный контроль качества экспериментальных данных в любом временном интервале сеанса.

Суть новой повременной калибровки калориметра с помощью экспериментальных данных заключается в следующем. На первом этапе отбираются центральные события с одним или двумя не провзаимодействовавшими нуклонами (спектаторами) из налетающего иона пучка, которые имеют энергию пучка. Данные нуклоны выделяют в калориметре соответствующюю энергию с образованием одного или двух энергетических кластеров в калориметре. В случае если эти два кластера пространственно разделяются, энергия каждого кластера приравнивается энергиинуклона налетающего пучка.





Рисунок 51 - Слева – Геометрическая структура модулей калориметра со схематическим расположением двух пространственно разделенных энергетических кластеров, образованных двумя спектаторами. Модули, соответствующие центрам кластеров обозначены кружками. Справа - формулы расчета коэффициента калибровки центрального модуля кластера в итерационной процедуре.

Поскольку основной вклад в энерговыделение всего кластера дает центральный модуль кластера, изменяется только его коэффициент калибровки, чтобы обеспечить равенство энергий кластера и нуклона пучка. Данная процедура выполняется для всех модулей калориметра в случае, если они являются центрами кластера. В результате на первом этапе получается новый набор калибровочных коэффициентов всех модулей. Отметим, что данный набор изначально не является самосогласованным, поскольку энергия кластера считается с новым калибровочным коэффициентом только для центрального модуля и со старыми калибровочными коэффициентами для периферийных модулей. Поэтому, процедура выравнивания энергии кластера и энергии налетающего нуклона повторяется в виде итераций до тех пор, пока калибровочные коэффициенты модулей в предыдущей и последующей итерации не совпадут с заранее установленной точностью.

В результате процедуры калибровки энергии кластеров смещаются к энергии налетащих нуклонов пучка. Это хорошо видно на рис.52, где приведены спектры энергий кластеров для различных групп модулей до и после калибровки. Как видно, наблюдается не только сдвижка центра спектра к истинной энергии пучка, но и уменьшение ширины спектра, что отражает улучшение энергетического разрешения калориметра.



Рисунок 52 - Энерговыделение одного или двух кластеров калориметра до (синяя линия) и после (красная линия) процедуры калибровки. Слева – спектр энерговыделений для всех модулей. В центре – спектр энерговыделений для маленьких модулей. Справа – спектр энерговыделений для больших модулей. Использовались данные с энергией пучка бериллия 75 ГэВ.

Описанная процедура энергетической калибровки адронного калориметра с помощью физических экспериментальных данных была применена ко всем наборам данных с различной энергией пучка бериллия. В частности, прокалиброваны данные 2011-2013 г.г. с энергией бериллиевого пучка 13, 20, 30, 40, 75 и 150 ГэВ. Проверка качества проведенной калибровки осуществлялась с помощью событий, набранных с триггером Т1 или, иначе, пучковым триггером, выделяющим ионы <sup>7</sup>Ве пучка, не взаимодействующие в мишени. Эти ионы должны выделять в адронном калориметре энергию, равную семи используемых В процедуре калибровки. Таким энергиям кластеров, образом, соответствующее энерговыделение от событий с триггером Т1 является индикатором качества выполненной калибровки. Для иллюстрации на рис. 53 приведены результаты проверки качества калибровки данных на пучке ионов <sup>7</sup>Ве с энергией 75 ГэВ. Здесь приведено энерговыделение от ионов пучка <sup>7</sup>Ве в калориметре в зависимости от номера набора. На верхнем рисунке – энерговыделение до проведения калибровки. В центре – энерговыделение после выполнения по-модульной калибровки. Нижний рисунов энерговыделение, скорректированное на истинную энергию пучка.



Рисунок 53 - Энерговыделение от ионов пучка <sup>7</sup>Ве в калориметре в зависимости от номера набора. Вверху – энерговыделение до проведения калибровки. В центре – энерговыделение после выполнения по-модульной калибровки. Внизу – энерговыделение, скорректированное на истинную энергию пучка.

Процедура калибровки была выполнена не только для экспериментальных данных, набранных на пучке ионов бериллия <sup>7</sup>Ве, но и для тестовых данных с пучком свинца с энергией 75 ГэВ, полученных в конце 2011 г. Эти данные с пучком свинца и свинцовой мишенью были набраны с целью проверки работы всей экспериментальной установки NA61 в максимально жестких условиях на пучке ионов с максимально возможным массовым числом. В данном сеансе усиление фотодетекторов четырех центральных модулей было уменьшено примерно в 2 раза, чтобы обеспечить требуемый динамический диапазон регистрируемых энергий. В результате возникла необходимость коррекции коэффициентов калибровки этих центральных модулей. Использование событий с пучковым триггером, выделяющим ионы свинца, не взаимодействующие в мишени, позволяет выполнить необходимую калибровку, поскольку эти ионы должны выделять в адронном калориметре энергию, равную 208 энергиям одиночных нуклонов налетающего ядра.

На рис.54 приведен энергетический спектр ионов свинца, зарегистрированных в калориметре. Видно, что в результате калибровки, максимум спектра соответствует полной энергии пучка ионов.



Рисунок 54 - Энергетический спектр ионов свинца, зарегистрированных в калориметре. Спектр получен после выполнения калибровки четырех центральных модулей калориметра.

Для адронного калориметра в целом, как и для выполненной энергетической калибровки, в частности, важно получение хорошего энергетического разрешения для реальных экспериментальных данных, набранных в ходе сеансов с пучком <sup>7</sup>Ве ионов. Отметим, что, поскольку ионный пучок является фрагментированным, он включает в себя разные типы ионов, начиная от дейтерия и кончая ионами азота и кислорода. Такой сложный состав ионного пучка дает эффективный инструмент определения зависимости энергетического разрешения калориметра от энергии налетающего иона. Действительно, даже при фиксированной энергии пучка полная энергия иона определяется его массовым числом и может быть эффективно определена с учетом магнитной оптики канала. Данная особенность фрагментированного пучка позволила определить энергетическое разрешение калориметра для всего набора экспериментальных данных, набранных в 2011-2013 г.г. С этой целью использовался Z-детектор, определяющий заряд иона в пучке. Каждый пик в амплитудном спектре Z-детектора соответствует фиксированному иону пучка с определенной энергией. Выделяя конкретный пик в распределении Z-детектора, можно построить соответствующий энергетический спектр в адронном калориметре. Для примера, на рис. 55 приведены распределения ампитуды сигналов с Z-детектора И калориметра для энергии пучка 40 ГэВ. Здесь разные цвета спектров соответствуют различным ионам в пучке. Такие же распределения были построены для энергий пучка 75 и 150 ГэВ. Ширина пика в энергетическом спектре калориметра, соответствующего фиксированному иону пучка с данной энергией, отражает энергетическое разрешение при этом энерговыделении.



Рисунок 55 - Слева – энергетический спектр в Z-детекторе, соответствующий составу ионов в фрагментированном пучке. Подписи возле пиков в спектре соответствуют иону пучка. Справа – спектр энерговыделений в адронном калориметре, соответствующий иону пучка, выбранному в Z-детекторе. Разные цвета спектров соответствуют различным ионам в пучке. Энергия пучка равна 40 ГэВ.

Зависимость ширины пика (стандартное отклонение) в энергетическом спектре калориметра от энергии различных ионов при разной энергии пучка приведена на рис.56.





калориметра от энергии различных ионов с разной энергией пучка.

Здесь же приведена зависимость энергетического разрешения калориметра от энергии иона в пучке. Как видно, разрешение калориметра составляет около 66%/sqrt(E), что немного хуже разрешения, полученного в калибровочном сеансе на пучке протонов. Существует несколько объяснений данному расхождению. Одной и возможных причин является различное распространение адронного ливня в калориметре, вызванного отдельным свободным нуклоном и составным ядром. Отметим также, что первичная калибровка калориметра перед сеансом с высокими энергиями ионного пучка была выполнена на протонном пучке, дающем худшую точность энергетической калибровки в сравнении с калибровкой на мюонном пучке. Действительно, при калибровке на протонном пучке необходимо учесть поперечный размер адронного ливня и использовать для калибровки одновременно, по крайней мере, 9 модулей. С учетом продольной сегментации модуля на 10 секций, для поиска калибровочных коэффициентов необходимо одновременно определять 90 калибровочных коэффициентов для 9 модулей. Наличие большого числа свободных параметров при решении системы линейных уравнений в процессе калибровки может привести к определенным ошибкам в определении калибровочных коэффициентов. Данная неопределенность отсутствует при проведении калибровки на мюонном пучке, где каждая секция модуля калибруется независимо в соответствии с энерговыделением мюона. Поэтому в сеансах с низкой энергией ионного пучка и в дальнейшем будет использована мюонная калибровка.

Отметим, что полученное энергетическое разрешение адронного калориметра полностью удовлетворяет требованиям эксперимента NA61 и позволяет разделить вклад в энерговыделение от отдельных нуклонов налетающего ядра.

Z-детектор. Z детектор предназначен для определения заряда ядер в пучке и отделения только необходимого типа частиц в пучке. При анализе отбирались в пучке только ядра  $Be^7$ , т.е. отбрасывались все ядра с  $Z^2 < 12$  и  $Z^2 > 21$  (см. рис.57). Также использовался дополнительный критерий отбора событий, разработанный Emil Aleksander Kaptur [23].



Рисунок 57 - Отбор по Z детектору для 150 AGeV/с [23]. Слева - распределение налетающих на мишень частиц до отбора по звряду,справа-после отбора.

Z-детектор измеряет заряд ядра дважды, после отбираются те события, в которых результаты измерений лежат в коридоре ошибок.

### Beam Position Detectors (BPD)

Положение частиц в пучке определяется с помощью трех детекторов BPD. Отбираются события, для которых удается аппроксимировать траекторию пучка прямой с помощью сигналов с BPD, а также, для которых сигнал в BPD-3 достаточно сконцентрирован

### Физические результаты

Результаты применения всех критериев отбора событий и треков представлены на рисунках 58.



Рисунок 58 - Слева - итоговый отбор событий для анализа дальних корреляций в Be+Be столкновениях при 150 A GeV/c. Справа - итоговый отбор треков для анализа дальних корреляций для той же реакции.

На рис. 59 (слева) представлено распределение треков по электрическому заряду. Из этого распределения видно, что преобладают положительно заряженные частицы, что соответствует закону сохранения заряда для столкновения ядер Be<sup>7</sup>+Be<sup>9</sup>.



Рисунок 59 - Слева - распределение треков по заряду, справа - распределение событий по множественности, (столкновения ядер Be<sup>7</sup>+Be<sup>9</sup> при 150 AGeV/c).

На рис. 59 (справа) представлено распределение событий по множественности заряженных частиц в данном событии без отбора событий по центральности.

На рис. 60 представлены распределения треков по трем компонентам импульса x, y, z, a также по поперечному импульсу. На рис. 60 представлено распределение треков по азимутальному углу φ. В этом распределении наблюдаются асимметрия относительно частиц, летящих вверх и вниз, что показывает, смещение пучок относительно центра

установки. Это наблюдение подтверждается рис.61, где представлено двумерное распределение треков по поперечному импульсу и азимутальному углу.



Рисунок 60 - Распределения треков по pX (вверу слева), по pY (вверху справа), по pZ (инизу слева) и по pT (внизу справа) для столкновений ядер Be<sup>7</sup>+Be<sup>9</sup> при 150 AGeV/с.



Рисунок 61 - Слева - распределение треков по азимутальному углу φ,. Справа - двумерное распределение треков по поперечному импульсу и азимутальному углу. Распределения показаны для столкновения ядер Be<sup>7</sup>+Be<sup>9</sup> при 150 AGeV/c.

На рис. 62 (слева) представлены двумерные распределения треков по dE/dx \* ln(p) для положительно и отрицательно заряженных частиц. Эти распределения используются для определения типа частиц, тем самым их масс, знания которых позволят пересчитать распределение по псевдобыстроте в распределение по быстроте. На рис. 62 представлено распределение треков по псевдобыстроте  $\eta$ , а также выбор двух интервалов, в которых изучались дальние корреляции. Данный выбор мотивирован необходимостью выполнения следующих условий:

- Минимизированы потери на неэффективность в заднем окне
- Максимальная множественность в переднем окне
- Достаточно большой промежуток между окнами, чтобы исключить эффекты влияния продуктов распада резонансов.



Рисунок 62 - Слева - распределение треков по dE/dx \* ln(p) для положительно заряженных частиц и слева – для отрицательно заряженных частиц. Распределения показаны для столкновения ядер Be<sup>7</sup>+Be<sup>9</sup> при 150 AGeV/c.



Рисунок 63 - Распределение треков по псевдобыстроте η и выбор окон для столкновения ядер Be<sup>7</sup>+Be<sup>9</sup> при 150 AGeV/c.

На рис. 64 представлены двумерные распределений для наблюдаемых (n-n, p<sub>T</sub>-n, p<sub>T</sub>p<sub>T</sub>) в двух окнах. На рис. 65 представлены соответствующие корреляционные функции.



Рисунок 64 - Слева вверху - распределение треков по n<sub>B</sub> \* n<sub>F</sub>, справа вверху - распределение треков по p<sub>tB</sub> \* n<sub>F</sub>, слева внизу - распределение треков по p<sub>tB</sub> \* p<sub>tF</sub>. для столкновения ядер Be<sup>7</sup>+Be<sup>9</sup> при 150 AGeV/c.



Рисунок 65 - Слева вверху - корреляционная функция для n-n корреляций, ссправа вверху - корреляционная функция для pt-n корреляций, Снизу слева корреляционная функция для pt-pt корреляций. Корреляции показаны для столкновения ядер Be<sup>7</sup>+Be<sup>9</sup> при 150 AGeV/c.

В результате анализа были получены следующие значимые результаты, приведенные в таблице 4.

	b (линейная регрессия, выделенный диапазон)	b (линейная регрессия, весь диапазон)	b (коррелятор)
n-n	0.393+/-0.002	0.389+/-0.002	0.383+/-0.007
pT-n	-0.0027+/-0.003	-0.0017+/-0.0001	-0.0018+/-0.005
pT-pT	0.006+/-0.002	0.006+/-0.002	0.007+/-0.007

Таблица. 4. Коэффициенты *b* n-n. pT-n и pT-pT корреляций для 3-х способов вычисления b (см. текст)

Линейная регрессия корреляционных функций может быть проведена различными способами (таб. 4). На рис 56 аппроксимация проведена на линейных участках корреляционных функций. Коэффициенты корреляций, полученные данным способом, приведены в таблице во втором столбце. Результаты аппроксимации по всему диапазону значений приведены в третьем столбце. Видно, что данные значения в пределах погрешности совпадают с коэффициентами корреляции, высчитанными по формуле (четвертый столбец).

Разработка и поддержка группой ИЯИ РАН вспомогательного программного обеспечения для нужд эксперимента NA61

В эксперименте NA61/SHINE группа ИЯИ РАН участвует и отвечает за разработку и поддержку системы непосредственного и апостериорного (online/offline) контроля (1), которая доступна по гиперссылке: <u>https://na61.web.cern.ch/na61/xc/index.html?O=qa</u>, за систему учета данных по изучаемым реакциям и условиям протекания эксперимента (book-keeping) (2) - <u>https://na61.web.cern.ch/na61/xc/bq.html</u>, а также и за разработку и поддержку официального сайта коллаборации (3) - <u>https://na61.web.cern.ch/na61/xc/index.html</u>.

Система (1) используется для постоянного обновления графической информации о работе отдельных детекторов в виде контрольных распределений, встроенных в вебстраницу и доступных в сети Интернет. Система позволяет также запросить и получить информацию о работоспособности детектора в любое время набора статистики в

прошлом, что удобно для сравнения с текущим состоянием дел. Сервис работает постоянно.

Система (2) используется для учета информации об измеренных в эксперименте реакциях, относящихся к ним именах файлов данных. Хранимая информация характеризует условия протекания эксперимента и на этой основе позволяет делать выборки по запросу пользователя. Дополнительно имеются таблицы о группах обработки экспериментальных данных, связывающие эксперименты и результаты их обработки. Впоследствии она была частично интегрирована с системой (1) для удобства пользователя.

Официальный сайт коллаборации базируется на собственной разработке. Одна из идей, заложенных в реализации официального веб-сервиса коллаборации [3] – это возможность вывода различной сервисной информации о протекании эксперимента во время набора данных, что удобно для сотрудничающих групп экспериментаторов из 20 исследовательских центров.

Перед сеансом 2013 года была проведена миграция систем (1,2) с устаревшего одноядерного сервера на вновь установленный четырехядерный сервер, была повышена переносимость системы с сервера на сервер. В системе непосредственного (1) и апостериорного контроля данных были обновлены алгоритмы для построения графиков, относящихся к детектору PSD. Продолжена разработка системы непосредственного и апостериорного учета данных по следующим направлениям: 1) адаптация к машинным запросам со стороны внешних потребителей информации для нужд системы распределенных вычислений на виртуальных компьютерных операционных системах, 2) создание прототипа для получения записей информации от системы распределенных вычислений на виртуальных операционных системах. Кроме того, по требованию пользователей были улучшены отдельные алгоритмы выдачи данных потребителям, например система учета суммарной статистики, накопленной в эксперименте, которая способна выдавать информацию как в графическом виде, так и в виде макроса для пакета ROOT.

Модернизация электроники контроля параметров модулей адронного калориметра

Эксклюзивной задачей группы ИЯИ РАН в эксперименте NA61 является обеспечение надежной работы и получение экспериментальных данных с переднего адронного калориметра, предназначенного для контроля и отбора событий с требуемым прицельным параметром. Отметим, что сам калориметр, его электронная часть и система передачи данных были разработаны и изготовлены в ИЯИ РАН в предыдущие 2006-2012

годы. Проверка детектора на протонных пучках и первые физические сеансы на ионном пучке <sup>7</sup>Ве подтвердили требуемые параметры калориметра и качество экспериментальных данных. Тем не менее, в процессе длительной работы детектора были выявлены некоторые недостатки в схеме съема сигнала с калориметра, требующие ее определенной модернизации. Поскольку калориметр включен в общий тригтер эксперимента, одним из главных требований является обеспечение быстрого сигнала с калориметра для триггерной системы. Данное требование было вызвано необходимостью временного согласования триггерного сигнала калориметра с сигналами от быстрых пучковых детекторов. Кроме того, планируемое изменение общей схемы передачи данных в эксперименте NA61 от всех элементов установки налагает обязательства адаптировать электронную часть переднего калориметра, а именно, обеспечить быстрый усиленный сигнал со всех секций модулей калориметра.

Проведение сеансов по набору экспериментальных данных на пучках ионов выявило температурный дрейф коэффициентов усиления фотодетекторов, т.к. используемые микропиксельные фотодиоды имеют сильную температурную зависимость коэффициента усиления от температуры, порядка 4%/<sup>0</sup>С. Данный эффект налагает особые требования на контроль температуры вблизи фотодетекторов, контроль напряжения питания фотодетекторов и постоянный мониторинг коэффициентов усиления фотодиодов. Таким образом, из вышесказанного можно поставить следующие задачи модернизации электронной части адронного калориметра:

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

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

3. Контроль температуры фотодетекторов;

4. Контроль напряжений питания фотодиодов;

5. Постоянный мониторинг коэффициентов усиления фотодиодов.

Такая комплексная задача потребовала разработки дополнительных электронных схем и двух печатных плат с необходимой функциональностью. Новые электронные платы (рис. 35) включают в себя стабилизированный источник световых импульсов на основе светодиода, быстрые усилители аналоговых сигналов, индивидуальные стабилизированные источники питания фотодиодов. температурные датчики, установленные на общей алюминиевой плате, обеспечивающей температурный контакт со всеми фотодиодами в модуле. Остановимся на кратком описании работы электронной схемы. Одним из основных элементов схемы является генератор стабилизированных

световых импульсов, предназначенных для постоянного мониторинга коэффициентов усиления фотодиодов.



Рисунок 66 - Фото новых печатных плат с модернизированной электронной частью съема сигнала. Слева – фото задней части платы с разъемами для выходных аналоговых сигналов и системы управления. Справа – фото передней части платы с установленными на общей алюминиевой подложке фотодиодами.

Блок схема устройства представлена на рис. 67. Небольшая часть энергии световой вспышки, излучаемой светодиодом, контролируется встроенным фотодиодом. Энергия импульса выходного тока фотодиода преобразуется в цифровой код зарядочувствительным преобразователем QDC. Основная часть энергии световой вспышки через оптический разъем и оптическое волокно выводится на контролируемый фотодетектор. Работой светодиода управляют генератор коротких импульсов (Pulse generator) и драйвер светодиода (LED driver). Устройство работает с фиксированной длительностью световой вспышки.



Рисунок 67 - Блок схема генератор стабилизированных световых импульсов

Напряжение питания фотодиодов обеспечивается индивидуальными блоками питания, установленными на печатной плате вблизи фотодетекторов и управляемыми отдельно стоящим контроллером. Напряжение питания находится в диапазоне 63-68 В. Обеспечивается точность установки напряжения 10 мВ. Ток через диод составляет порядка 30 мкА.

Сигналы с фотодиодов усиливаются двумя быстрыми усилителями с коэффициентами усиления 20 и 120. Такая двухэтапная схема усиления обеспечивает необходимый динамический диапазон, требуемый для регистрации энергий как одиночных нуклонов, так и энергий ядер пучка в целом. Полоса пропускания усилителей равна 20 МГц. Сигнал после усилителей разветвляется на две части: 90% сигнала поступает в амплитудно-цифровой преобразователь, а 10% - в аналоговый сумматор, формирующий быстрый сигнал для триггера.

Управление элементами электронной схемы (напряжение питания фотодиодов, амплитуда световой вспышки, показания термодатчика) осуществляется общим системным модулем (контроллером) (рис. 68). Системный модуль имеет максимальное количество обслуживаемых элементов, равное 127, встроенный источник питания ~220V(+15%/-20%), W 70, линии связи с компьютером USB-2.0; RS-232, Ethernet. Внутренняя последовательная линия связи осуществляется по протоколу RS485 (100 кбит/с).



Рисунок 68 - Фото системного модуля, управляющего элементами электронной схемы калориметра.

Разработка системы стабилизации температуры в модулях калориметра группой ИЯИ РАН.

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

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

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

Схема такой системы охлаждения показана на рис. 69.



Рисунок 69 - Схема охлаждения фотодиодов Пельтье элементом в модуле калориметра. Пояснения к рисунку даны в тексте.

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

На рис. 70 (слева) показана фотография прототипа электроники с системой охлаждения и стабилизации температуры фотодиодов в модуле. На этом же рисунке, справа, показано расположение 10 фотодиодов на алюминиевой пластине. Между двумя рядами фотодиодов видна медная пластина, приклеенная к алюминиевой пластине, которая является теплопроводом от Пельтье элемента.



Рисунок 70 - Фотография прототипа электроники с системой охлаждения и стабилизации температуры фотодиодов в модуле.

На рис. 71 (вверху, слева) показана фотография модуля с установленной электроникой и системой охлаждения и термостабилизации. Объем модуля с установленной электроникой отделяется термоизолирующей пластиной от внешнего объема. Поэтому на этой фотографии виден только радиатор охлаждения, который принудительно обдувается сжатым воздухом.

На этом же рисунке приведены результаты тестовых измерений долговременной стабильности системы. На правом верхнем рисунке показано изменение температуры в помещении, где установлен калориметр в течение суток. Температура была в диапазоне 19.5 - 20.5 градусов Цельсия. Через контроллер была задана установка температуры алюминиевой пластины с фотодиодами и ее стабилизация на уровне 17 градусов Цельсия. На нижнем левом рисунке верхняя кривая показывает температуру радиатора в течение суток, а нижняя красная линия показывает температуру, измеряемую датчиком, установленным на алюминиевой пластине с фотодиодами. На правом нижнем рисунке показано распределение этой температуры в течение суток. Видно, что среднее значение температуры составляет 17 градусов, а ширина распределения меньше 0.1 градусов.

Таким образом, данная система обеспечивает долговременную температурую стабильность фотодиодов, необходимую для измерения энергии спектаторов с хорошей точностью.



Рисунок 71 - Расположение злектроники с системой термостабилизации в модуле (слева вверху) и результаты тестовых измерений. Пояснения к этому рисунку приведены в тексте.

Разработана механическая конструкция и документация для установки этой системы в больших и маленьких модулях калориметра. Начато изготовление этой системы для всех 44 модулей калориметра. Планируется завершение изготовления, установка в модулях калориметра и тестирование до середины 2014г.

# 2.4. Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерноядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)

В 2013 году группой ИЯИ РАН работа по эксперименту ХАДЕС проводилась по двум основным направлениям:

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

- разработка, моделирование и тестирование электромагнитного калориметра установки ХАДЕС для работы на создаваемом ускорителе SIS100 комплекса ФАИР, создаваемого в Дармштадте. Установка ХАДЕС (HADES – High Acceptance DiElectron Spectrometer) [1] представляет собой широкоапертурный магнитный спектрометр для идентификации и измерения энергии адронов и электронов/позитронов, образующихся в ядро-ядерных взаимодействиях при энергиях налетающих ядер 1 - 2 ГэВ на нуклон и в адрон-ядерных взаимодействиях при энергиях до 4 ГэВ.

Геометрически спектрометр разделен азимутально на шесть идентичных секторов, которые определяются расположением обмоток сверхпроводящего тороидального магнита, которые перекрывают область полярных углов в диапазоне от 18 ° до 88 ° и практически полный азимутальный угол. Поперечное сечение двух противоположных секторов показано на рис. 72. При такой геометрии аксептанс установки в области промежуточных быстрот для дилептонных пар достаточно большой и составляет ~40%.

Для идентификации и измерения импульсов заряженных частиц спектрометр имеет несколько детекторных подсистем. Электроны и заряженные адроны – пионы, каоны, протоны и более тяжелые заряженные фрагменты идентифицируются по времени пролета частиц между стартовым детектором, расположенным перед мишенью и двумя системами сцинтилляционных годоскопов TOININO и TOF, расположенными после магнита. Одна из этих систем (TOFINO) перекрывала полярный угол от 18 до 45 градусов и представляла собой 24 радиально расположенных сцинтилляционных детекторов сгруппированных по 4 детектора в каждом из 6 секторов. Эта система была разработана и создана группой ИЯИ РАН. Она использовалась в экспериментах на ХАДЕСе по исследованию выходов электронпозитронных пар и заряженных частиц при столкновениях p+p, n+p, p+Nb, C+C, Ca+KCl в течение 2002-2007гг. Однако, при переходе к исследованию столкновений более тяжелых ядер, такая система уже не могла быть использована из-за ее относительно небольшой гранулярности. В 2011г. она была заменена на резистивные плоскостные камеры с хорошей гранулярностью и временным разрешением порядка 80 пикосекунд [2]. Это позволяет с высокой эффективностью идентифицировать заряженные частицы в столкновениях тяжелых ядер.



Рисунок 72 - Слева - схема установки ХАДЕС; справа – фотография установки ХАЕДЕС в сеансе 2012г. На переднем плане показан передний годоскоп внутри светонепроницаемого экрана.

Второй сцинтилляционный годоскоп времяпролетной системы (TOF) [3] перекрывает полярный угол от 45 до 88 градусов. Он состоит в общей сложности из 384 сцинтилляционных детекторов, также разбитых на 6 секторов. Такая геометрия позволяет иметь достаточно хорошую степень гранулярности в области полярных углов 45 до 88 уменьшает вероятность двойных попаданий частицы градусов, что В одну сцинтилляционную пластину в данном событии даже в реакциях с тяжелыми ядрами. Свет с обоих торцов каждой из сцинтилляционных пластин собирался на фотоумножители с помощью пластических световодов. Временное разрешение этого сцинтилляционного годоскопа составляет порядка 180 пикосекунд.

Для идентификации электронов, помимо описанной выше времяпролетной системы, используется кольцевой черенковский пороговый детектор (RICH) расположенный в области вокруг мишени, где отсутствует магнитное поле. Дополнительно, также для этой цели, в области передних углов используется предливневый детектор (SHOWER). Детектор RICH обеспечивает идентификацию лептонов, будучи нечувствительным к быстрым к пионам с энергией приблизительно до 3 ГэВ, а SHOWER позволяет улучшить дискриминацию лептонов от адронов посредством детектирования электромагнитной лавины от электронов.

Измерение импульсов заряженных частиц и их углов вылета из мишени обеспечивается трековой системой детекторов, состоящей из сверхпроводящего тороидального магнита и набора из четырех плоскостей мини дрейфовых камер (MDC). Камеры измеряют положение и направление движения заряженных частиц до и после области магнитного поля. Из отклонения траекторий в магните определяется импульс

каждой частицы. Данная система обеспечивает импульсное разрешение для заряженной частицы с точностью порядка 1 %.

Для отбора событий используется двухуровневая триггерная система, которая позволяет отбирать события по ИХ центральности, используя информацию о множественности частиц во времяпролетной системе и по онлайн идентификацию лептонов в RICH, ТОГ и SHOWER детекторных системах. Такой отбор позволяет сократить количество неинтересных с точки зрения физики, событий, и уменьшить количество данных, записываемых на диск. Проведенная модернизация системы сбора данных с использованием новой считывающей электроники на основе TRB2, в разработке которой принимала участие и группа ИЯИ РАН, позволила существенно увеличить скорость сбора данных. Подробное описание этих детекторных систем установки ХАДЕС, организация триггера, системы сбора и анализа данных приведено в работе [1].

Еще одной важной детекторной системой установки ХАДЕС является передний многоканальный сцинтилляционный годоскоп FW (Forward Wall) [4], см. рис.42. Решающий вклад всоздание и обслуживание этого годоскопа внесла группа ИЯИ РАН. Этот годоскоп был впервые использован на установке ХАДЕС при исследовании образования электронпозитронных пар в пр взаимодействиях при энергии налетающих нейтронов 1.24 ГэВ [5]. Годоскоп располагался на расстоянии 7 м за жидководородной мишенью и перекрывал область полярного угла от 0,33 до 7,17 градусов. Для этого эксперимента в качестве налетающего пучка использовался пучок дейтронов, а в качестве мишени жидководородная мишень. Реакция пр идентифицировалась посредством регистрации передним годоскопом непровзаимодействовавшего протона спектатора из ядра дейтрона.



Рисунок 73 - Слева - схема геометрического расположения сцинтилляционных детекторных ячеек в переднем годоскопе установки ХАДЕС. Годоскоп состоит из 288 сцинтилляционных детекторных ячеек: 140 ячеек – в центральной области, 64 ячейки – в промежуточной области и 84 ячейки – во внешней области. В центре – фронтальный вид годоскопа (под защитной плёнкой) Справа – вид тыльной стороны годоскопа с отверстиями для монтажа корпусов ФЭУ.

После значительной модернизации переднего годоскопа, проведенной группой ИЯИ РАН, он был использован в 2012г. в эксперименте по исследованию образования электронпозитронных пар в реакции Au+Au при энергии налетающих ядер золота 1.24 ГэВ на нуклон. Основное назначение переднего годоскопа в этом эксперименте состояло в определении плоскости реакции при пособытийном анализе данных и использование этой информации для анализа потоков заряженных частиц в данной реакции. Поэтому, модернизация годоскопа включала в себя создание более симметричной конструкции на базе существующих детекторных ячеек годоскопа, полную замену высоковольтного питания фотоумножителей сцинтилляционных детекторов годоскопа, полную замену электроники и Для считывания сигналов с фотоумножителей системы считывания данных с годоскопа. сцинтилляционных детекторов переднего годоскопа использовалась система сбора данных, унифицированная с времяпролетным детектором (ТОF) установки ХАДЕС. Она представляет собой распределенную (без использования каркасных модулей) систему, основанную на использовании единственного системного модуля TRB (TriggerReadoutBoard) [6,7] на всех уровнях иерархии системы сбора данных. Группой ИЯИ РАН в процессе модернизации детектора была полностью заменена электроника считывания и установлены новые TRB (Trigger and Readout Board) модули со встроенной DAQ (Data AQuasition) функциональностью, которые были разработаны с участием ИЯИ. На рис. 43, слева показана фотография модуля TOFAddOn размещенного на плате TRB. Всего для переднего годоскопа используется 3 таких сборки, которые размещаются непосредственно рядом с годоскопом под крейтами высоковольтного питания фотоумножителей.



Рисунок 74 - Слева - фото одной из сборок TOFAddOn – TRB. Справа - расположение электроники на переднем годоскопе во время сеанса 2012г.

Группа ИЯИ РАН отвечала также за подготовку годоскопа к сеансу 2012г, а также за его правильное функционирование во время сеанса измерений, калибровку и анализ полученных с него данных.

Группой ИЯИ РАНг. В 2013г. подготовлен и опубликован препринт ИЯИ [5] (а также принята статья в печать в журнале «Приборы и техника эксперимента») с подробным описанием конструкции годоскопа, его электроники, калибровки и методики использования переднего годоскопа в эксперименте ХАДЕС для измерения плоскости реакции. Подготовлена статья для публикации в журнале Nucl. Instrum. and Methods.

# 2.5 Участие ИЯИ РАН в анализе экспериментальных данных сеанса Au+Au при энергии налетающих ядер золота 1.24 ГэВ на нуклон.

Для азимутальных распределений вторичных протонов, образованных в изучаемой реакции исследовались распределения направленного v1 и эллиптического v2 потоков в зависимости от величины нормализованной быстроты у0 для двух интервалов центральности столкновений: 0.45<bo<0.55 (синий цвет) и 0.25<bo<0.45 (зеленый цвет), см. рис 75. Приведенные здесь предварительные результаты ХАДЕСа соответствуют приблизительно 1/20 всей накопленной по данной реакции статистике. На этом рисунке результаты текущего анализа данных ХАДЕСа приведены заполоненными символами и, для сравнения, пустыми символами обозначены результаты линейной интерполяции двух наиболее близких результатов эксперимента FOPI для реакции Au+Au при энергиях 1.2 и 1.5 ГэВ на нуклон [8]. На данном этапе работы систематическая ошибка еще не изучена с достаточной тщательностью, предварительная оценка ошибки составляет порядка 10%.



Рисунок 75 - Азимутальные потоки вторичных протонов для реакции Au+Au при энергии налетающего пучка ядер золота 1.23 ГэВ на нуклон.

Видно, что полученные предварительные результаты хорошо согласуются с данными FOPI в диапазоне центральности 0.45<bo<0.55. Имеющееся расхождение для более центральных столкновений может быть объяснено несколькими факторами. Это и точность учета эффективности регистрации для разных участков аксептанса, возможная неточность отбора по центральности, возможные недостатки при отборе протонов вследствие только предварительного варианта калибровки трековых и время-пролетных детекторах. В настоящее время проводится детальное исследование всех этих и других возможных факторов.

Предварительное (без детального учета эффективности регистрации вторичных частиц в разных областях аксептанса) изучение v1 и v2 потоков было проведено также для ядер дейтрона и трития. Сравнение с результатами эксперимента FOPI (при аналогичных условиях отбора показывает хорошее согласие (рис 76). Проведенная оценка систематических ошибок включала вариацию отборов ячеек годоскопа в событии участвующих в определении плоскости реакции.



Рисунок 76 - Азимутальные потоки вторичных дейтронов и тритонов для реакции Au+Au при энергии налетающего пучка ядер золота 1.23 ГэВ на нуклон.

Накопленная значительная статистика по выходам вторичных адронов в данном эксперименте должна позволить впервые оценить следующий параметр Фурье-разложения азимутального распределения, v3, который, как ожидается, является характеристикой раннего состояния системы сталкивающихся ядер. Видно, что предварительная оценка v3 возможна и может быть осуществлена по идентичной методике, как и восстановление v1 и v2, но систематическая ошибка потребует большей тщательности из-за малости величины v3.

Начат анализ азимутальных потоков для подпорогового рождения положительно заряженных каонов. Исследуются условия отбора К<sup>+</sup> в трековой системе с использование информации об энергетических потерях каонов в трековых многопроволочных камерах и времяпролетных сцинтилляционных детекторах установки ХАДЕС.

# 2.6 Участие ИЯИ РАН в разработке, моделировании и тестировании электромагнитного калориметра ХАДЕС

Планируется, что ХАДЕС будет установлен на пучке тяжелых ядер первой очереди ускорительного комплекса SIS-100, запуск которого должен состояться в 2017г., для исследования процессов образования электрон-позитронных пар в ядро-ядерных столкновениях при энергиях до 11 ГэВ/нуклон. Для понимания свойств диэлектронных спектров и поиска эффектов восстановления киральной симметрии необходимо детальное знание так называемого «адронного коктейля» — вклада в диэлектронный спектр адронных распадов после химического вымораживания. Здесь главный вклад дают Далиц-распады нейтральных псевдоскалярных  $\pi$ - и  $\eta$ -мезонов. Таким образом, необходимо знание сечений рождения мезонов в ядро-ядерных столкновениях, которые отсутствуют для энергий в области 11 ГэВ/нуклон. Для измерения сечений рождения нейтральных псевдоскаляров по их двухфотонным распадам необходимо оснащение установки ХАДЕС электромагнитным калориметром. Также необходимы  $\gamma$  – измерения от каналов образования странных частиц, таких как распад  $\Lambda(1405), K^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ . Электромагнитный калориметр помимо регистрации фотонов должен обеспечивать также разделение адронов и электронов при больших значениях импульсов частиц (p>400 MeV/c) и заменить используемый в настоящее время предливневый детектор.

Еще в 2008г. группа ИЯИ РАН предложила использовать в качестве основных элементов существующие модули использованного ранее калориметра установки OPAL в ЦЕРНе. Была достигнута договоренность между ИЯИ РАН и собственниками модулей в ЦЕРНе о передаче этих модулей в ГСИ для использования в электромагнитном калориметре для ХАДЕС. Более 1000 этих модулей были отобраны силами ИЯИ РАН в ЦЕРНе и доставлены в ГСИ. Коллаборация ХАДЕС оценила это как "in-kind" вклад ИЯИ РАН в данный проект на сумму 1 млн. евро. Радиатором модулей калориметра является свинцовое стекло марки CEREN 25 с размерами 92х92х420 мм. Геометрия калориметра повторяет общую структуру детекторных систем ХАДЕСа и также состоит из 6 секторов, каждый из которых собран из 163 модулей.

Для использования этих модулей в калориметре ХАДЕСа, необходимо провести работу по их полной реконструкции с заменой фотоумножителей, отражателей и

реконструкции корпусов. Такая работа была начата ИЯИ РАН в 2009г. и продолжена в 2010 - 2013г.г. К концу 2013г. силами группы ИЯИ РАН полностью реконструированы около 630 модулей из 978 модулей, необходимых для сборки 6 секторов калориметра. Испытания модулей калориметра на космике проводятся в ГСИ на специальном стенде, созданном ИЯИ РАН (Рис.46, справа), позволяющем тестировать одновременно 5 модулей калориметра. В 2013г. группой ИЯИ РАН разработана система считывания амплитудных сигналов с тестируемых модулей на основе 16 канального САЕN DT5742.



Рисунок 77 - Слева - схема общего вида электромагнитного калориметра установки ХАДЕС; справа - стенд для проведения тестирования модулей калориметра на космике, созданный группой ИЯИ РАН.

В 2013г. с участием ИЯИ РАН подготовлен технический проект калориметра. В этом проекте, в котором в настоящее время совместно с ИЯИ РАН участвуют группы из Германии, Чехии и Польши, приводится подробное описание калориметра, результаты моделирования отклика калориметра, а также результаты проведенных тестовых измерений энергетического разрешения и разделения пионов и электронов на тестовых пучках. Приводятся расчеты механической системы для сборки и установки модулей калориметра и другие технические и организационные детали проекта.

В техническом проекте приведены также распределения работ и координаторы направлений работ по созданию калориметра между институтами, входящими в коллаборацю ХАДЕС. ИЯИ РАН отвечает за реконструкцию и сборку модулей калориметра и их тестовые испытания. В настоящее время проект проходит внешнюю экспертизу в ФАИР, после чего будет опубликован.

В декабре 2013г. проведена работа по подготовке к тестированию модулей электромагнитного калориметра на пучке электронов на ускорителе МАМІ в Майнце в начале января 2014г. Подготовлены несколько модулей с различными типами фотоумножителей, а также с несколькими вариантами прототипов аналоговой и считывающей электроники.

## 2.7 Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI

## (Германия)

В 2013 году работа по эксперименту СВМ группой ИЯИ РАН проводилась по нескольким основным направлениям:

- подготовка и сдача Технического проекта переднего адронного калориметра установки СВМ в ФАИР;

- моделирование точности определения угла плоскости реакции передним адронным калориметром, а также другими детекторными системами CBM;

исследование свойств генераторов событий ядро-ядерных взаимодействий SHIELD
и LAQGSM, учитывающие тяжелые фрагменты при моделировании центральности и плоскости реакции;

- интеграция и тестирование транспортного кода GEANT4 в программу моделирования CBMRoot эксперимента CBM;

 продолжение работы по моделированию образования и детектирования J/psi с помощью электромагнитного калориметра CBM через их распад на электрон-позитронную пару;

 завершение анализа данных по тестированию модуля адронного калориметра на пучке канала T10 в ЦЕРНе при импульсах налетающих протонов 2 – 6 ГэВ/с. Подготовка и выпуск препринта ИЯИ РАН с результатами анализа, подготовка и отправка статьи в журнал «Приборы и техника эксперимента;

- выступления на совещаниях коллаборации СВМ с докладами.

Установка СВМ представляет собой магнитный спектрометр со сверхпроводящим магнитом и ряд детекторных систем для идентификации типа частиц, определения их импульсов, электромагнитного калориметра, а также переднего адронного калориметра – PSD для измерения энергии частиц-спектаторов не участвовавших в процессе взаимодействия налетающего ядра с ядром мишени. Существует две версии установки CBM – одна для детектирования распадов векторных мезонов по их распадам на электрон-позитронные пары, другая, для детектирования распадов на мюонные пары. Адронный

калориметр используется в обоих версиях и служит для определения таких глобальных характеристик взаимодействия как центральность взаимодействия и определение угла плоскости реакции, необходимого для определения потоков частиц.



Рисунок 78 - Установка СВМ. Слева - версия для детектирования электрон-позитронных пар, Справа – версия установки для детектирования мюонных пар.

За разработку и создание переднего адронного калориметра отвечает группа ИЯИ РАН. Работы по разработке этого калориметра ведутся с 2006г. В 2013 году результаты моделирования определения плоскости реакции, центральности и радиационной дозы калориметра, а также техническое описание модулей калориметра, результаты тестов изготовленных прототипов и т.д. обобщены и представлены в Техническом проекте этого калориметра. Технический проект был одобрен коллаборацией СВМ в апреле 2013г. (рис.48, слева) и представлен в комитет ФАИР для проведения внешней экспертизы, которая завершается в момент написания данного отчета. После проведения данной экспертизы, в начале 2014г., планируется подписание контракта между ИЯИ РАН и ФАИР на производство модулей данного калориметра.



Рисунок 79 - Копия титульной страницы Технического проекта переднего адронного калориметра установки CBM (слева). Схема переднего вида детектора PSD (в центре) и схема вида отдельного модуля PSD (справа).

PSD – это модульный калориметр состоящий из 44 отдельных модулей (рис. 79, в центре) с отверстием в центральной части, оставленным для проходящего пучка. Каждый модуль адронного калориметра имеет поперечный размер 20 x 20 см<sup>2</sup> и продольную длину соответствующую 6 длинам ядерного взаимодействия. Вес одного модуля порядка 500 кг. Модуль состоит из 60 слоев пластин свинца и пластикового сцинтиллятора с соотношением толщин 4:1 (толщина свинцовых пластин и слоев сцинтиллятора составляют 16 и 4 мм, соответственно). Сбор света осуществляется посредством спектросмещающего оптоволокна вклеенного во фрезерованную канавку на плоской стороне сцинтилляционной пластины. Такая конструкция обеспечивает высокую эффективность и равномерность, в пределах нескольких процентов, светосбора с пластины сцинтиллятора. Свет из каждых 6 последовательно расположенных пластин сцинтиллятора собирается спектросмещающими оптоволокнами на один микропиксельный лавиннымй фотодетектор с чувствительной областью 3х3 мм<sup>2</sup>, расположенном в конце модуля (рис. 79, справа). Продольная сегментация модуля на 10 секций обеспечивает равномерность сбора света вдоль всего модуля и предоставляет, также, уникальную возможность для улучшения энергетического разрешения, основанного на измерении продольного профиля ливня.

В 2013г. был завершен анализ экспериментальных данных по исследованию отклика модуль адронного калориметра на пучке канала Т10 в ЦЕРНе при импульсах налетающих протонов 2 – 6 ГэВ/с. Результаты опубликованы в виде препринта ИЯИ РАН. Подготовлена и отправлена в печать статья (журнал «Приборы и техника эксперимента»).

На рис. 80 представлены результаты измерения энергетического разрешения и линейности отклика модуля калориметра при этих и более высоких энергиях, выполненных ранее. Полученная константа стохастического члена в разрешении – порядка 56%, удовлетворяет требованию эксперимента к точности измерения энергии спектаторов.



Рисунок 80 - Энергетическое разрешение (слева) и линейности отклика (справа) модуля калориметра.
Полученные при моделировании точности определения угла плоскости реакции передним адронным калориметром с центральным отверстием в калориметре 20 х20 см<sup>2</sup>, а также другими детекторными системами CBM показаны на рис. 81 (слева).



Рисунок 81 - Точность определения угла плоскости реакфий развичными детекторными системами CBM (слева). В центре и справа зависимость энерговыделения в калориметре от прицельного параметра для отверстия в центре калориметра 20 х20 см<sup>2</sup> (в центре) и диаметром 6 см (справа).

Показано, что передний адронный калориметр обеспечивает наилучшую точность восстановления угла плоскости реакции. Требуется дальнейшая оптимизация максимально допустимого диаметра отверстия в центре калориметра для измерения центральности в широком диапазоне прицельного параметра.

Для более правильного учета энерговыделения тяжелых фрагментов в калориметре при моделировании центральности и плоскости реакции в 2013г. велась работа по интеграции и тестированию транспортного кода GEANT4 в программу моделирования CBMRoot эксперимента CBM.

#### 3 Исследование редких распадов элементарных частиц

Закончено изготовление первых 24 (из 120), модернизированных модулей Годоскопического Детектора Адронов (ГДА, рис. 82) установки ОКА. Ниже приведены фотографии соответственно отдельного модуля (рис. 83) и первых 24 модернизированных модулей (рис. 84). Изготовление оставшихся 96 модулей запланировано на 2014 год до начала осеннего сеанса на установке ОКА.



Рисунок 82 - Вид ГДА со стороны входа пучка.



Рисунок 83 - Отдельный модернизированный модуль ГДА.

Модернизация заключается в переделке старых модулей. В новых модулях регистрация сцинтилляционного света производится не плоскими спектросмещаюшими световодами (как было в старой конструкции), а WLS-волокнами. Волокна в виде кольцеобразной петли вклеены в сцинтилляционные пластины. Их свободные концы выводятся вдоль модуля к фотокатодам ФЭУ, будучи перед ними собранными в пучки. Новый способ светосбора позволяет разбивать модули в продольном направлении на отдельные части, опрашиваемые отдельными фотоумножителями. Такое разбиение позволит надёжно отличать сигналы от мюонов и пионов в области около 1 ГэВ.



Рисунок 84 - Изготовленные первые 24 (из 120), модернизированных модулей ГДА.

Для светоизоляции всего ГДА (см. рис. 82) из модернизированных модулей силами сотрудников Лаборатории разработана конструкция его нового корпуса. Он повысит эксплуатационные характеристики калориметра (ускорится смена ФЭУ, ремонт делителей, наладка контактов и прочее). Подготовлена техническая документация для изготовления элементов корпуса в Опытном Производстве.

Сотрудники Лаборатории постоянно участвуют в подготовке и проведении сеансов на установке ОКА согласно Соглашению между ИЯИ и ИФВЭ.

В эксперименте NA62 в 2013 г. параллельно обработке полученных ранее данных проводились работы по плановой модернизации установки для достижения основной задачи – измерения  $B(K^+ \rightarrow \pi^+ vv)$ . Так в настоящее время ведется разработка и изготовление новых детекторов. ИЯИ РАН делает вклад в создание новой охранной системы (SAC, IRC) и матричного годоскопа CHOD, включая а) разработку конструкции и изготовление детектора SAC, б) разработку конструкции ячеек CHOD, в) разработку и изготовление прототипов

электроники для фотодетекторов, г) измерения харктеристик фотодетекторов, д) измерения амплитудных и временных характеристик прототипов на тестовых пучках ускорителя и космических мюонах. Основные результаты, полученные группой ИЯИ в 2013 г. можно сформулировать следующим образом:

В 2013 г. измерены параметры новых прототипов гейгеровских многопиксельных фотодиодов SiPM фирмы HAMAMATSU и SensL. Результаты показали улучшение основных характеристик: эффективность регистрации фотонов возросла до 50%; шумовые характеристики также существенно улучшены (100 кГц/мм<sup>2</sup>). Разработаны быстрые малошумящие усилители для тестовых измерений, изучено влияние времени нарастания сигнала на временное разрешение детектора.

Проведен анализ данных технического сеанса 2012 г., в котором были проведены измерения прототипов сцинтилляционных ячеек с гейгеровскими многопиксельными фотодиодами SiPM фирмы HAMAMATSU (Japan) и ЦПТА (Москва). Получены оценки световыхода и временного разрешения в зависимости от конструкции светосбора, шумов фотоприемника и формировки электронных сигналов.

Проведены измерения временного разрешения прототипов счетчиков для нового годоскопа заряженных частиц (CHOD) на пучковом гало канала У-70 и космических мюонах. Изучены варианты прямого светосбора и светосбора с помощью светосмещающего волокна. В качестве фотоприемников использовались кремниевые фотодиоды SiPM (SensL и CPTA) и компактный фотоумножитель R7899-20 (HAMAMATSU). Полученое временное разрешение достигает 300 псек в варианте с прямым светосбором и 600 псек с использованием волокна.



Рисунок 85 - Фотографии прототипов ячеек годоскопа CHOD с лавинными фотодиодами: слева – толщиной 3 см, исследованные в 2013 г.; справа – вариант изученный в 2012 г.

В 2013 г. в ЦЕРН собрана тестовая установка, позволяющая изучать временные и амплитудные характеристики на космических мюонах и включающая в себя систему пропорциональных камер для измерения треков мюонов с точностью <1 мм. Проводятся измерения с новыми прототипами ячеек СНОД, в частности, с использованием толщины сцинтиллятора 3 см. На основании полученных результатов в 2014 г. планируется сделать выбор конструкции нового годоскопа СНОД.

## Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах каонов

#### 4.1 Исследование нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах

#### каонов

Проведён анализ 5% данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску тяжелых стерильных нейтрино с массами 140-300 МэВ. В результате этого анализа получен новый предел на смешивание тяжелых стерильных нейтрино с обычными нейтрино. Ограничение на вероятность смешивания в области масс тяжелых нейтрино от 180 до 300 МэВ на 90%-м уровне достоверности составляет от  $2 \times 10^{-7}$  до  $2 \times 10^{-8}$  соответственно. Анализ ограниченного объема данных (5%) позволил убедиться в правильности выбранных методов оценки фоновых и сигнальных событий, поэтому коллаборация E949 приняла решение открыть для анализа оставшуюся часть данных (95%). По предварительным оценкам, если сигналы тяжелого нейтрино не будут обнаружены в исследуемой области масс, то ожидаемое ограничение на параметры стерильных нейтрино может быть улучшено в 10 раз.

Для разработки, создания и тестирования сцинтилляционных счетчиков для будущих экспериментов создан высокотехнологичный участок – в 202-м корпусе ИЯИ РАН.

Разработаны и изготовлены элементы детекторов для экспериментов ORKA – по прецизионному измерению вероятности распада положительного каона K<sup>+</sup> --->  $\pi^+ \nu \nu$  (Фермилаб, США).

# 4.2 Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях КЕК и J-PARC

Анализ данных, набранных в эксперименте T2K на ускорителе J-PARC (Япония) в 2010-2013 гг., что соответствует полной светимости в  $6.6 \times 10^{20}$  POT (протонов на мишени), продемонстрировал убедительное доказательство осцилляций мюонных нейтрино в электронные – впервые в мире. В дальнем детекторе Супер-Камиокандэ было зарегистрировано 28 событий, идентифицированных как электроноподобные, появившиеся в результате взаимодействия в детекторе через заряженный ток электронных нейтрино с энергией от 100 до 1250 МэВ. Ожидаемое число таких событий, предполагая отсутствие осцилляций  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  (для  $\theta_{13} = 0$ ) составило  $4.92 \pm 0.55$  события. Основной вклад в фоновые события дают электронные нейтрино, содержащиеся в исходном пучке мюонных нейтрино, а также вклад от нейтральных пионов, возникающих в результате взаимодействия мюонных

нейтрино через нейтральные токи. Таким образом, осцилляции  $v_{\mu} \rightarrow v_e$ , т.е. появление электронных нейтрино в пучке мюонных нейтрино, обнаружены в эксперименте T2K со статистической значимостью 7.3 $\sigma$ . Другими словами, вероятность того, что эти 28 событий могут быть получены в результате флуктуаций фона ничтожно мала и составляет величину меньше  $10^{-12}$ . В случае  $\delta = 0$  (нет CP-нарушения) центральная величина  $\sin^2 2\theta_{13}$  имеет значение  $0.140^{+0.038}$ -0.032 для нормальной иерархии масс нейтрино (m<sub>3</sub> > m<sub>2</sub>) и  $0.170^{+0.045}$ -0.037 для инверсной иерархии (m<sub>3</sub> < m<sub>2</sub>). Ненулевое значение угла  $\theta_{13}$  позволяет решать задачу определения CP-нарушающей фазы  $\delta$  в лептонном секторе. Для этого необходимо точно измерить другой («атмосферный») угол смешивания  $\theta_{23}$ , который измеряется при изучении «исчезновения» мюонных нейтрино («дефицит»).

При исследовании «дефицита» мюонных нейтрино (данные из 1-3 сеансов,  $3 \times 10^{20}$  POT) в дальнем детекторе получено 58 мюоноподобных событий при ожидаемом числе событий 205±17 (без осцилляций). Анализ этих событий дает величину  $\Delta m_{32}^2$  (разность квадратов масс нейтрино) на уровне  $2.44 \times 10^{-3}$  МэВ/с2, а угол смешивания согласуется с величиной  $\sin^2 2\theta_{23}$ =1.00, что подтверждает данные других экспериментов (SK и MINOS).

#### 4.3 Разработка новых сцинтилляционных детекторов для экспериментов с

#### ускорительными нейтрино

Для ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой продолжаются работы по изготовлению прототипа ближнего нейтринного детектора.

Изготовлено свыше трех тысяч пластин сцинтиллятора на основе полистирола методом экструзии (в компании Унипласт, г. Владимир). В 202-м корпусе ИЯИ РАН создан производственный участок для вырезания канавок в этих пластинах, а также для вклеивания оптического спектросмещающего волокна в данные канавки.

Проведены конструкторские работы по оптимизации дизайна оптического разъема для соединения оптоволокна, вклеенного в пластический сцинтиллятор, и фотодиода, служащего для сбора сцинтилляционного света. Произведено около двадцати тысяч этих разъемов (в компании Унипласт, г. Владимир).

Проводятся инженерно-конструкторские работы для начала массового производства сцинтилляционных счетчиков в 202-м корпусе ИЯИ РАН.

#### 5 Электронные методы детектирования нейтрино

#### 5.1 Поиск нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд на

#### сцинтилляционных детекторах LVD и АСД

Теория предсказывает, что эволюция массивных звёзд главной последовательности может завершиться гравитационным коллапсом и мощным коротким импульсом нейтринного излучения. В модели стандартного коллапса (сферически-симметричная, невращающаяся, немагнитная звезда, МСК) излучаются все типы нейтрино в равных долях. Наиболее естественно попытаться зарегистрировать поток электронных антинейтрино. Для этого требуется хорошо защищенный от фона космических лучей подземный детектор, состоящий из сотни, а лучше бы даже, 1000 тонн водородосодержащего вещества в качестве мишени для реакции  $v_e p \rightarrow e^+n$ . Эффект от коллапса идентифицируется по появлению в пределах 20 секунд статистически редкого сгущения импульсов, регистрируемых детектором. Важным является совпадение эффекта с оптическим наблюдением вспышки сверхновой. Сильно улучшить достоверность результатов позволяет параллельная работа нескольких детекторов, расположенных в разных местах земного шара.

Исследование нейтринного излучения от коллапса звезд позволит нам получить информацию о поведении и свойствах вещества в экстремальных условиях ядерной плотности, сверхвысоких температур и давлений, мощных гравитационных полей, образования нейтронных звезд и черных дыр – самых фундаментальных процессов во Вселенной.

Начиная с конца 70-х гг., в ИЯИ нами были построены несколько больших подземных сцинтилляционных детекторов, способных измерить нейтринное излучение от коллапса. Это - АСД (1977 г.), БПСТ (1978 г.), LSD (1984 г.), LVD (1992 г.).

23 февраля 1987 г., когда в галактике Большое Магелланово Облако вспыхнула Сверхновая SN1987A, детекторы KII и IMB зарегистрировали нейтринный сигнал в 7:35 UT, а детектор LSD - в 2:52 UT. Этот сигнал оказался совершенно необъяснимым в рамках стандартной модели. Он получил интерпретацию в модели, учитывающей вращение керна звезды. Эта модель была сконструирована В.С. Имшенником, чтобы получить механизм сброса оболочки на заключительном этапе эволюции массивных звезд главной последовательности и названа автором моделью вращающегося коллапсара (MBK). Эта модель предсказывает возможность двустадийного коллапса. На первой стадии излучаются в основном электронные нейтрино со средними энергиями 30-40 МэВ, во второй – все типы нейтрино, как в МСК, со средними энергиями 10-15 МэВ.

Для регистрации гравитационного коллапса необходима длительная непрерывная работа специализированных экспериментальных установок. Основная задача состоит в том, чтобы зарегистрировать кратковременную нейтринную вспышку и определить типы измеренных нейтрино. Это очень важно для понимания, что происходит со звездой на последней стадии эволюции. Установками, способными идентифицировать все типы нейтрино, являются: детектор LVD, в состав которого входит примерно 1 кт железа и 1 кт жидкого сцинтиллятора, и установка Артемовский Сцинтилляционный Детектор (АСД) Артемовской Научной Станции ИЯИ РАН.

В случае осуществления модели стандартного коллапса (МСК) полная энергия, идущая в нейтринное излучение, составляет примерно 10% от массы сколлапсировавшей звезды и делится между шестью типами нейтрино приблизительно поровну. Наиболее подходящей реакцией для поисковых экспериментов с использованием жидкостных сцинтилляционных счетчиков является реакция взаимодействия электронного антинейтрино с водородом:

$$v_e + p \rightarrow e^+ + n, \ E_{e^+} = E_{\tilde{v}_e} - 1.3 \text{ M} \Im B$$
 (1)

Эта реакция сопровождается захватом нейтрона водородом с излучением γ-кванта 2.2 МэВ:

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

В детекторе АСД нейтроны, рожденные вблизи стенок, захватываются также ядрами Сl, входящими в состав окружающей установку соли

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

Время захвата нейтронов в АСД равно  $\tau$ =170 мксек. Вероятность захвата 85%. Таким образом, АСД с высокой степенью надежности может идентифицировать  $v_e$ .

Все типы нейтрино (v<sub>i</sub>) взаимодействуют также с углеродом. В случае МСК основной реакцией является реакция возбуждения ядерного уровня углерода 1<sup>+</sup> (15.11 МэВ) за счет нейтрального тока:

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

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

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

В случае Модели Вращающегося Коллапсара (МВК) регистрация электронных нейтрино может осуществляться благодаря реакциям:

$$v_e + (A, Z) \to e^- + (A, Z+1),$$
 (7)

$$v_e + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z+1)^*$$
, (8)

$$v_e + (A, Z) \to v_e + (A, Z)^*,$$
 (9)

Для углерода это реакции:

$$v_e + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}N + e^-, \qquad (10)$$

$$^{12}N \rightarrow {}^{12}C + e^+ + v_e , \ \tau = 15.9 \text{ Mc}, E_{th} \approx 17.3 \text{ M} \Rightarrow B$$
  
 $\overline{v}_e + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}B + e^+ , \qquad (11)$ 

$$^{12}\text{B} \rightarrow ^{12}\text{C} + \text{e}^{-} + \nu_{e}$$
 ,  $\tau = 29.4$  Mc,  $E_{\text{th}} \approx 14.4$  MoB

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

$$v_e + Na^{23} \rightarrow e^- + Mg^{23}$$
, порог примерно 4 МэВ, (12)  
 $v_e + Cl^{35,37} \rightarrow e^- + Ar$ , порог ~ 800 кэВ для  $Cl^{37}(24.5\%)$  и ~ 5 МэВ для  $Cl^{35}(75.5\%)$ . (13)

При взаимодействии электронов с солью высока вероятность рождения ядра Mg<sup>23</sup> в возбужденном состоянии с излучением γ-кванта с энергией примерно7.5 МэВ.

#### АСД - стотонный сцинтилляционный детектор АНС.

Детектор АСД расположен в соляной шахте на глубине 570 м.в.э. (г. Артемовск, Донбасс), где фон естественной радиоактивности примерно в 300 раз меньше чем в обычном грунте. Детектор имеет цилиндрическую форму, диаметр (556±3) см, высота 547 см; содержит 105 тонн жидкого сцинтиллятора на основе уайт-спирита. Высота столба сцинтиллятора 540 см, плотность - 0,78 г/см3. 144 фотоумножителя расположены на боковой поверхности детектора.

Масса мишени для поиска нейтринного излучения от коллапсов звезд равна 105 тоннам сцинтиллятора и 1000 тоннам соли (NaCl). Число ожидаемых событий при вспышке сверхновой типа SN1987A в центре Галактики равно 57 vep в модели МСК и 44 veA в первой фазе MBK.

Методом поиска нейтрино в детекторе является регистрация всех событий, имеющих энерговыдеделение E > 5 МэВ, этот триггер открывает временные ворота  $\Delta t = 1$  µсек с энергетическим порогом 0.7 МэВ для детектирования нейтронов в реакции (1, 2)

За период наблюдения за Галактикой по данным установки с 1977г. по 2013г. кандидатов на вспышки Сверхновых обнаружено не было. За 36 лет работы получено ограничение на частоту гравитационных коллапсов менее, чем одно событие за 15.63 года на 90% доверительном уровне ( $f_{col} < 0.064$  года<sup>-1</sup>).



Рисунок 86 - Установка АСД АНС

Детектор Большого Объема LVD.

Детектор Большого Объема (Large Volume Detector, LVD), основной задачей которого является регистрация нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд, представляет собой массив из 840 сцинтилляционных счетчиков, упорядоченных в компактную модульную структуру (Рис. 87). Это железно-сцинтилляционный калориметр, содержащий ~ 1000 т сцинтиллятора и ~ 1000 т железа. С 2002 года эффективное время работы установки составляет 99.8% (Рис. 88). Модульная структура установки позволяет проводить регламентные работы по поддержанию детектора в рабочем состоянии без остановки системы сбора информации. Для регистрации нейтринной вспышки от коллапса Сверхновой нужна большая масса установки и высокий процент живого времени – LVD удовлетворяет обоим требованиям.



Рисунок 87 - Установка LVD

Полная мишень LVD состоит из  $8.313 \times 10^{31}$  свободных протонов,  $4.267 \times 10^{31}$  ядер углерода,  $9.7 \times 10^{30}$  ядер железа и  $3.393 \times 10^{32}$  электронов.

Каналы взаимодействия нейтрино в детекторе LVD (МСК):

$v_e + p \rightarrow e^+ + n$	(E <sub>th</sub> =1.8 МэВ)	(88%)	(14)
$v_e + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}N + e^-$	(E <sub>th</sub> =17.3 МэВ)	(1.5%)	(15)
$\overline{v}_e + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}B + e^+$	(E <sub>th</sub> =14.4 M <sub>3</sub> B)	(1.0%)	(16)
$\nu_i+{}^{12}C \rightarrow \nu_i+{}^{12}C^*+\!\gamma$	(E <sub>th</sub> =15.1 МэВ)	(2.0%)	(17)
$\nu_i + e^- \rightarrow \nu_i + e^-$	(-)	(3.0%)	(18)

$$v_e + {}^{56}Fe \rightarrow {}^{56}Co^* + e^-$$
 (E<sub>th</sub> =10. M3B) (3.0%) (19)  
 $\bar{v}_e + {}^{56}Fe \rightarrow {}^{56}Mn + e^+$  (E<sub>th</sub> =12.5 M3B) (0.5%) (20)

$$v_{e} + Fe \rightarrow Will + e$$
 (E<sub>th</sub> =12.5 W3B) (0.5%) (20)  
 $v_{i} + {}^{56}Fe \rightarrow v_{i} + {}^{56}Fe^{*} + \gamma$  (E<sub>th</sub> =15. M3B) (2.0%) (21)

Основной реакцией взаимодействия антинейтрино является обратный бета распад (IBD), реакция 14), который дает два детектируемых сигнала: быстрый сигнал от позитрона и следующий за ним сигнал от захвата np $\rightarrow$ dγ (Eγ=2.2 MэB, среднее время захвата около 185 мкс).

В первой стадии коллапса по модели MBK ( $E_v = 20 \div 40$  МэВ) основной реакцией является реакция (21) (80% событий обязаны ей). Число ожидаемых событий при вспышке сверхновой типа SN1987A в центре Галактики равно 500  $v_ep$  в модели MCK и 410  $v_eA$  в первой фазе MBK.

Основой поиска нейтринных всплесков является идентификация кластеров событий в фиксированных временных интервалах. Алгоритм отбора кандидатов на нейтринные всплески в режиме реального времени основан на поиске кластеров, состоящих из *m* сигналов в течение временного окна фиксированной ширины,  $\Delta t$ . Каждый период наблюдения длительностью T сканируется «скользящим окном» с  $\Delta t=20$  сек, таким образом, он делится на N = 2T/ $\Delta t$  – 1 интервалов, причем каждый последующий начинается в середине предыдущего. Частота имитации события фоном, т.е. появления кластеров длительностью 20 с и множественностью  $\geq m$ , равна:

$$F_{im}(m, f_{bk}, 20 \ c) = N \cdot \sum_{k=m}^{\infty} P(k; 20 \cdot \frac{f_{bk}}{c^{-1}}) \ coбытий \cdot deнb^{-1},$$

где  $f_{bk}$  – темп счета фоновых событий, P(k;  $f_{bk}\Delta t$ ) - пуассоновская вероятность получить кластер множественностью k за время  $\Delta t$ , если  $f_{bk}\Delta t$  - среднее число фоновых импульсов, N=8640 – число интервалов за день. Например, если  $f_{bk}$ =0.03 с<sup>-1</sup> (темп счета фоновых событий при пороге 10 МэВ), для получения события, вероятность имитации фоном которого равна один раз в 100 лет, требуется кластер из  $m_{min}$ =10 импульсов, а если

 $f_{bk}$ =0.2 с<sup>-1</sup> (что соответствует порогу 7 МэВ) – из  $m_{\min}$ =22. Для известного темпа счета фоновых событий минимальная множественность кластера  $m_{\min}$  соответствует выбранной частоте имитации  $F_{im}$ , которая рассматривается как порог. Кластер рассматриваеся как кандидат на нейтринный всплеск от Сверхновой, если его множественность  $m > m_{\min}$ . Выбранное значение  $F_{im}$  составляет 1 событие раз в 100 лет в режиме, когда LVD работает без связи с другими детекторами, и 1 событие в месяц для работы в проекте SNEWS.

С целью поиска электронных нейтрино от гравитационных коллапсов была дополнительно проанализирована непрерывная последовательность данных эксперимента более чем за 8 лет его работы, с 2000 г. по 2008 г. Рассмотрены интервалы времени 3, 5, 10 и 20 сек и определена вероятность P<sub>N</sub> получить N одиночных тригтерных импульсов во временном интервале данной длины, если за его начало брать такой же одиночный тригтерный импульс. Выбор продолжительности временных интервалов определяется теоретическими предсказаниями о длительности нейтринного всплеска: 2,4 – 6 сек в модели вращающегося коллапсара, 10-20 сек в модели стандартного коллапса.



Риунок 88 - Активная масса M(t) установки LVD. 1992 год – запуск первой башни T1, 1996 г – запуск T2, 2002 г. – работа всех трех башен установки.

Статистического превышения количества кластеров над фоном не зафиксировано, что позволяет впервые поставить экспериментальное ограничение на частоту коллапсов, не сопровождающихся всплеском излучения электронных антинейтрино: менее 1 события в 3,5 года на 90% уровне достоверности.

По данным работы установки LVD с 1992 года (21 год) предел на частоту вспышек сверхновых составляет 1/9.12 года<sup>-1</sup>.

#### 5.2 Поиск осцилляций $v_{\mu} \rightarrow v_{e}$ в экспериментах LVD и OPERA

Существующая теория смешивания нейтрино трех ароматов (3-flavour mixing oscillation) предсказывает, что электронные, мюонные и тау нейтрино могут переходить из одного типа в другое, лептонные числа при этом по отдельности не сохраняются, частицы являются дираковскими, имеют ненулевую массу. Вероятность перехода одного типа нейтрино в другое прямо пропорциональна расстоянию от источника и обратно пропорциональна его энергии.

В ходе эксперимента MiniBooNE (США) осцилляций обнаружилось больше, чем можно было бы ожидать даже в случае наличия осцилляций трех типов нейтрино. Результаты позволяют сделать предположиение о существовании частиц нейтрино нового аромата, "стерильного", не вступающего в обычное слабое взаимодействие.

Пучок нейтрино (CNGS), направленный из ЦЕРНа в Гран Сассо, состоит из 98% мюонных нейтрино. Примесь электронных нейтрино составляет менее 1%. Установки OPERA и LVD способны регистрировать v<sub>e</sub>-взаимодействия, благодаря измерению электромагинтных каскадов, рождающихся в детекторе. Фоном является примесь v<sub>e</sub> в пучке v<sub>µ</sub> и его взаимодействия с веществом (пи-мезоны и таоны). Благодаря большому расстоянию между источником нейтрино и детектором мюонных нейтрино в пучке (730 км) и высокой энергии v<sub>µ</sub> (<E>  $\approx$  17 ГэВ), детекторы в Гран Сассо имеют хорошую чувствительность к  $\Delta m^2$  >0.01 eV<sup>2</sup>.

#### Ограничение эксперимента OPERA.

Для поиска v<sub>e</sub> взаимодействий в эксперименте OPERA были проанализированы данные 2008 и 2009 годов, соответствующие 5255 записанных событий.



Рисунок 89 - Схема обнаружения электронов от взаимодействия ve. a) обнаружение треков в объеме брика б) реконструкция и нахождение вершины (розовая линия) для поиска треков в CS, c) анализ всех промежуточных треков.

Идентификация электронов от взаимодействия электронных нейтрино, главным образом базируется на обнаружении электромагнитных ливней (рис. 89). Сначала находится и реконструируется вершина взаимодействия, затем треки экстраполируются в сменную пластину (CS) и после подтверждения сканируется весь брик и восстанавливается ливень целиком. Окончательно, кандидаты проверяются вручную (определяется совпадение углов треков в эмульсии, треков одиночных электронов или  $e^+e^-$  -пар). Из 5255 нейтринных событий было найдено 19 кандидатов на  $v_e$ -взаимодействие. Энергетическое распределение найденных событий представлено на рис. 90.

Фоновое количество взаимодействий электронных нейтрино было определено методом Монте Карло (см. табл. 4). Также в таблице приведено ожидаемое количество событий для двух моделей осцилляций нейтрино: модель смешивания трех ароматов (3-flavour oscillation) и модель нестандартных осцилляций (non-standard oscillation).

	3-flavour oscillation	non-standard oscillation
Фон от ve из пучка	19.4	19.4
Фон от π0	0.2	0.2
Фон от т→е	0.3	0.3
Фон «non-standard oscillation»	0	1.4
TOTAL	19.8	21.3

Таблица 4. Ожидаемое число фоновых событий.



Рисунок 90 - Энергетическое распределение наблюдаемых событий от ve -

взаимодействий (точки с ошибками) в сравнении с рассчитанными спектрами от фона (розовая, коричневая и зеленая гистограмма), синяя гистограмма – распределение событий в случае осцилляций в стандартной модели смешивания трех ароматов.

На рисунке 91 представлен стандартный график исключенных областей в плоскости  $\Delta m^2 - \sin^2 2\theta$  для различных экспериментов. Синяя кривая – ограничение эксперимента OPERA. Ограничение, полученное OPERA на  $\sin^2 2\theta$ , установлено с учетом ограничения, полученном на MiniBooNe и LSND на  $\Delta m^2$ .



Рисунок 91 - Исключенные области в плоскости  $\Delta m^2 - \sin^2 2\theta$  для различных экспериментов. Синяя кривая – ограничение эксперимента OPERA.

По данным работы пучка мюонных нейтрино 2008-2009 годов в эксперименте OPERA получен первый результат по поиску осцилляций  $v_{\mu} \rightarrow v_{e}$ . Данные сопоставимы с неосцилляционной гипотезой в модели смешивания нейтрино трех ароматов. Получено ограничение на параметры углов смешивания в случае нестандартных осцилляций: sin<sup>2</sup>  $(2\theta_{new}) < 7.2 \times 10^{-3}$  (при  $\Delta m_{new}^2 > 0.1 \text{ eV}^2$ ) на 90% уровне достоверности.

Регистрация электронных нейтрино от пучка CNGS в LVD.

Установка LVD регистрирует пучок нейтрино из ЦЕРНа с 2006 года, что позволяет определить с большой точностью все возможные фоновые эффекты, в т.ч. зависящие от аппаратных неисправностей. Благодаря тому, что точно известно время каждого запуска протонов из ЦЕРНа, фоновые эффекты можно измерять непосредственно в тот момент, когда был пучок. Глубина грунта в направлении из ЦЕРНа составляет более 15 000 м.в.э. На этой глубине возможна регистрация мюонов только от высокоэнергичных нейтрино. Подобные события крайне редки.

Железно-сцинтилляционный детектор LVD (лаборатория Гран Cacco, глубина 3300 м.в.э.), расположен в 730 км. от ускорителя в ЦЕРНе. Пучок нейтрино (CNGS) со средними энергиями 17 ГэВ идет в направлении из ЦЕРНа (Швейцария) в Гран Сассо (Италия). Пучок более, чем на 98 %, состоит из мюонных нейтрино. Примесь электронных нейтрино в пучке составляет менее 1% (рис. 92).



Рисунок 92 - Спектры электронных и мюонных нейтринных, антинейтринных потоков в зависимости от энергии.

Взаимодействие мюона отличается от взаимодействия электрона с веществом установки. Мюон от мюонного нейтрино со средней энергией пучка 17 ГэВ тратит, в основном, свою энергию на ионизацию. Потери составляют около 270 МэВ на счетчик. Мюон обычно проходит через всю установку насквозь. Для электронов преобладает иной тип взаимодействия – радиационные потери. Благодаря им происходит быстрое развитие электромагнитного каскада, достигающего максимума во 2-ом,3-ем,4-ым (в зависимости от начальной энергии) счетчике по треку. Энерговыделение в максимуме каскада больше, чем энерговыделение от ионизационных потерь мюона. При этом общая длина трека короче.



Рисунок 93 - События от пучка, зарегистрированные в детекторе LVD в 2010 году.

Отбор событий, связанных с детектированием нейтрино от пучка из ЦЕРНа в первую очередь проводится по временному критерию. Разделение событий, обязанных регистрации электронных или мюонных нейтрино, проводится по измерению энерговыделения в счетчиках установки, а именно, для электронных нейтрино энерговыделение в одном из детекторов должно превышать 350 МэВ.

С 2008 года по 2011 год были обработаны события эксперимента LVD от пучка мюонов из ЦЕРНа, которые показали, что установка способна видеть события с высокой точностью (рис. 93). Всего было зарегистрировано 60 776 событий от пучка.

Модульная структура установки позволяет определить топологию события и, таким образом, разделить события, связанные с взаимодействиями в детекторе, электронных и мюонных нейтрино. Примеры событий взаимодействия мюонного и электронного нейтрино в детекторе LVD показаны на рис. 94 и рис. 95.

Для поиска событий-кандидатов на регистрацию электронных нейтрино в детекторе LVD были установлены следующие ограничения:

a) не должно быть импульсов с E > 7 МэВ в первых двух счетчиках по направлению прихода нейтринного пучка в 1 башне,

б) не должно быть импульсов с максимальным энерговыделением в боковых счетчиках установки,

в) ограничение на энерговыделение в счетчике должно быть E > 400 МэВ.

Был проведен анализ при различных энергетических порогах на энерговыделение, для того, чтобы в дальнейшем определить наиболее эффективное соотношение полезный сигнал/фон.



Рисунок 94 - Событие в установке LVD – взаимодействие мюонного нейтрино.



Рисунок 95 - Событие в установке LVD – взаимодействие электронного нейтрино.

Получено, что число событий с энерговыделением E>400 МэВ в одном счетчике равно 504. Таким образом, доля кандидатов на регистрацию  $v_e$  в мюоном пучке составляет  $\delta = 504/60776 = 0.008$ , которая сопоставима с долей электронных нейтрино в пучке CNGS.

Результаты работ были доложены на конференциях и семинарах и опубликованы научных журналах.

5.3 Регистрация третьего события-кандидата в детекторе OPERA



5.3.1 Цель эксперимента OPERA.

Рисунок 96 - Эксперимент ОПЕРА в зале С подземной лаборатории Гран Сассо

ОРЕКА является гибридным детектором; он включает в себя мишенную часть, состоящую из 150000 эмульсионных блоков, и электронные детекторы, которые служат для регистрации времени прихода событий, для целеуказания, т.е. определения блока, где находится вершина взаимодействия, а также для измерения импульса мюонов и их идентификации. Общий вид детектора OPERA, состоящего из двух одинаковых супермодулей, показан на рис. 96.

Детектор эксперимента OPERA состоит из двух независимых супермодулей, включающих в себя 29 стенок мишенных блоков и мюонные спектрометры. Мишенные блоки состоят из эмульсионных «кирпичей», являющихся основным элементом детектора. Около каждой стенки мишенного блока расположены электронные детекторы, позволяющие определить в каком эмульсионном «кирпиче» произошло взаимодействие. Эмульсионный блок - основной элемент детектора, состоящий из 57 эмульсионных пластин, чередующихся с 56 свинцовыми пластинами. Толщина свинцовой пластины составляет 1000 мкм, пластиковой основы - 205 мкм, эмульсионной – 44 мкм. Размер блока составляет 127х102х75.4 мм^3, масса - 8.3 кг.

Обработка событий, найденных в эмульсионных "кирпичах" проводится при помощи сканирующих комплексов. Поиск вершины взаимодействия нейтрино с веществом проводится при помощи различных алгоритмов восстановления треков. Для выделения осцилляционных событий в коллаборации OPERA в настоящее время применяются критерии отбора, разрабатываемые на основе моделирования методом Монте-Карло с использованием программных кодов OpRelease, FLUKA и FEDRA.

#### 5.3.2 Третье событие-кандидат.

Первое событие-кандидат в эксперименте OPERA было зарегистрировано в 2010 году в канале распада  $\tau \rightarrow h$ . Второе событие обнаружено от взаимодействия таонного нейтрино в веществе детектора, которое идентифицировано как регистрация тау-лептона, распавшегося в канале  $\tau \rightarrow 3h$ . Кандидат в таоны распался с образованием трех заряженных частиц; кроме того, имеется еще один трек, исходящий из вершины первичного взаимодействия.

В 2013 году обнаружено третье событие-кандидат в канале τ→µ. На рисунке 97 представлен его схематичный вид.



Рисунок 97 - Схема третьего события -кандидата.



Рисунок 98 - Современный статус анализа экспериментальных данных эксперимента OPERA По состоянию на 2013 год среднее ожидаемое число событий-кандидатов, зарегистрированных в эмульсиях эксперимента OPERA, удовлетворяющих стандартным критериям отбора, составляет около 6. Поэтому в ближайшее время, в случае реальности явления осцилляций нейтрино в канале, можно ожидать еще 1 – 2 событий-кандидатов.

#### 6 Галлий-германиевый нейтринный телескоп.

#### 6.1 Баксанский галлиевый эксперимент.

В соответствии с программой ежемесячных измерений потока солнечных нейтрино в 2013 году выполнено 12 извлечений на ГГНТ. Все извлечения установлены на измерения. Проведен первичный анализ данных 12 извлечений. Завершены измерения 7 извлечений, предварительный объединенный анализ данных 7 измерений 2013 г. дает величину скорости захвата 64.2 +13.7/-12.7 SNU.

За 24-летний период наблюдений с января 1990 года по август 2013 года в эксперименте SAGE выполнено 230 измерений скорости захвата солнечных нейтрино (434 отдельных наборов данных). Это самый длительный период измерений среди всех солнечных нейтринных экспериментов.

В энергетических диапазонах L- и K-пиков распада  $^{71}$ Ge отобрано 4864 события, из которых 1308 отнесено временным анализом к  $^{71}$ Ge.

На Рисунке 1 представлены результаты измерений SAGE, объединенных по годам. Заштрихованная область соответствует объединенному результату SAGE 65.0 +/-2.4 (стат.) SNU. Вертикальные линии в каждой точке соответствуют статистической ошибке 68%, горизонтальные – временному интервалу объединенного анализа измерений.



Рисунок 99 - Результаты измерений, объединённых по годам

Объединенный анализ данных за 24-летний период измерений скорости захвата нейтрино с энергией выше 0.233 МэВ на галлии дает величину 65.0 +/-2.4 (стат.) +2.6/-2.8 (сист.) SNU или 65.0 +3.5/-3.7 SNU, где статистическая и систематическая неопределенности объединены квадратично. Суммарная ошибка результата составляет 5.6%.

Галлий-германиевый нейтринный телескоп Баксанской нейтринной обсерватории в настоящее время является единственным в мире телескопом, обеспечивающим измерение скорости фундаментальной протон-протонной (*pp*) реакции термоядерного синтеза в Солнце, в которой генерируется подавляющая часть солнечной энергии. Регистрация *pp* нейтрино является прямым мониторингом светимости Солнца.

#### 6.1.2 Модернизация телескопа с целью повышения его чувствительности.

В 2013 году была разработана и изготовлена установка отдувки германия с использованием эжекторной системы барботажа. Смонтированы дополнительные вакуумные выпарные аппараты для перехода на новую технологическую схему извлечения германия из галлиевой мишени со сбором конденсата.

Изготовлена и аттестована лигатура с высокообогащенным изотопом <sup>76</sup>Ge. Для улучшения воспроизводимости и точности анализа германия методом ICP OES разработана методика анализа с использованием внутреннего стандарта (BC). Внутренний стандарт использовался с целью уменьшения влияния матрицы (совокупности всех элементов в аналите) на результат анализа. В качестве BC использован иттрий. Подобрана оптимальная концентрация BC.

Для повышения чувствительности ГГНТ в рамках работ по увеличению массы мишени ГГНТ проведена регенерация 1563.6 кг экстракционных растворов. Выход металлического чернового галлия составил 97.5%, что составляет 1524.5 кг. Проведена очистка части чернового галлия, получено 325 кг галлия марки 99,9999 для включения активную часть мишени ГГНТ.

## 6.2 Калибровочный эксперимент с искусственным источником нейтрино на

## основе радионуклида <sup>51</sup>Cr на двухзонной галлиевой мишени

#### 6.2.1 Искусственный источник нейтрино и двухзонный галлиевый реактор

#### 6.2.1.1 Изготовление хромовой мишени

Продолжались работы по разработке методики изготовления хромовой мишени для облучения нейтронами в реакторе CM-3.

Основным способом производства хрома является электрохимическое осаждение на катодах металлического хрома из электролита, представляющего собой водный раствор хромовой кислоты. Разработан эскизный проект электролизера для получения металлического обогащенного хрома-50 из хромового ангидрида. Электролизер состоит из титанового корпуса, разделенного перегородкой на две камеры: электролизная камера и

камера охлаждения электролита. В 2013 году получен специальный блок питания для электролизера на основе управляемого источника питания EL-SS2000-12-D2, позволяющий достичь на электролизере ток 100 А при рабочем напряжении 6-8 В. В 2014 году планируется разработать рабочие чертежи электролизера, изготовить его и начать технологические испытания.

#### 6.2.2 Разработка прецизионных методов измерения интенсивности источника

#### 6.2.2.1 Калориметрический метод

Собран гидравлический контур калориметрической системы для измерения активности источника нейтрино на основе хрома-51 активностью 3 МКи, т.е. с тепловыделением порядка 600 Вт. В состав контура входят измерительная ячейка, в которую помещается источник, проточные температурные сенсоры на основе образцовых платиновых термометров сопротивления, позволяющие измерять температуру теплоносителя на входе и выходе из измерительной ячейки с точностью 0,002°С, корриолисовый расходомер с точностью измерения потока теплоносителя 0.05% в диапазоне расходов 10-100 кг/час и термостат с точностью поддержания температуры 0.01° К, работающий в режиме нагревохлаждение. Измерительная системы, так и вывести измеряемые величины на компьютер, что позволяет создание компьтеризованной системы измерений. Изготовлен тепловой имитатор источника с электронагревом с системой питания и измерений, позволяющей устанавливать заданное значение тепловыделения с точностью лучше 0,3%. Система питания теплового имитатора также может управляться с компьютера.

6.2.2.2 Метод на основе измерения спектров непрерывного у-излучения

#### источника.

Получены основные результаты по обоснованию метода определения активности нейтринных источников по измерениям спектров непрерывного  $\gamma$ -излучения, выходящего за пределы первичной защиты источника. Работа основана на регистрации внутреннего тормозного излучения (ВТИ), образующегося в  $\beta$ -распадах элементов. Например, в источнике <sup>51</sup>Cr ВТИ имеет непрерывный спектр от 0 до 750 кэВ с суммарной интенсивностью ~4·10<sup>-4</sup> на 1 распад. Выведены уравнения, связывающие сигнал в детекторе с активностью разных частей источника, полная активность источника вычисляется как сумма активностей этих частей.

Для возможности выделения в измеренном спектре достаточного количества энергетических интервалов необходимо использовать детектор с высоким разрешением, например, германиевый ППД. Для германиевого ППД получены функции отклика – спектры

сигналов в детекторе от входного монохроматического излучения. Получены уравнения, позволяющие однозначно восстановить спектр излучения, попадающего в детектор, по измеренному в детекторе спектру.

Получены формулы для учёта гамма-излучения примесей радиоактивных элементов, образующихся вместе с основным изотопом <sup>51</sup>Cr при облучении в ядерном реакторе, при вычислении полной активности источника <sup>51</sup>Cr.

Эффективности регистрации и функции отклика детектора вычислялись с применением метода Монте-Карло с использованием пакета программ Geant4 для геометрических данных по некоторому стандартному кристаллу германиевого полупроводникового детектора (Ge ППД). При использовании конкретного Ge ППД, необходимо будет пересчитать для него функции отклика, также необходимо будет пересчитать и эффективности для конкретного исполнения источника <sup>51</sup>Cr. Показано, что изза недостаточного разрешения, вследствие которого в регистрируемом спектре происходит значительное наложение сигналов соседних энергетических интервалов друг на друга, детектор NaI не подходит для использования в данном методе определения активности источника <sup>51</sup>Cr. Были проведены оценки систематических неопределённостей, связанных с геометрией источника, детектора и коллиматора, а также влияния фона и примесей на точность метода.

### 6.2.2.3 Дополнительные каналы системы регистрации распадов <sup>71</sup>Ge ГГНТ

Завершено создание дополнительных счетных каналов новой системы регистрации Галлий-германиевого нейтринного телескопа, рисунок 100, для чего в течение отчетного периода были выполнены следующие работы: завершено изготовление пассивной защиты из материалов, чистых по содержанию космогенных изотопов, и системы антисовпадений, подключен гидропривод, система вентиляции и система продувки защиты испаряющимся азотом. Выполнены измерения фона пассивной защиты и фона детектора антисовпадений.

Изготовлена партия модулей специальной конструкции для размещения счетчиков в каналах дополнительной системы регистрации, рисунок 101, а также платформа для установки этих модулей в пассивную защиту, рисунок 102.



Рисунок 100 - Общий вид системы регистрации с дополнительными счетными каналами и новой пассивной защитой.



Рисунок 101 - Электронный модуль с пропорциональным счётчиком.



Рисунок 102 – платформа.

Разработано техническое задание на быстрый малошумящий зарядовый предусилитель на основе гибридных микросхем Amptek. Приобретена партия микросхем A250, изготовлены опытные экземпляры предусилителей, выполнен их монтаж в составе модулей, проведены испытания их работы с пропорциональными счетчиками.

Разработано развернутое техническое задание на программное обеспечение с использованием библиотек интерфейса программирования приложений (API), входящих в комплект программного обеспечения КАМАК - контроллера.

Изготовлена очередная партия миниатюрных низкофоновых пропорциональных счетчиков из высокочистого кварца. Для исследования их счетных и фоновых характеристик счетчики заполнялись стандартной смесью и устанавливались на измерения в систему счета ГГНТ. Продолжаются исследования новых счетчиков с целью определения стабильности их счетных и фоновых характеристик.

#### 7 Нейтринная астрофизика высоких энергий

#### 7.1 Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз.Байкал

Ключом к решению задач, предусмотренных планом работ по Байкальскому нейтринному проекту, и одной из главных целей ежегодных экспедиций на оз. Байкал является обеспечение стабильной работы Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (БГНТ) в режиме постоянного круглогодичного набора данных и проведение испытаний новых узлов и элементов проектируемого детектора кубокилометрового масштаба НТ1000. Одним из существенных этапов этой работы стало проведение зимней экспедиции 2013 года, в течение которой при работе с ледового покрова озера удалось выполнить весьма внушительный объем работ по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной регистрирующей и управляющей аппаратуры комплекса БГНТ.

Развернута и введена в эксплуатацию в режиме долговременного набора данных первая очередь демонстрационного кластера нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба НТ1000 в озере Байкал. Демонстрационный кластер, создание которого планируется завершить в течение 2014 – 2015 годов, является мультимегатонным глубоководным детектором нейтрино, содержащим 192 фотодетектора, размещенных на 8ми вертикальных гирляндах. Демонстрационный кластер включает в себя образцы всех элементов и функциональных систем кластера телескопа HT1000: оптические модули нового поколения, системы сбора данных с измерением временной формы импульса, модернизированные системы выработки триггерных условий и передачи данных в береговой центр управления, калибровочные системы, акустическую систему позиционирования и ряда других. Первая очередь демонстрационного кластера, развернутая в 2013 году (кластер-2013) содержит 72 оптических модуля (ОМ) формирующих три вертикальные гирлянды, расположенные на расстоянии 40 м друг от друга. Оптические модули включают в себя фотоэлектронные умножители Hamamatsu R7081HQ и сопутствующую электронику, а также по два калибровочных светодиода. Каждая из гирлянд содержит 24 ОМ расположенных на расстоянии 15 м друг от друга и формирующих две секций по 12 ОМ в каждой. Системы сбора, обработки и передачи данных измерительных каналов расположены в электронных блоках каждой секции и позволяют регистрировать временную форму сигнала. Кластер-2013 связан с береговым центром управления и сбора данных гибридным глубоководным кабелем длиной около 6 км, включающим в себя оптоволоконные линии передачи данных и медные жилы для электропитания установки. Временная синхронизация измерительных каналов установки осуществляется засветкой оптических модулей световой вспышкой от внешнего

лазерного калибровочного источника света, а также с использованием световых импульсов калибровочных светодиодов размещенных в каждом оптическом модуле. Пространственное положение фотодетекторов установки контролируется с помощью акустической системы позиционирования разработанной компанией **EvoLogics** (Германия). С целью долговременного мониторинга гидрофизических параметров глубинных вод озера Байкал, в период зимней экспедиции 2013 года развернута инструментальная гирлянда, содержащая 8 фотодетекторов предназначенных для измерения уровня собственного свечения воды на глубине от 500 м до 900 м, а также 9 гидроакустических детекторов предназначенных для исследования изменения формы гирлянд регистрирующих модулей нейтринного телескопа под действием водных течений озера.

На протяжении 2013 года осуществлялась эксплуатация кластера-2013 в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и выделен банк событий от атмосферных мюонов, проведено уточнение относительных временных сдвигов измерительных каналов из анализа событий от атмосферных мюонов. Получена экспериментальная оценка точности определения положения и интенсивности ливней высоких энергий в демонстрационном кластере по результатам восстановления положения и интенсивности калибровочного лазерного источника света с использованием данных установки 2013 года. Исследованы вариации уровня собственного свечения водной среды и временное поведение параметров оптических модулей, в частности темнового тока фотоэлектронных умножителей, в течение 2013 года. Зарегистрировано передвижение в вертикальном направлении сверху вниз со скоростью порядка 7 м/сутки слоя воды толщиной порядка 200 метров с повышенным уровнем свечения. Выполнен мониторинг интенсивности водных течений на глубине постановки регистрирующей аппаратуры по результатам обработки данных акустической системы позиционирования установки и акустических детекторов инструментальной гирлянды.

В течение 2013 года продолжалась разработка программного обеспечения работ по моделированию отклика и анализа данных кластера и нейтринного телескопа НТ1000 в задачах исследования природных потоков нейтрино, поиска нейтринного сигнала от аннигиляции темной материи в астрофизических объектах, поиска гипотетических частиц. Продолжена разработка и тестирование комплекса вычислительных программ BARS, включающего в себя модули чтения И предварительного анализа И отбора экспериментальных данных, обработки калибровочных данных, модули выделения и восстановления событий от разных источников, модули МК-моделирования отклика установки.

В течение 2013 года выполнена комплектация, сборка и испытание в лабораторных условиях новых оптических модулей на базе фотоэлектронных умножителей Hamamatsu R7081HQ с повышенной квантовой чувствительностью фотокатода. Выполнена модернизация и испытания элементов и узлов регистрирующих систем, системы сбора и передачи данных, триггерной системы, а также системы электропитания кластера-2014, которая будет включать в себя пять гирлянд, каждая из которых будет рассчитана на подключение 24-х оптических модулей. Развертывание кластера-2014 запланировано на период зимней экспедиции 2014 года на оз. Байкал.

Выполнен анализ данных Байкальского нейтринного телескопа НТ200 в задаче поиска нейтринного сигнала от аннигиляции реликтовых частиц темной материи в Солнце за период чистого времени наблюдения 2,76 года. Анализ включал моделирование фоновых атмосферных нейтрино, моделирование прохождения «сигнальных» нейтрино с энергией выше нескольких ГэВ от центра Солнца до уровня наблюдения и оптимизацию соотношения сигнала к фону. Были вычислены потоки нейтрино от аннигиляции массивных слабо взаимодействующих частиц (WIMP) в четырёх каналах: bb, tau-tau, WW и монохроматичных нейтрино в предположении их 100% вероятности в каждом случае для масс от 30 ГэВ до 10 ТэВ. Создана новая вычислительная программа прохождения осциллирующих нейтрино в веществе переменной плотности, с рассмотрением процессов рассеяния и поглощения нейтрино, а также регенерации вторичных нейтрино от тау лептона. В оптимизации «сигнал/фон» существенным является их различие по форме энергетических спектров. Для нахождения оптимального угла поиска сигнала в направлении на Солнце использовалась численная подгонка минимального отношения между ожидаемым средним предельным числом событий и вычисленным числом сигнальных событий. В этой процедуре использовалась информация о реальной конфигурации установки и определение эффективной площади телескопа для разных нейтринных потоков, а также зависимость угла разлета рожденного мюона от родительского нейтрино в зависимости от его энергии и рассеянии в среде. В анализе экспериментально измеренных событий были использованы те же параметры отбора («cuts») нейтринных событий, что были получены по моделированным атмосферным нейтрино в задаче поиска локальных источников. Отбирались кроме того, только те нейтринные события, что соответствовали времени нахождения Солнца ниже горизонта («ночные нейтино»). В результате были определены углы конусов поиска сигнала в зависимости от предполагаемой массы WIMP и установлены новые верхние пределы на число нейтрино от аннигиляции WIMP. Из этих предельных значений были вычислены ограничения на мюонные и нейтринные потоки, на частоту аннигиляций и на сечения упругого рассеяния WIMP на протоне. Наиболее сильные ограничения на спин-зависимые

сечения упругого рассеяния темной частицы на протоне получены в лептонных каналах аннигиляции, то есть монохроматичных нейтрино и тау-тау. Эти результаты Байкальского HT200 во всем диапазоне масс WIMP одни из наиболее сильных наряду с ограничениями, полученными большими установками IceCube и ANTARES, а также телескопами с порогом регистрации мюонов от 1 ГэВ - Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа и Super Kamiokande. Пределы Байкальского телескопа на спин-зависимые сечения в лептонных каналах на два порядка сильнее пределов, полученных из результатов прямых экспериментов по поиску WIMP.

Байкальский нейтринный телескоп является в настоящее время одним из трех наиболее крупных действующих нейтринных телескопов по своей эффективной площади и эффективному объёму по отношению к регистрации природных потоков нейтрино высоких энергий.

7.2 Проблема геофизических нейтрино.

# 7.2.1 Подготовка научного обоснования создания большого сцинтилляционного детектора на Баксанской нейтринной обсерватории для исследования

#### природных потоков нейтрино низких энергий.

В 2013 г. была найдена возможность наблюдения еще одного источника геонейтрино. Кроме урана и тория в Земле содержится по разным оценкам от 2 до 4% калия. Изотоп калия <sup>40</sup>К составляет 0.0117% природного состава. Он распадается с вероятностью 89.25% в <sup>40</sup>Са с испусканием бета-частицы и антинейтрино с граничной энергией 1.311 МэВ. Верхняя энергия спектра ниже энергии порога реакции обратного бета-распада и не может быть зарегистрирована с ее помощью, однако антинейтрино могут быть зарегистрированы по реакции рассеяния на электроне. Однако, для этого радиационная чистота сцинтиллятора должна быть лучше, чем в Borexino <  $10^{-19}$  г/г.

Были произведены расчеты потока антинейтрино от <sup>40</sup>К при нескольких моделях расположения калия в слоях Земли. Найдено, что поток антинейтрино <sup>40</sup>К сопоставим с потоком нейтрино от <sup>7</sup>Ве, который регистрируется детектором Borexino. Эффект в детекторе Borexino может достигать 10% от наблюдаемой скорости счета <sup>7</sup>Ве. При обнаружении потока <sup>40</sup>К может быть полностью объяснен тепловой поток Земли.

## 7.2.2. Исследование высокостабильных типов жидких сцинтилляторов,

#### допускающих наработку в больших количествах.

Были получены образцы нефти для изготовления растворителя проб сцинтиллятора. Закуплены материалы для изготовления кювет, предназначенных для изучения свойств и радиационной чистоты жидких сцинтилляторов. Изготовлены кюветы из кварца и оргстекла. Приобретен блок высокого напряжения для питания ФЭУ в установке по проверке свойств сцинтиллятора. Изготовлена установка по исследованию образцов сцинтиллятора на содержание <sup>14</sup>С в жидких сцинтилляторах (ЖС). Установка собрана в Баксанской нейтринной обсерватории (низкофоновой лаборатории).

# 7.2.3. Моделирование процесса регистрации геонейтрино в детекторе большого объёма.

Проведен анализ реальных данных в детекторе Double Chooz по определению направления прихода антинейтрино в детектор. Данный эксперимент удобен для моделирования регистрации антинейтрино в будущем большом сцинтилляционном детекторе, так как он обладает практически точечным источником антинейтрино (два ядерных реактора с углом наблюдения 6 градусов в детекторе) и позволяет отработать программы анализа направленности антинейтринного излучения.

Написаны программы для расчета процесса упругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на электроне в применении к сцинтилляционному детектору большого объема. Данные программы предназначены для расчетов эффекта от потоков нейтрино и антинейтрино низких энергий, производимых изотопом <sup>40</sup>K, что необходимо для определения его общего количества в недрах Земли.

Предложены две модели расположения калия в Земле. По одной весь калий сосредоточен в коре и в верхней мантии с концентрацией 2% по весу. Концентрация калия в мировом океане 0.042%, а в осадочных отложениях – 0.2%. По другой модели в ядре сосредоточено столько калия, чтобы довести среднее значение до 4%. Расчет по этим моделям дает скорость счета в 100 т псевдокумола Borexino от 1 до 4 событий в день.

Учёт калия в коре проводился по данным толщины коры в разных точках Земли. Для этого использовалась база данных с точностью деталировки 2x2 градуса широты и долготы. В базе содержатся данные по глубине расположения земных слоев до слоя Морохвичича.

#### 7.3 Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной и космологические следствия

#### их рождения

В работах 2013 года было показано, что эффективное рождение ПЧД возможно, в частности, в тех космологических сценариях, в которых в инфляционном расширении участвуют два скалярных поля . Конкретно, была исследована «курватонная» модель, в которой, кроме инфлатона, имеется дополнительное скалярное поле, определяющее конечную амплитуду спектра флуктуаций плотности. Было показано, что характерной особенностью первичных флуктуаций плотности и кривизны в моделях с курватоном является то, что их распределения не гауссовы. С учётом этого обстоятельства были произведены расчёты распределений рождающихся ПЧД по массам, а также получены ограничения на модельные параметры (в частности, на характеристики курватона). Кроме того, начато исследование модели аксионной инфляции, характеризующейся тем, что процесс инфляционного расширения сопровождается рождением квантов калибровочного поля. Результаты этих исследований опубликованы в работах, перечисленных в конце настоящего Отчёта.

#### 7.4 Фотоядерные взаимодействия лептонов при сверхвысоких энергиях

В работах 2013 года были приведены результаты вычислений (в рамках двухкомпонентной модели, разработанной авторами ранее) электромагнитных структурных функций нуклона для процесса глубоко-неупругого рассеяния, в диффракционном пределе (малые передачи 4-импульса, большие передачи энергии - эта кинематическая область наиболее важна в экспериментах с мюонами космических лучей). В модели, используемой авторами, непертурбативная часть взаимодействия описывается моделью векторной доминантности, В её модифицированном варианте, учитывающем, В частности, возбуждённые состояния векторных мезонов. По сравнению с работами предыдущего года, в 2013 году расчёты структурных функций проведены также в кинематической области сверхмалых значений бьёркеновской переменной. Основные результаты работ по этой подтеме также опубликованы. Готовится к печати ещё одна статья, подводящая итоги этих исследований.

# 7.5 Исследование характеристик потоков частиц космического излучения высоких и сверхвысоких энергий на комплексе установок БПСТ. Нейтринные эксперименты на БПСТ

Выполнен и опубликован анализ данных нейтринного эксперимента на Баксанском ПСТ за 24.12 лет живого времени наблюдений в задаче выделения нейтринного сигнала от аннигиляции реликтовых частиц темной материи в Солнце. Получены наиболее сильные на сегодняшний день в мире ограничения на спин-зависимые сечения упругого рассеяния темной частицы на протоне в канале аннигиляции тау-тау и массой меньше 50 ГэВ.

# 8 Разработка альтернативных методов детектирования космических нейтрино сверхвысоких и экстремально высоких энергий

В июле 2013 г. на международной конференции по космическим лучам в Рио де Жанейро было сделано сенсационное сообщение о детектировании нейтринным телескопом IceCube на Южном полюсе диффузного (изотропного) потока космических нейтрино внеатмосферного (астрофизического) происхождения в области высоких энергий (всего 28 событий с энергиями 6x10<sup>13</sup> - 2x10<sup>15</sup> эВ в течение двух лет, из них 12 событий – фоновых) [1]. Это первые положительные экспериментальные результаты более чем 50-летнего развития новой отрасли Астрономии – нейтринной астрономии высоких энергий (E>10<sup>9</sup> эВ), предложенной в 1958-1961 г.г. в работах [2].

Если для оптической регистрации взаимодействий астрофизических нейтрино с энергиями  $6x10^{13}$  -  $2x10^{15}$  эВ с массивом прозрачного льда потребовался объем детектора IceCube порядка 1 кубического километра, то для детектирования космических нейтрино с энергиями  $10^{16}$ - $10^{19}$  эВ (в том числе космологических или ГЗК-нейтрино) объем нейтринной мишени должен быть не менее 10 - 1000 кубических километров вещества.

Для создания нейтринных телескопов подобных гигантских размеров еще в 80-х годах в ИЯИ РАН впервые были предложены альтернативные методы детектирования нейтрино, а именно радиоволновой [3] и радиоастрономический [4] методы с использованием антарктического льда и Луны как нейтринных мишеней. Проект создания радиоволнового нейтринного телескопа РАМАНД в Антарктиде [5], разработка метода глубоководного акустического детектирования нейтрино в Средиземном море, также как и разработка нового класса лавинных фотодиодов - микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД), предложенных в ИЯИ РАН (З.Я. Садыгов и др.), успешно выполнялись до 1991 г. в рамках программы М.А. Маркова «Советский ДЮМАНД». В те годы ИЯИ РАН опережал зарубежных научных конкурентов на 5-10 лет.

Несмотря на трудности с финансированием работа по созданию альтернативных детекторов нейтрино и других элементарных частиц продолжалась в 90-е и 2000-е годы. Так поиск радиоимпульсов, которые возникают при взаимодействии нейтрино с лунным реголитом, проводился на Калязинском радиоастрономическом телескопе в начале 2000-х в рамках программы В.А. Матвеева «Нейтринная физика и астрофизика». Это позволило не только опробовать радиоастрономический метод, но и получить ограничения на потоки космических нейтрино экстремально высоких энергий [6].

В настоящее время проекты создания гигантских радио детекторов нейтрино с регистрирующим объемом вплоть до 10<sup>3</sup> куб. км (ARA - Askaryan Radio Array и ARIANNA) осуществляются в Антарктиде американскими учеными. Представляет большой интерес

также проект использования радиоастрономического телескопа SKA (площадью 1 кв. км) в Австралии для регистрации радио импульсов от каскадов экстремально высоких энергий, производимых нейтрино и другими космическими частицами, бомбардирующими Луну. Следует считать актуальной задачей разработку и создание в Средиземном море не только оптического, но и гидроакустического нейтринного детектора. Ведущие зарубежные фирмы Японии, Европы вкладывают большие средства в производство новых лавинных фотодиодов. Таким образом развитие новых методов детектирования космических нейтрино и других частиц, которое началось в СССР и России, сейчас весьма успешно продолжено, но в основном за рубежом.

Следует отметить, что финансирование проекта разработки альтернативных методов детектирования нейтрино или координатно-чувствительных детекторов частиц на основе новых лавинных фотодиодов, полученное ИЯИ РАН, например, в рамках контракта с Минобрнауки в 2010-2012 г.г., в десятки раз меньше, чем финансирование в рамках соответствующего проекта ИЯИ РАН в 1988-1990 г.г. Малое текущее финансирование проекта делает научное соревнование с зарубежными учеными затруднительным, но выше перечисленные исследования в России необходимо продолжать.

Именно поэтому в рамках программы «Нейтринная физика и астрофизика» было предложено [7-9] при разработке альтернативных нейтринных телескопов применять оптические и гидроакустические детекторы и зонды, радиофизические детекторы, имеющиеся или уже разработанные в ИЯИ РАН, ОИЯИ, ФИАН, АО ИО РАН (Калининград), ИПФ РАН (Нижний Новгород). Это позволяет оптимизировать (уменьшить) бюджет проекта и в случае его финансирования проводить фундаментальные и прикладные исследования мирового уровня [7-9]. Было также подчеркнуто, что успехи в разработках координатночувствительных (матричных) детекторов элементарных частиц на основе новейших мультипиксельных лавинных фотодиодов – МЛФД будут иметь важнейшее значение не только для экспериментальной физики высоких энергий и астрофизики, но и для создания в России нового поколения медицинского оборудования, в частности позитронноэмиссионных томографов (ПЭТ-сканеров) [10].

Основные результаты НИР в 2013 г.

#### 8.1 Проведение гидроакустических исследований, связанных с проектом НЕСТОР

(в рамках договора о сотрудничестве между ИЯИ РАН и Институтом ядерной физики и физики частиц, «Демокритус», Афины, Греция, в 2012 – 2014 г.г.): создание и испытание лабораторного образца автономного глубоководного измерителя термоупругих свойств воды на основе импульсного лазера.

Разработана схема регистрации сигналов гидрофона, датчиков давления и температуры для автономного лазерного измерителя термоупругого коэффициента воды на основе цифрового контроллера VIA EPIA P720-10EL Pico-ITX.

Цифровой контроллер обеспечивает двухканальную регистрацию данных с частотой выборки 48 (192) кГц на внешний твердотельный накопитель SSD емкостью 128 Гб.

Один канал используется для регистрации сигналов с гидрофона, а второй - для регистрации данных датчиков давления и температуры. Выходные сигналы датчиков давления и температуры после преобразователей амплитуда-частота поочередно подключаются к регистратору. Управление совместной работой датчиков, импульсного лазера и цифрового регистратора осуществляется таймером с заданным интервалом измерений. Блок-схема системы сбора данных автономного лазерного измерителя термоупругого коэффициента воды приведена на рис.103



Рисунок 103 - Блок схема автономного измерительного модуля.

Создан лабораторный образец компактной установки для проведения глубоководных измерений термоупругих свойств воды (в частности коэффициента Грюнайзена) в широком диапазоне температур на основе малогабаритного импульсного лазера с длиной волны 1,06 мкм с длиной затухания в воде 5-10 см.

Внесены изменения в оптоакустическую схему установки для обеспечения стабильных свойств перехода воздух-вода, воздух-лед. Уменьшена длительность импульса
ксеноновой лампы накачки со 100 мксек до 20-30 мксек. Проведение измерений запланировано на первый квартал 2014 г.

# 8.2 Гидроакустический, радиоволновой и радиоастрономический методы детектирования космических нейтрино

 разработка метода быстрого моделирования «трехмерных» электронно-адронных каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий в веществе с учетом эффекта Ландау-Померанчука – Мигдала и главных флуктуаций (совместно с физ. фак. МГУ).

Разработан метод быстрого моделирования «трехмерных» электронно-адронных каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий в воде, во льду, в лунном реголите с учетом эффекта Ландау - Померанчука – Мигдала и главных флуктуаций в развитии каскада. Выполнен первый этап этого быстрого ("гибридного") метода расчёта электронно-фотонных каскадов сверхвысоких и экстремально высоких энергий в воде на основе пакета GEANT4. Отлажена программа моделирования каскадов в воде (во льду) с алгоритмом, учитывающим эффект Ландау-Померанчука-Мигдала (ЛПМ-эффект) для 1-мерного случая:

- с помощью пакета GEANT4 проведены расчёты функции 1-мерного и 3-мерного распределения энергии, выделенной в среде в каскадах, производимых частицами с начальными энергиями 10<sup>-1</sup>, 10<sup>0</sup>, 10<sup>1</sup>, 10<sup>2</sup>, 10<sup>3</sup> ГэВ со статистикой 10<sup>3</sup> событий для интервала расстояний 0-10 м с шагом через 10 см.(Г.Л. Деденко, МИФИ);

- с помощью программы ЛПМ-G4 проведены расчёты функции1-мерного распределения энергии в каскадах, производимых частицами с начальными энергиями 10<sup>4</sup>, 10<sup>5</sup> и 10<sup>6</sup> ГэВ, а также с энергиями 10<sup>7</sup> - 10<sup>11</sup> ГэВ на основе средних данных расчетов предыдущего пункта;

- расчеты показали огромные флуктуации порядка 100 % и резкое увеличение длины каскада до 1 км при сверхвысоких энергиях. (см. Рис.2 и Рис.3);

- подготовлены начальные данные с помощью пакета GEANT4 для программы расчетов распределения энергии в среде в области сверхвысоких энергий для 3-мерного случая.

В июле 2013 г. И.М. Железных принял участие в Международной конференции по космическим лучам (Рио де Жанейро, Бразилия) с докладом [11], в котором был предложен алгоритм нового (быстрого) метода расчета каскадов, производимых космическими нейтрино с энергиями вплоть 10<sup>20</sup> эВ во льду (воде) и в лунном грунте.



Рисунок 104 - Расчеты функций (b, c, d, e, f) продольного распределения энергии dE/dZ, выделенной в воде индивидуальными каскадами частиц, производимых гамма квантами с энергией E<sub>0</sub>=10<sup>11</sup> ГэВ, в сравнении функцией энерговыделения, усредненной по 10 гамма квантам (а).



Рисунок 105 - Сравнение функций продольного выделения энергии dE/dZ в воде каскадами с первичными энергиями гамма квантов E<sub>0</sub>=10<sup>11</sup> ГэВ и 10<sup>10</sup> ГэВ. Для энергии 10<sup>11</sup> ГэВ проводилось усреднение по 10 частицам, для 10<sup>10</sup> ГэВ - по 100 частицам.

#### 8.3 Разработка лабораторных образцов детекторов элементарных частиц на

основе лавинных фотодиодов нового поколения – МЛФД

#### (совместно с ОИЯИ, З.Я.Садыгов).

Для выполнения работ по изучению фотометрических, спектральных и временных характеристик полупроводниковых фотоприемников и работы позиционно-чувствительных детекторов на их основе в рамках подписанного ИЯИ РАН «Протокола о совместной научной, технологической и инновационной деятельности на период 2012-2015 г.г. по разработке и применению мультипиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД)» с ОИЯИ (Дубна),, Институтом физики НАН Азербайджана (Баку) и с фирмами – производителями инновационной продукции "Zecotek Photonics Singapore Pte Ltd" и НПО "Дубна-Детекторы» 2013 Г. была продолжена модернизация И комплектация универсального В автоматизированного стенда ИЯИ РАН. В частности, была закуплена установка для изучения лавинных фотодиодов – Educational Kit фирмы CAEN. Это позволит проводить со студентами МФТИ в рамках НОЦ ИЯИ РАН – МФТИ (кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии) новый курс лекций и лабораторных работ по теме «Позиционно-чувствительные детекторы на основе полупроводниковых фотоприемников», начиная с февраля 2014 г.

В 2013 г. коллаборацией «Дубна-МЛФД» разработана технология производства новых МЛФД с глубоко погруженными пикселями, а также разработан новый метод для изготовления компактных МЛФД - матриц с минимальной мертвой зоной при детектировании фотонов [12].

В ЛНМДН и ЭЧ совместно с ЛНИ изготовлена новая конструкции прототипа двух координатного позиционно- чувствительного детектора (ПЧД) тепловых и холодных нейтронов на основе сцинтиллятора ZnS/LiF и лавинных фотодиодов (МЛФД). Фото 4х-канального детектора приведено на рис. 106.



Рисунок 106 - Прототип 2-х координатного позиционно-чувствительного детектора.

Сечения световодов увеличены до 20 кв. мм. Использованы лавинные мультипиксельные фотодиоды с улучшенными параметрами. Применена схема совпадений для регистрации сигналов. Число регистрируемых каналов увеличено до 8. Испытания прототипа планируется провести в первом квартале 2014 г.

## 8.4 Разработка и синтез соединений лития для изготовления полистирольного

## сцинтиллятора, регистрирующего нейтроны.

В течение 2013 года совместно с Лабораторией технологии глубокой очистки и регенерации веществ ФГУП «ИРЕА» были продолжены работы по отработке технологии получения нейтронного полистирольного сцинтиллятора (НПС).

синтеза изопропилата лития Дальнейшую отработку процессов проводили непосредственно в среде стирола, с последующей его полимеризацией в вакууме для исключения контакта изопропилата лития с парами воды в воздухе. Манипуляции по подготовке реакционных компонентов проводили в «сухом» боксе в атмосфере осушенного на цеолитах аргона. Недостатком в проведении работы в указанных условиях являлась атмосфере бокса невозможность непрерывного контроля содержания влаги В инструментальными методами.

В предварительно дважды перегнанный под вакуумом, стирол вводили металлический литий, затем добавляли стехиометрическое количество абсолютного изопропилового спирта, содержание влаги в котором не превышало 0,01% масс. Реакцию

между изопропанолом и металлическим литием проводили с помощью перемешивания в ультразвуковой бане в интервале температур 60-70°С. Реакцию вели до полного растворения металлического лития, что определялось визуально. Процесс растворения проходит достаточно медленно, что может быть объяснено образованием твердой корки изопропилата лития на поверхности металла. Ультразвуковое перемешивание по сравнению с механическим увеличивает скорость растворения в 3-5 раз. Этот прием может оказаться эффективным и для введения других малорастворимых в стироле компонентов для их измельчения до субмикронного уровня и равномерного распределения по объему жидкого стирола.

Полученную смесь перегружали в стеклянную ампулу, добавляли активатор и шифтер, проводили вакуумирование ампулы при температуре 45-50°С и запаивали. Далее проводилась полимеризация при температуре до 180 °С в течение 120 часов (5 суток). Полимеризация была проведена в ИФВЭ (г.Протвино).

#### 8 Исследование электромагнитных взаимодействий ядер

В эксперименте по комптоновскому рассеянию поляризованных фотонов на поляризованных протонах, проведенном совместно с коллаборацией A2 на ускорителе МАМІ (Майнц, Германия), впервые получена оценка величины спиновой поляризуемости протона – фундаментальной структурной константы, характеризующей отклик спина протона на изменяющееся электромагнитное поле. Этот результат (см.рис.107) открывает принципиальную возможность для прецизионного исследования спиновой структуры нуклонов в электромагнитных взаимодействиях.



Рисунок 107 - Спиновая поляризуемость протона γ<sub>E1E1</sub>, полученная из измерений асимметрии комптоновского рассеяния Σ<sub>2x</sub>. Точки – эксперимент, кривые – расчёт по дисперсионной модели.

Проведена обработка данных эксперимента ГРААЛЬ по фото – мульти фрагментации ядер углерода на пучке меченых фотонов с энергией 0,8 – 1,5 ГэВ. Проведено сравнение полученных результатов с предсказаниями теоретической модели на основе внутриядерного каскада.

На ускорителе MAMI C коллаборацией A2 выполнены исследования фоторождения  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов на ядрах <sup>7</sup>Li и фоторождения пар  $\pi^0 \pi^0$  и  $\pi^0 \pi^+$  в широком диапазоне масс (<sup>2</sup>H, <sup>7</sup>Li, <sup>12</sup>C, <sup>40</sup>Ca, <sup>nat</sup>Pb) при энергиях фотонов от порога до 600 МэВ. Полученные прецизионные результаты позволили впервые осуществить модельно-независимый анализ взаимодействия пионов в конечном состоянии.

Выполнены измерения пучковой асимметрии в фоторождении пар нейтральных

пионов на свободных протонах и квазисвободных нуклонах, связанных в дейтроне, при энергиях циркулярно поляризованных гамма-квантов до 1.4 ГэВ. После кинематической реконструкции конечного состояния обнаружено хорошее согласие результатов для свободных и квазисвободных протонов. Вопреки ожиданиям измеренные асимметрии для реакций на протонах и дейтронах очень близки.

Измерена асимметрия  $\Sigma$  сечения реакции <sup>12</sup>С(у, pp) на линейно поляризованных фотонах от ускорителя МАМІ С в интервале энергий 200-450 МэВ. При малых недостающих энергиях, когда ожидается прямая эмиссия нуклонных пар, данные для  $\Sigma$  обнаруживают сильную угловую зависимость, подобную наблюдаемой в фоторасщеплении дейтрона.

Выполнены первые измерения спиральной зависимости полного инклюзивного сечения фотопоглощения на <sup>3</sup>Не и парциальных сечений для нескольких каналов в диапазоне энергий ускорителя МАМІ С от 150 до 500 МэВ. Полученные результаты дают информацию об интеграле правила сумм Герасимова-Дрелла-Хирна на <sup>3</sup>Не и нейтроне.

Выполнены измерения дифференциальных сечений и пучковой асимметрии реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  в припороговой области энергий с использованием линейно поляризованного пучка ускорителя МАМІ С (Майнц) и жидководородной мишени. Полученные данные позволили провести наиболее строгий до настоящего времени экспериментальный тест киральной теории возмущений.

Измерены полное и дифференциальное сечения реакции  $\gamma p \rightarrow K^0 \square^{\square\square}$  от порога до 1.45 ГэВ, а также поляризация гиперона отдачи. Выполнен анализ данных с использованием различных моделей.

В рамках программы реализации «полного опыта» выполнены измерения поляризационных наблюдаемых *T*, *F*, *E*, *G* в фоторождении  $\pi^0$ - и η-мезонов, а также пионных пар на протоне и дейтроне с использованием пучка циркулярно и линейно поляризованных фотонов с максимальной энергией 1.5 ГэВ от ускорителя МАМІ С и мишени с продольной и поперечной поляризацией протонов и дейтронов.

В рамках частично-дырочной дисперсионной оптической модели получены новые данные о свойствах гигантского дипольного резонанса, исследован радиационный захват быстрых нейтронов среднетяжелыми сферическими ядрами.

Совместно с МГУ выполнена серия экспериментов по исследованию фотоядерных реакций на пучке импульсного фемтосекундного лазера в МЛЦ МГУ. Исследована зависимость выхода и спектра электронов и фотонов от мощности импульса и его

длительности. Измерения проведены на новой установке, созданной на основе моделирования с учетом высокой множественности продуктов реакции.

На разрезном микротроне ФИАН с энергией ускоренных электронов ~55 МэВ проведено экспериментальное исследование возможностей наработки радиоизотопов для ядерной медицины. Для широко используемого в современной медицинской диагностике (особенно в онкологии) с применением позитронно-эмиссионной томографии радиоизотопа <sup>18</sup>F получены высокие уровни полной активности при наработке этого изотопа в содержащих натрий мишенях в результате фотоядерной реакции <sup>23</sup>Na(γ,αn)<sup>18</sup>F, а для NaOH- мишеней после применения радиохимического разделения получена и высокая удельная наработанная активность <sup>18</sup>F. Показаны также хорошие перспективы наработки <sup>67</sup>Cu для целей проведения радиоиммунотерапии. Измерен выход реакции <sup>19</sup>F(у,n) <sup>18</sup>F при энергии падающих электронов 55 МэВ с вольфрамовым радиатором толщиной 0,7 X<sub>0</sub>. Проведено сопоставление с опубликованными в литературе данными при энергии до ~28 МэВ. Проведено экспериментальное исследование выходов фотоядерных реакций на титановой мишени естественного изотопного состава, ведущих, в частности, к образованию радиоизотопа  $^{47}$ Sc( $T_{1/2} \cong 3.3492$  сут), представляющего большой интерес для радиоиммунотерании в ядерной медицине.

Измерены дозы ионизирующего излучения от имитаторов багажа авиапассажиров после их облучения в условиях, соответствующих облучению при прохождении досмотра в фотоядерном детекторе взрывчатых веществ. Показано, что ионизирующее излучение, обусловленное наведенной активностью, не представляет опасности ни для населения, ни для персонала аэропорта.

Для области энергий, характерной для возбуждения E1 гигантских резонансов в атомных ядрах, рассчитаны и проанализированы потоки и спектры квазимонохроматических фотонов от аннигиляции позитронов на лету с электронами мишеней с малыми толщиной и атомным номером в зависимости от энергий и углов (и их разбросов) для падающих на мишень позитронов, углов коллимирования для фотонов и толщин мишени. Подтверждена обоснованность нахождения вкладов, вызванных тормозными фотонами от позитронов, из данных с тормозными фотонами от электронов для тех же радиаторов. Дано сопоставление ядерных реакций под действием как тормозных фотонов, так и электронов или позитронов в смысле возможностей разделения вкладов изовекторных E1 и E2 гигантских резонансов. Предложен способ получения квазимонохроматических аннигиляционных фотонов при энергиях в области сотен МэВ на внутренней водородной мишени накопителя позитронов ВЭПП-3.

В рамках работы по созданию на пучке ускорителя ЛУЭ-8-5 интенсивного источника медленных нейтронов для применения в задачах нейтронно-активационного анализа разработано техническое задание на конструкцию фотонейтронного источника с замедлителем. Совместно с расчетно-теоретическим сектором ЛНИ проведены предварительные расчеты и проанализированы энергетические и угловые характеристики тормозного спектра фотонов из вольфрамовой мишени различных толщин, а также поток фотонейтронов из бериллиевой мишени.

### Заключение

Работы, предусмотренные очередным этапом, выполнены. Этот этап в основном был связан с проведением анализа набранных экспериментальных данных с целью поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели, дальнейшим участием в сервисных работах на установке CMS, разработкой новых методов реконструкции и анализа событий, а также с работами по модернизации адронного калориметра установки CMS, в частности, с деятельностью по модернизации фотоприемников.

За 2009-2012 гг. детектором CMS набрано более 20 фб-1 данных, по этим данным было открыто существование новой частицы со свойствами бозона Хиггса и массой около 125 ГэВ.

В результате проделанной в 2013 г. работы продолжены исследования потенциала и возможности обнаружения на установке CMS тяжелого нейтрино майорановского типа Ne и нового калибровочного бозона WR. 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 2013 г. представлены предварительные результаты поиска тяжелых нейтрино и правого WR-бозона, которые возникают в лево-правосимметричных расширениях Стандартной модели. Анализ основан на статистике протон-протонных столкновений при энергии 8 ТэВ, полученной в детекторе CMS на Большом адронном коллайдере при полной светимости 19,7 фб-1. Пока не получено доказательств того, что наблюдается избыток событий, превышающий их число, ожидаемое в Стандартной моделе. В результате предварительного анализа данных были получены ограничения на массу WR около 3000 ГэВ, при ограничении на массу тяжелого нейтрино 800 ГэВ. Новый нижний предел на массу правого W-бозона превышает аналогичный параметр, установленный на Тэватроне, более чем в 4 раза. Диапазон исключаемых масс WR получен для каждого из лептоных каналов по отдельности (т.е. для электронного и мюонного), и может быть расширен вплоть до 3,5 ТэВ в предположении, что массы соответствующих тяжелых нейтрино вырождены. Полученные результаты находятся в стадии подготовки к публикации.

В рамках изучения СР-нарушения и редких распадов В-мезонов в 2013 г. в эксперименте LHCb проведен анализ данных, полученных в 2011-2012 г.г. Среди полученных результатов можно выделить несколько наиболее интересных, в том числе более точное измерение вероятности распада  $B_s \rightarrow \mu\mu$ , измерения угла  $\gamma$  унитарного треугольника матрицы смешивания, обнаружение СР-нарущения в распадах  $B^{0}s$  мезона, поиски новой

физики в распадах  $B \rightarrow K^{(*)}\mu\mu$  и ряд других. Измерение угла  $\gamma$  унитарного треугольника матрицы смешивания Кабиббо-Кобаяши-Маскавы выполнено в комбинации распадов  $B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}$ . Анализ распределений распадов  $B^{\pm} \rightarrow DK^{\pm}$  позволил установить доверительный интервал угла  $\gamma \in [42.6,99.6]^\circ$  на 95% CL. Комбинация  $B^{\pm} \rightarrow DK^{\pm}$  и  $B^{\pm} \rightarrow D\pi^{\pm}$  распадов дает наилучший фит значению  $\gamma=72.6^\circ$ , доверительный интервал угла  $\gamma \in [40.2, 92.7]^\circ$  на 95% CL. Измерение вероятности редкого распада В<sup>0</sup><sub>s</sub> →µ+µ- важно для поиска возможных вкладов физики. Коллаборацией LHCb доложено наблюдение избытка событий, новой соответствующее вероятности распада  $B(B^{0}s \rightarrow \mu^{+}\mu^{-}) = (2.9 + 1.1 - 1.0) \times 10^{-9}$  (4.0 стандартных отклонений). Результат соответствует стандартной модели. Произведено первое в мире наблюдение СР-нарушения в распадах  $B^{0s}$  мезона  $A_{CP}(B^{0s} \rightarrow K^{-}\pi^{+})=+0.27\pm0.04\pm0.01$  на уровне >5σ. Среди наиболее интересных результатов следует отметить также наиболее точное измерение времени жизни  $\Lambda_b$  бариона:  $\tau(\Lambda_b)/\tau(B^0) = 0.976 \pm 0.012 \pm 0.006$ , которое подтверждает предсказания Heavy Quark Expansion теории. Также представляет интерес наблюдение распада  $B^+_c \rightarrow B^0_s \pi^+$  на уровне 5 $\sigma$  – первое наблюдение распада В-мезона в другой В-мезон, когда b-кварк играет роль спектаторного кварка. Также произведено измерение форм-фактора независимой переменной в распаде  $B^0 \rightarrow K^*(892)^0 \mu^+$ , показано локальное по инвариантой массе двух мюонов отклонение от предсказания стандартной модели, соответствующее вероятности <0.5% (3.7 $\sigma$ ).

Параллельно обработке данных в 2013 г. коллаборация LHCb проводила работы по подготовке модернизации установки для работы на повышенной энергии и светимости после 2018 г. Группой ИЯИ РАН, отвечающей за разработку фотодетекторов для волоконного треккера LHCb, в 2013 г. была продолжена разработка новых фотодиодов совместно с фирмой КЕТЕК (Мюнхен), было проведено изучение характеристик новых гейгеровских диодов фирмы HAMAMATSU.

В рамках модернизации установки ОКА закончено изготовление первых 24 (из 120), модернизированных модулей Годоскопического Детектора Адронов (ГДА).

В эксперименте NA62 проводились работы по анализу полученных ранее данных и по плановой модернизации элементов установки, в частности, по созданию новой охранной системы (SAC, IRC) и матричного годоскопа CHOD.

В рамках модернизации установки ОКА закончено изготовление первых 24 (из 120), модернизированных модулей Годоскопического Детектора Адронов (ГДА).

В эксперименте NA62 проводились работы по анализу полученных ранее данных и по плановой модернизации элементов установки, в частности, по созданию новой охранной системы (SAC, IRC) и матричного годоскопа CHOD.

В рамках исследования нарушения фундаментальных СР и Т симметрий в распадах каонов проводится анализ 5% данных эксперимента Е949 на предмет поиска тяжёлых стерильных нейтрино с массами 140-300 МэВ. Получен новый предел на смешивание тяжелых стерильных нейтрино с обычными нейтрино: ограничение на вероятность смешивания в области масс тяжелых нейтрино от 180 до 300 МэВ на 90%-м уровне достоверности составляет от  $2 \times 10^{-7}$  до  $2 \times 10^{-8}$  соответственно. Анализ 5% данных позволил отработать алгоритм поиска тяжелых нейтрино по пику в импульсном спектре продуктов распада каонов, а так алгоритм оценки фоновых событий. Начат анализ оставшихся данных (95%). Для эксперимента по прецизионному измерению вероятности распада положительного каона K+ ->  $\pi$ +vv ORKA (Фермилаб, США) изготовлены элементы детекторов на основе сцинтилляционных пластиков.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте Т2К с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведен анализа данных, набранных в 2010 первой половине 2013 года. В результате было получено убедительное доказательство осцилляций мюонных нейтрино в электронные – впервые в мире. В дальнем детекторе Супер-Камиокандэ было зарегистрировано 28 событий, идентифицированных как электроноподобные, появившиеся в результате взаимодействия в детекторе через заряженный ток электронных нейтрино с энергией от 100 до 1250 МэВ. Ожидаемое число таких событий, предполагая отсутствие осцилляций  $v_{\mu} \rightarrow v_e$  (для  $\theta_{13} = 0$ ) составило 4.92 ± 0.55 события. Вероятность того, что эти 28 событий могут быть получены в результате флуктуаций фона ничтожно мала и составляет величину меньше 10<sup>-12</sup> (статистическая значимость 7.3 $\sigma$ ). В случае  $\delta = 0$  (нет СР-нарушения) центральная величина  $\sin^2 2\theta_{13}$  имеет значение  $0.140^{+0.038}$ -0.032 для нормальной иерархии масс нейтрино (m<sub>3</sub> > m<sub>2</sub>) и  $0.170^{+0.045}$ -0.037 для инверсной иерархии ( $m_3 < m_2$ ). Ненулевое значение угла  $\theta_{13}$  позволяет решать задачу определения СР-нарушающей фазы б в лептонном секторе. Для этого необходимо точно измерить другой («атмосферный») угол смешивания  $\theta_{23}$ , который измеряется при изучении «исчезновения» мюонных нейтрино («дефицит»).

При исследовании «дефицита» мюонных нейтрино (данные из 1-3 сеансов,  $3 \times 10^{20}$  POT) в дальнем детекторе получено 58 мюоноподобных событий при ожидаемом числе событий 205±17 (без осцилляций). Анализ этих событий дает величину  $\Delta m_{32}^2$  (разность квадратов масс нейтрино) на уровне  $2.44 \times 10^{-3}$  M<sub>3</sub>B/c<sub>2</sub>, а угол смешивания согласуется с величиной sin<sup>2</sup>2 $\theta_{23}$ =1.00, что подтверждает данные других экспериментов (SK и MINOS).

В рамках подготовки будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой изготовлено свыше трех тысяч пластин сцинтиллятора на основе

полистирола методом экструзии (в компании Унипласт, г. Владимир). В 202-м корпусе ИЯИ РАН создан производственный участок для вырезания канавок в этих пластинах, а также для вклеивания оптического спектросмещающего волокна в данные канавки.

Проведены конструкторские работы по оптимизации дизайна оптического разъема для соединения оптоволокна, вклеенного в пластический сцинтиллятор, и фотодиода, служащего для сбора сцинтилляционного света. Произведено около двадцати тысяч этих разъемов (в компании Унипласт, г. Владимир).

Проводятся инженерно-конструкторские работы для начала массового производства сцинтилляционных счетчиков в 202-м корпусе ИЯИ РАН.

В мире работают 5 детекторов - LVD, SK, KAMLAND, ACД и БПСТ, способных регистрировать нейтринные всплески от гравитационных коллапсов, по взаимодействию нейтрино с ядрами р, С, О, Fe, Na, Cl. Совместная работа этих установок в режиме реального времени дает возможность с высокой достоверностью фиксировать коллапсы звездных ядер и задавать время и, возможно, направление для астрономических наблюдений.

Нейтринные телескопы ACД и LVD входят в сеть слежения за коллапсами звезд в нашей Галактике и Магеллановых облаках (SNEWS). С каждым годом детекторы LVD и ACД устанавливают новое, более сильное, значение предела частоты гравитационных коллапсов, в том числе скрытых. На сегодняшний день экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике составляет менее 1 события за 15.64 года на 90% уровне достоверности.

Регистрация различных типов нейтрино и их энергий, излучаемых при гравитационном коллапсе, позволит получить информацию о процессах образования и эволюции звезд, а также определить массу нейтрино и поставить ограничения на параметры смешивания разных типов нейтрино. Полученное с помощью АСД и LVD ограничение на частоту гравитационных коллапсов, в том числе скрытых, в Галактике и Магеллановых облаках является на сегодня самым жестким, а его достоверность - самой высокой.

В следующем, 2014 году, планируется:

1. Поддержание детекторов АСД и LVD в работоспособном состоянии замена вышедших из строя фотоумножителей

2. Изучение свойств нейтрино при условии вспышки Сверхновой в Галактике, либо установление предела на частоту коллапсов.

 Изучение потока атмосферных мюонов и нейтрино вблизи горизонта, изучение мюонных групп.

4. Изучение фона, создаваемого мюонами космических лучей и естественной радиоактивностью;

5. Изучение нейтронов и их характеристик, генерированных мюонами от мюонных нейтрино из ЦЕРНа.

НИР по программе проекта «Галлий-германиевый нейтринный телескоп» на 2013 год выполнены полностью. Программа проекта на 2014 год:

- Продолжение ежемесячных измерений потока солнечных нейтрино на ГГНТ и анализ получаемых данных..

- Завершение модернизации и пусконаладочных работ химико-технологического комплекса ГГНТ для проведения эксперимента с источником по исследованию осцилляционных свойств нейтрино на очень коротких расстояниях.

- Проведение регенерации и включение регенерированного металла в активную часть мишени телескопа.

НИР по программе проекта «Калибровочный эксперимент с искусственным источником нейтрино на основе радионуклида <sup>51</sup>Cr на двухзонной галлиевой мишени» на 2013 год выполнены полностью.

Основные задачи проекта на 2014 год:

- Разработка рабочих чертежей электролизера, изготовление и его технологические испытания.

- Технология изготовления хромовых мишеней.

 Разработка оптимального (с точки зрения технологических потерь) метода подготовки электрохимического хрома для проведения процесса газоизостатического прессования.

 Изготовление прототипов хромовых мишеней методом электроискровой резки заготовок, полученных методом газоизостатического прессования. Определение оптимальных режимов резки.

- Калориметр. Разработка компьютерной программы сбора и обработки данных калориметрической системы и управления имитатором источника с электрическим нагревом. Проведение калибровки калориметрической системы и построение калибровочного графика системы. Оценка возможной точности измерений активности источника на основе полученных данных. Исследование возможных систематических ошибок калориметрических измерений активности источника. Публикация.

- Извлечение германия. Исследование возможности использования в качестве конструкционного материала в системе извлечения германия поливинилиденфторида (PVDF). Планируется выполнить из PVDF технологическую обвязку барботера для извлечения германия из внутренней зоны двухзонного реактора.

- Измерение интенсивности источника по его γ излучению. Подготовка германиевого ППД и проведение измерений с γ-источниками разных энергий для корректировки вычисленных функций отклика ППД. Вычисление функций отклика для германиевого ППД в диапазоне внутреннего тормозного излучения 51Сг и ожидаемых примесей (до 2750 кэВ). Вычисление спектра внутреннего тормозного излучения 51Сг с точностью ~1%. Публикация.

- Дополнительные каналы системы регистрации распадов 71Ge ГГНТ. Завершение всех монтажных работ дополнительной счетной системы. Отладка работы дополнительной счетной системы в эксплуатацию. Публикация

Задачи проекта «Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз.Байкал», предусматривавшиеся планом НИР на 2013год, с чистой совестью можно считать выполненными, вкладывая в эти слова тот смысл, что на вполне удовлетворительном уровне были проведены заключительные этапы подготовки к экспедиции на оз. Байкал 2013 года, что сама экспедиция была проведена в оптимальные сроки, что были выполнены (пусть и с некоторыми шероховатостями, неизбежными при сильной зависимости темпов работ от погодных условий) практически все основные пункты утвержденной программы экспедиционных работ, что в 2013 году был развернут и введен в эксплуатацию на оз. Байкал в режиме круглогодичного набора данных кластер в составе трех полномасштабных гирлянд создаваемого нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба НТ1000, что по состоянию на 13 января 2014 года "живое время" работы установки составило 210 суток, что выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и выделен банк событий от атмосферных мюонов, что результаты проведенных испытаний продемонстрировали вполне удовлетворительный уровень найденных технических решений и позволили планировать развертывание в 2014 году кластера HT1000 в составе пяти полномасштабных гирлянд, рассчитанных на подключение 24-х регистрирующих модулей каждая, что в настоящее время подготовка аппаратуры этого кластера и ее испытания идут по графику и близки к завершению (работы планируется завершить до конца января 2014 года), что доведена до рабочего состояния высоко информативная акустическая система позиционирования элементов кластера, что выполнена широкая программа исследования глубинных вод озера, что получены новые результаты в задаче исследования природы частиц темной материи.

Заключим этот отчет следующим образом. К 2011 году уровень знаний о диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий (10<sup>13</sup> – 10<sup>18</sup>) эВ, о локальных источниках нейтрино с энергией свыше 10 ГэВ, о природном потоке быстрых магнитных монополей и о проявлениях массивных частиц темной материи был сформирован, главным образом, результатами экспериментальных исследований на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе HT200, на детекторе AMANDA на Южном полюсе и (в последние 2009, 2010

годы) на детекторе ANTARES в Средиземном море. Ввод в строй в 2011 году детектора IceCube на Южном полюсе позволил, в ряде задач, поднять чувствительность экспериментальных исследований еще на один-два порядка величины. На повестке дня стоит задача создания в Северном полушарии детектора(ов) способного(ых) вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube. Дальше всех в решении этой задачи продвинулась сейчас Байкальская коллаборация, где завершается создание автономного кластера глубоководных гирлянд регистрирующих модулей - базового элемента детектора кубокилометрового масштаба HT1000 (BAIKAL-GVD). Дальнейшее сохранение полноправных позиций Байкальского детектора в компании мировых лидеров будет уже зависеть от темпов реализации этого проекта.

По теме «Первичные чёрные дыры в ранней Вселенной и космологические следствия их рождения» в работах 2013 года был исследован процесс рождения ПЧД в космологических сценариях, основанных на курватонной и аксионной моделях инфляции, и были получены ограничения на параметры этих моделей. По теме «Фотоядерные взаимодействия лептонов при сверхвысоких энергиях» в 2013 году были опубликованы работы, в которых было показано, что двухкомпонентная модель глубоко-неупругого рассеяния, предложенная авторами ранее, хорошо описывает структурные функции нуклона, в области кинематических параметров, важной для приложений в физике космических лучей сверхвысоких энергий.

В 2013 г. в ходе выполнения задания НИР по разработке новых (альтернативных) методов регистрации космических нейтрино:

- создан лабораторный образец компактной лазерной установки, предназначенной для проведения глубоководных измерений термоупругих свойств воды (в частности коэффициента Грюнайзена), которые предусмотрены Договором о научно-техническом сотрудничестве между ИЯИ РАН и Институтом физики частиц и ядерной физики (научный центр «Демокритус», Афины) в создании глубоководного нейтринного телескопа в Средиземном море;

- разработан алгоритм нового (быстрого) метода расчета каскадов, производимых космическими нейтрино с энергиями вплоть 10<sup>20</sup> эВ во льду (воде) и в лунном грунте.

В части разработки детекторов элементарных частиц с использованием новейших лавинных фотодиодов:

- разработан новый метод для изготовления компактных МЛФД - матриц с минимальной мертвой зоной (коллаборация Дубна - МЛФД). Совместно с ЛНИ изготовлена новая конструкции прототипа двух координатного позиционно- чувствительного детектора тепловых и холодных нейтронов на основе лавинных фотодиодов;

- в течение 2013 года были продолжены работы по отработке технологии получения нейтронного полистирольного сцинтиллятора.

В отчёте приведены новые результаты, полученные в 2013 году в лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН по физике электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер. Особенностью современного этапа является получение новых данных по поляризационным эффектам и спиновой структуре нуклонов, а также развитие новых методов исследований. Все приведенные в отчете результаты являются новыми и соответствуют мировому уровню. В разделе 1:

1 'Mean current in Ps/Spd MultiAnode PhotoMultipliers Tubes', LHCb 2003-003 CALO

2 LHCb Collaboration, 'Performance of the LHCb Calorimeters', готовится к печати

В разделе 2:

1 N. Antoniou et al. [NA61/SHINE Collaboration], CERN-SPSC-2006-034.

2 C. Alt et al. [NA49 Collaboration], Phys. Rev. C 77, 024903 (2008) [arXiv:0710.0118 [nucl-ex]].

3 M. Gazdzicki, M. Gorenstein, P. Seyboth, Acta Phys. Polon. B42, 307 (2011) [arXiv:1006.1765 [hep-ph]].

4 L. Kumar [ for the STAR Collaboration ], [arXiv:1106.6071 [nucl-ex]],B. Mohanty [ STAR Collaboration ], [arXiv:1106.5902 [nucl-ex]].

5 J. Schukraft et al. [ for the ALICE Collaboration ], [arXiv:1106.5620 [hep-ex]],

A. Toia et al. [ for the ALICE Collaboration ], [arXiv:1107.1973 [nucl-ex]].

6 M. Gazdzicki, NA61/NA49 Collaboration meeting, 27.05.2013.

https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=1&resId=1&materialId=slides&confId=246235

7 N. Abgrall et al. PhysRev C.85.035210, 2012

8 N. Abgrall et al., Nucl. Instrum. Meth. A701 (2013) 99-114

9 A.Ivashkin, et al., http://arxiv.org/abs/arXiv:1205.4864.

10 M.Golubeva, et al., Phys.Atom.Nucl. 75 (2012) 673-675.

11 S.Uozumi et al., NIM A487 (2002) 389-429.

12 Y.Fujii, NIM A453 (2000) 237-241.

13 The ALICE collaboration. "ALICE: Physics Performance Report, Volume II" J. Phys. G32, 1295-2040 (Section: 6.5.15 - Long-range correlations, p.1749-1751), (2006).

14 M.A.Braun and C.Pajares, Phys. Lett. B287 (1992) 154; Nucl. Phys., B390 (1993) 542,

549

15 N.S.Amelin, M.A.Braun and C.Pajares, Phys.Lett. B306 (1993) 312; Z.Phys. C63 (1994) 507

16 N.Armesto, M.A.Braun, E.G.Ferreiro and C.Pajares, Phys. Rev. Lett., 77, 3736, 1996

17 M.A.Braun, C.Pajares and J.Ranft, Int. J. of Mod. Phys. A, 14, 2689, 1999; hepph/9707363, M.A.Braun and C.Pajares, Eur. Phys. J. C, 16, 349, 2000.

18 M.Nardi and H.Satz, Phys. Lett. B, 442, 14, 1998.

19 H.Satz, Nucl. Phys. A, 661, 104, 2000.

20 M.A Braun. et al.Phys.Rev. C65 (2002) 024907 hep-ph/0105263

21 C. Alt et al. (NA49 Collab.) and G. A. Feofilov et al. (SPbSU group), in Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics, Ed. by A. N. Sissakian, V. V. Burov, and A. I. Malakhov (JINR, Dubna, 2005), Vol. 1, p. 222; V. V. Vechernin, R. S. Kolevatov, Phys. Atom. Nucl. 70, 1809-1818 (2007)

22 S. Pulawski, NA61 beams, targets and triggers, report at NA61 meeting, 12.12.12, https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=4&resId=0&materialId=slides&confId=221663

23 Emil Aleksander Kaptur, Критерий отбора событий,

https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId = 3&resId = 0&materialId = slides&confId = 264777

24 M. Unger, Introduction to Shoe and analysis in Shine, report at NA61 Collaboration Meeting, 28.05.13,

https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=60&resId=0&materialId=slides&confId=246235

25 The ALICE Collaboration, "Upgrade of the Inner Tracking System Conceptual Design Report", CERN-LHCC-2012-013 (LHCC-P-005) September 11, 2012

26 С. Н. Иголкин, Г.А. Феофилов, В.М. Добулевич, О.И. Столяров, Патент РФ, 2396168, кл.В29С53/56, «Способ изготовления углекомпозитных изделий сложной формы», Опубликовано 10.08.2010, Бюл.22.

27 С.Н. Иголкин, Г.А. Феофилов, В.М. Добулевич, О.И. Столяров, Патент РФ, 79268, Свидетельство на полезную модель, «Устройство для изготовления углекомпозитных изделий сложной формы», Опубликовано 27.12.2008 Кл. *B29C* 53/56, http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll.

28 G.Feofilov, S.Igolkin (St.Petersburg State University), Proposals for Na61 Si-tracker for NA61, report at NA61 meeting, 08.02.2013.

29 The NA61/SHINE Collaboration, Status report to the proposal SPSC-P-330 - Report from the NA61/SHINE experiment at the CERN SPS, CERN-SPSC-2013-028 / SPSC-SR-124, 15/10/2013, http://cds.cern.ch/record/1610635?ln=en

В разделе 6.2:

B.T. Cleveland, H. Ejiri, S.R. Elliott, V.N. Gavrin, V.V. Gorbachev, D.S. Gorbunov, T.V. Ibragimova, V.A. Matveev, J.S. Nico, R.G.H. Robertson, E.P. Veretenkin, J.F. Wilkerson, Very Short Baseline ve  $\rightarrow$  vx Oscillation Search with a Dual Metallic Ga Target at Baksan and 51Cr neutrino Source, Light Sterile Neutrinos: A White Paper, arXiv:1204.5379v1[hep-ph], 170-175.

# 9 Список научных публикаций

9.1 Публикации к разделу 1

1 Красников Н.В., Матвеев В.А. Поиск правого WR-бозона и тяжелого нейтрино // Письма в ЖЭТФ, 98, 53-56, 2013

2 CMS Collaboration. Test beam evaluation of CMS ECAL Endcap Supercrystals constracted from hadron-damaged crystals // CMS Detector Note – CMS DN 2013/007, CERN, 2013

3 Битюков С.И., Красников Н.В. Применение статистических методов для поиска новой физики на Большом адронном коллайдере // М., КРАСАНД, 2013

4 Bityukov S., Krasnikov N., Nikitenko A., Smirnova V. On the distinguishability of histograms // ePrint arXiv: 1309.4649 [physics.data-an], Eur.Phys.J.Plus, 128, 123, 2013

5 Bitioukov S., Krasnikov N. Modified frequentist determination of confidence intervals for Poisson distribution // ePrint arXiv:1209.6545 [physics.data-an], Phys.Part.Nucl. 44, 229-233 2013

6 Kirsanov M. Two-dimensional analysis against one-dimensional one in the search for WR and heavy neutrino // 16th CMS RDMS Conference, Nor-Amberd, Armenia, 3-5 September 2013

7 Tlisov D. HCAL remote monitoring tools // 16th CMS RDMS Conference, Nor-Amberd, Armenia, 3-5 September 2013

8 Krasnikov N. Some aspects of statistics at the LHC. II Russian-Spanish Congress Particle and Nuclear Physics at all Scales and Cosmology, Saint-Petersburg, 1-4 October 2013

9 Bityukov S. A method for statistical comparison of histograms // International Conference "Mathematical Modeling and Computational Physics", Dubna, Russia, 8 July 2013

10 Karneyeu A. DoC Report // ECAL PFG and Offline Working Meeting, CERN, Switzerland, May 12, 2013

11 Andreev Yu. Muon and jet signals using the SiPMs // HCAL Installation, Integration & Comissioning Meeting, CERN, Switzerland, October 14, 2013

12 Karneyeu A. Upgrade of software package to test SiPM cards // HCAL Integration & Upgrade Meeting, CERN, Switzerland, June 15, 2013

13 Toropin A. Study of energy reconstruction algorithms in Hcal (HBHE) // HCAL Noice WG Meeting, CERN, Switzerland, October 15, 2013

14 Toropin A. Negative energy filter in Hcal (HBHE) // HCAL Noice WG Meeting, CERN, Switzerland, November 26, 2013

9.1b Публикации к разделу 1b

1 Search for CP violation in the decay D+  $\rightarrow \pi$ - $\pi$ + $\pi$ + / LHCb collaboration // Phys. Lett. B728 (2014) 585-595.

2 Measurement of CP violation in the phase space of  $B \pm \rightarrow K + K - \pi \pm$  and  $B \pm \rightarrow \pi + \pi - \pi \pm$  $\pi \pm$ 

decays / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 112, 011801 (2014).

3 Search for the doubly charmed baryon Ecc+ / LHCb collaboration // JHEP 1312
(2013) 090.

4 Search for the decay  $D0 \rightarrow \pi + \pi - \mu + \mu - / LHCb$  collaboration // Phys. Lett. B728 (2014) 234.

5 Measurement of D0-D0 mixing parameters and search for CP violation using  $D0 \rightarrow K+\pi$ - decays / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 111, 251801 (2013)

6 Measurement of the charge asymmetry in  $B \pm \rightarrow \phi K \pm$  and search for  $B \pm \rightarrow \phi \pi \pm$ decays / LHCb collaboration // Phys. Lett. B 728 (2014) 85.

7 Observation of the decay Bc  $\rightarrow J/\psi K+K-\pi+/LHCb$  collaboration // JHEP 11 (2013) 094.

8 First observation of  $B0 \rightarrow J/\psi K+K-$  and search for  $B0 \rightarrow J/\psi \phi$  decays / LHCb collaboration // Phys. Rev. D 88, 072005 (2013).

9 Observation of the decay  $Bc \rightarrow Bs0\pi + / LHCb$  collaboration // Phys.Rev.Lett. 111, 181801 (2013).

10 Observation of the decay Bs0  $\rightarrow$  D0 $\phi$  / LHCb collaboration // Phys. Lett. B 727 (2013) 403.

11 Model-independent search for CP violation in D0  $\rightarrow$  K-K+ $\pi$ + $\pi$ - and D0  $\rightarrow$   $\pi$ - $\pi$ + $\pi$ + $\pi$ - decays / LHCb collaboration // Phys. Lett. B 726 (2013) 623.

12 Measurement of form-factor independent observables in the decay  $B0 \rightarrow K^*0\mu+\mu$ - / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 111, 191801 (2013).

13 First measurement of time-dependent CP violation in Bs0  $\rightarrow$  K+K- decays / LHCb collaboration // JHEP 10 (2013) 183.

14 Measurement of the CP asymmetry in  $B^+ \rightarrow K^+\mu^+\mu^-$  decays / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 111, 151801 (2013)

15 Observation of B0s-B0s mixing and measurement of mixing frequencies using semileptonic B decays / LHCb collaboration // Eur.Phys.Jour. C73 (2013) 2655

16 Branching fraction and CP asymmetry of the decays  $B^+ \rightarrow KS0\pi^+$  and  $B^+ \rightarrow KS0K^+$  / LHCb collaboration // Phys. Lett. B 726 (2013) 646

17 Measurement of the flavour-specific CP-violating asymmetry  $a_{sl}^{s}$  in  $B_{s}^{0}$  decays / LHCb collaboration // Phys. Lett. B 728 (2014) 607.

18 First evidence for the two-body charmless baryonic decay  $B0 \rightarrow pp / LHCb$  collaboration // JHEP 10 (2013) 005.

19 Study of Bs0  $\rightarrow$  KSh+h'- decays with first observation of Bs0  $\rightarrow$  KSK+K- and Bs0  $\rightarrow$  KS $\pi$ + $\pi$ - / LHCb collaboration // JHEP 10 (2013) 143.

20 Observation of a resonance in  $B+ \rightarrow K+\mu+\mu$ - decays at low recoil / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 111, 112003 (2013).

21 Measurement of J/ $\psi$  polarization in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV / LHCb collaboration // Eur.Phys.J.C73 (2013) 2631.

22 Studies of the decays  $B+\rightarrow$  pph+ and observation of  $B+\rightarrow \Lambda(1520)p$  / LHCb collaboration // Phys. Rev. D 88, 052015 (2013).

23 Measurement of the Bs0  $\rightarrow \mu + \mu$ - branching fraction and search for B0  $\rightarrow \mu + \mu$ decays at the LHCb experiment / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 111, 101805 (2013).

24 Search for the lepton-flavour violating decays  $Bs0 \rightarrow e\pm\mu\mp$  and  $B0 \rightarrow e\pm\mu\mp$  / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 111, 141801 (2013).

25 Study of DJ meson decays to D+ $\pi$ -, D0 $\pi$ + and D\*+ $\pi$ - final states in pp collision / LHCb collaboration // JHEP 09 (2013) 145.

26 Measurement of the relative rate of prompt  $\chi c0$ ,  $\chi c1$  and  $\chi c2$  production at  $\sqrt{s}=7$  TeV collision / LHCb collaboration //JHEP 10 (2013) 115.

27 Measurement of the polarization amplitudes in  $B0 \rightarrow J/\psi K^*(892)0$  decays collision / LHCb collaboration // Phys. Rev. D88 052002.

28 Precision measurement of the Λb baryon lifetime collision / LHCb collaboration // Phys.Rev.Lett. 111 103003 (2013).

29 First observation of the decay  $Bc \rightarrow J/\psi K+$  collision / LHCb collaboration // JHEP 09 (2013) 075.

30 Searches for Bs0  $\rightarrow$  J/ $\psi$ pp and B+  $\rightarrow$  J/ $\psi$ pp $\pi$  decays / LHCb collaboration // JHEP 09 (2013) 006.

31 Measurement of B meson production cross-sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV / LHCb collaboration // JHEP 08 (2013) 117.

32 Measurement of the differential branching fraction of the decay  $\Lambda b0 \rightarrow \Lambda \mu + \mu$ - / LHCb collaboration // Phys. Lett. B 725 (2013) 25.

33 First observation of the decay Bs0  $\rightarrow \phi K^{*0}$  / LHCb collaboration // JHEP 11 (2013) 092.

34 Measurement of CP violation in the phase space of  $B \pm \rightarrow K \pm \pi + \pi$ - and  $B \pm \rightarrow K \pm K + K$ - decays / LHCb collaboration // Phys.Rev.Lett. 111 101801.

35 Observation of Bs0  $\rightarrow \chi c1\phi$  decay and study of B0 $\rightarrow \chi c1,2K*0$  decays / LHCb collaboration // Nucl. Phys. B 874 (2013) 663.

36 Search for the rare decay  $D0 \rightarrow \mu + \mu$ - / LHCb collaboration // Phys. Lett. B 725 (2013), 15.

37 Differential branching fraction and angular analysis of the decay Bs0  $\rightarrow \varphi\mu+\mu+$  / LHCb collaboration //JHEP 1307 (2013) 084.

38 Measurement of the CKM angle  $\gamma$  from a combination of B  $\rightarrow$  Dh analyses / LHCb collaboration // Phys. Lett. B 726 (2013), 151.

39 Precision measurement of D meson mass differences / LHCb collaboration // JHEP06 (2013) 065

40 Production of J/ $\psi$  and Y mesons in pp collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV / LHCb collaboration // JHEP 06 (2013) 64.

41 Search for Ds+  $\rightarrow \pi$ +µ+µ- and Ds+  $\rightarrow \pi$ -µ+µ+ decays / LHCb collaboration // Phys. Lett. B 724 (2013) 203

42 Differential branching fraction and angular analysis of the decay  $B0 \rightarrow K^*0\mu+\mu-/LHCb$  collaboration // JHEP 08 (2013) 131

43 Measurement of the branching fractions of the decays  $Bs0 \rightarrow D0 \text{ K-}\pi\text{+} \text{ and } B0 \rightarrow D0$ K+  $\pi\text{-}$  / LHCb collaboration // Phys. Rev. D 87, 112009 (2013).

44 First observation of CP violation in the decays of Bs0 mesons / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 221601.

45 Precision measurement of the Bs0-Bs0 oscillation frequency with the decay  $Bs0 \rightarrow Ds-\pi + / LHCb$  collaboration // New J. Phys. 15 053021.

46 Observation of Bc  $\rightarrow J/\psi$ Ds+ and Bc  $\rightarrow J/\psi$ Ds\*+ / LHCb collaboration //Phys.Rev.D87, 11( 2013) 112012.

47 Searches for violation of lepton flavour and baryon number in tau lepton decays at LHCb / LHCb collaboration // Phys. Lett. B. 724 (2013).

48 Measurement of the effective Bs0  $\rightarrow$  J/ $\psi$ KS Lifetime / LHCb collaboration // Nucl. Phys. B 873 (2013) 275.

49 Measurement of the B0  $\rightarrow$  K\*0e+e- branching fraction at low dilepton mass / LHCb collaboration // JHEP 05 (2013) 159.

50 Measurement of CP violation and the Bs0 meson decay width difference with Bs0  $\rightarrow$  J/ $\psi$ K+K- and Bs0  $\rightarrow$  J/ $\psi$ \pi+ $\pi$ - decays / LHCb collaboration // Phys. Rev. D 87, 112010 (2013).

51 Limits on neutral Higgs boson production in the forward region in pp collisions at  $\sqrt{s}$ =7 TeV / LHCb collaboration // JHEP 05 (2013) 132

52 Measurements of the branching fractions of  $B+ \rightarrow ppK+ decays / LHCb$  collaboration // EPJC 73 (2013) 2462.

53 First measurement of the CP-violating phase in Bs0  $\rightarrow \phi \phi$  decays / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 110, 241802 (2013).

54 Study of  $B0 \rightarrow D^*-\pi+\pi-\pi+$  and  $B0 \rightarrow D^*-K+\pi-\pi+$  decays / LHCb collaboration // Phys. Rev. D 87, 092001 (2013).

55 Search for CP violation in D+  $\rightarrow \phi\pi$ + and Ds+  $\rightarrow KS\pi$ + decays / LHCb collaboration // JHEP 06 (2013) 112.

56 Observation of the suppressed ADS modes  $B \pm \rightarrow [\pi \pm K \mp \pi + \pi -]DK \pm$  and  $B \pm \rightarrow [\pi \pm K \mp \pi + \pi -]D \pi \pm /$  LHCb collaboration // Phys Lett B 723 (2013) 44.

57 Search for direct CP violation in D0  $\rightarrow$  h-h+ modes using semileptonic B decays / LHCb collaboration // Physics Letters B 723 (2013), pp. 33-43.

58 Observation of the decay Bc  $\rightarrow \psi(2S)\pi$ + / LHCb collaboration // Phys. Rev. D 87, 071103(R) (2013).

59 Search for rare Bs0  $\rightarrow \mu + \mu - \mu + \mu + \mu + decays / LHCb$  collaboration // Phys. Rev. Lett. 110 211801 (2013).

60 Search for the decay Bs0  $\rightarrow$  D\*± $\pi$ ± / LHCb collaboration // Phys. Rev. D 87, 071101(R) (2013).

61 Observation of the decays Bs0  $\rightarrow \psi(2S)\eta$  and Bs0  $\rightarrow \psi(2S)\pi + \pi - /$  LHCb collaboration // Nucl. Phys. B 871 (2013) 403

62 Determination of the X(3872) meson quantum numbers / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 110, 222001 (2013)

63 First observations of Bs0 $\rightarrow$  D+D-, Ds+D- and D0D0 decays / LHCb collaboration // Phys.Rev.D.87 092007 (2013).

64 Measurements of the  $\Lambda b \rightarrow J/\psi \Lambda$  decay amplitudes and the  $\Lambda b$  polarisation in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV / LHCb collaboration // PLB 724 (2013) 27

65 Prompt charm production in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV / LHCb collaboration // Nucl. Phys. B. 871 (2103) 1.

66 Measurement of the Ab0,  $\pm$ b- and  $\Omega$ b- baryon masses / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 110, 182001 (2013).

67 Exclusive J/ $\psi$  and  $\psi$ (2S) production in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV / LHCb collaboration // J. Phys. G 40 045001

68 Analysis of the resonant components in B0 $\rightarrow$ J/ $\psi\pi$ + $\pi$ - / LHCb collaboration // Phys. Rev. D. 87 052001 (2013). 69 Measurement of the fragmentation fraction ratio fs/fd and its dependence on B meson kinematics / LHCb collaboration // JHEP 04 (2013) 001.

70 Measurement of CP observables in B0  $\rightarrow$  DK\*0 with D  $\rightarrow$  K+K- / LHCb collaboration // JHEP 03 (2013) 067.

71 Measurement of the forward energy flow in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV- / LHCb collaboration // EPJC 73 (2013) 2421.

72 Measurement of the cross-section for  $Z \rightarrow e+e-$  production in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$ TeV- / LHCb collaboration // JHEP02 (2013) 106.

73 Measurement of J/ $\psi$  production in pp collisions at  $\sqrt{s}=2.76$  TeV- / LHCb collaboration // JHEP 1302 (2013) 041.

74 Measurement of the time-dependent CP asymmetry in B0  $\rightarrow$  J/ $\psi$ KS decays- / LHCb collaboration // Phys. Lett. B721 (2013) 24.

First observation of the decay  $Bs2^*(5840)0 \rightarrow B^*+K$ - and studies of excited Bs mesons- / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 110, 151803 (2013).

First evidence for the decay Bs0 $\rightarrow$  µ+µ-- / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 110, 021801 (2013)

First observation of the decays Bs0 $\rightarrow$  Ds+K- $\pi$ + $\pi$ - and Bs0 $\rightarrow$  Ds1(2536)+ $\pi$ -- / LHCb collaboration // Phys. Rev. D 86, 112005.

78 Observation of D0- D0 oscillations- / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 110, 101802 (2013).

79 Measurement of the B0- B0 oscillation frequency  $\Delta$ md with the decays B0 $\rightarrow$  D-  $\pi$ + and B0 $\rightarrow$  J/ $\psi$ K\*0- / LHCb collaboration // Phys. Lett. B719 (2013) 318

80 A study of the Z production cross-section in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV using tau final states- / LHCb collaboration // JHEP 2013 1, 111.

81 Measurement of the CP asymmetry in  $B^+ \rightarrow K^*0\mu^+\mu^-$  decays- / LHCb collaboration // Phys. Rev. Lett. 110, 031801 (2013)

82 Measurement of the D± production asymmetry in 7 TeV pp collisions- / LHCb collaboration // Phys. Lett. B 718 (2013) 902-907.

83 Evidence for the decay B0→ J/ψω and measurement of the relative branching fractions of Bs0 meson decays to J/ψη and J/ψη'- / LHCb collaboration // Nucl. Phys. B 867 (2013) 547.

84 First evidence for the annihilation decay mode  $B+\rightarrow Ds+\phi-$  / LHCb collaboration // JHEP 1301 (2013) 43.

85 Differential branching fraction and angular analysis of the decay B+ $\rightarrow$ K+ $\mu$ + $\mu$ -- / LHCb collaboration // JHEP 02 (2013) 105

86 Search for the rare decay KS  $\rightarrow \mu + \mu - /$  LHCb collaboration // JHEP 1301 (2013)090.

87 Implications of LHCb measurements and future prospects- / LHCb collaboration //
 EPJ C 73 (2013) 2373.

# 9.2 Публикации к разделу 2

1 K 0 S and A production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s}=2.76$  TeV ALICE Collaboration ( Abelev *et al.*). 2013. Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 222301

2 <u>Long-range angular correlations of pi, K and p in p--Pb collisions at sqrt(s\_NN) =</u> <u>5.02 TeV ALICE</u> Collaboration (Betty Bezverkhny Abelev *et al.*). Jul 11, 2013. 14 pp. Phys.Lett. B726 (2013) 164-177

3 <u>Multiplicity dependence of two-particle azimuthal correlations in pp collisions at the</u> <u>LHC ALICE</u> Collaboration (<u>Betty Abelev</u> et al.). Jul 4, 2013. 42 pp. JHEP 1309 (2013) 049

4 <u>D meson elliptic flow in non-central Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV <u>ALICE</u> Collaboration (<u>B. Abelev et al.</u>). May 13, 2013. 17 pp. Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 102301</u>

5 <u>Mid-rapidity anti-baryon to baryon ratios in pp collisions at s</u>  $\sqrt{=0.9, 2.76 \text{ and } 7}$ <u>TeV measured by ALICE</u> <u>ALICE</u> Collaboration (<u>E. Abbas\_et al.</u>). May 7, 2013. 33 pp. Eur.Phys.J. C73 (2013) 2496

6 <u>Centrality dependence of the pseudorapidity density distribution for charged particles</u> <u>in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV ALICE</u> Collaboration (Ehab Abbas <u>et al.</u>). Apr 1, 2013. 13 pp. Phys.Lett. B726 (2013) 610-622

7 Centrality dependence of  $\pi$  K, p production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV ALICE Collaboration (Betty Abelev et al.). Mar 4, 2013. 42 pp. Phys.Rev. C88 (2013) 044910

8 Centrality determination of Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV with ALICE ALICE Collaboration (Betty Abelev et al.). Jan 18, 2013. 37 pp. Phys.Rev. C88 (2013) 044909

9 Charge correlations using the balance function in Pb-Pb collisions at s  $\sqrt{s} = 2.76$ TeV ALICE Collaboration (Betty Abelev et al.). Jan 2013. 37 pp. Phys.Lett. B723 (2013) 267-279

10 Charged kaon femtoscopic correlations in pp collisions at s  $\sqrt{-7}$  TeV ALICE Collaboration (B. Abelev et al.). 19 pp. Published in Phys.Rev. D87 (2013) 052016

11Transverse Momentum Distribution and Nuclear Modification Factor of ChargedParticles in p -Pb Collisions at  $\sqrt{s} = 5.02$  TeV ALICE Collaboration (Betty Abelev et al.).Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 082302

12Pseudorapidity density of charged particles p -Pb collisions at  $\sqrt{s} = 5.02 \text{ TeV}$ ALICECollaboration (Betty Abelev et al.).16 pp. PhyPhys.Rev.Lett. 110 (2013) 032301

13 Coherent J/ $\psi$  photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV AL ALICE Collaboration (Betty Abelev et al.). 19 pp. PhyPhys.Lett. B718 (2013) 1273-1283 14 <u>Measurement of inelastic, single- and double-diffraction cross sections in proton-</u> proton collisions at the LHC with ALICE <u>ALICE</u> Collaboration (<u>Betty Abelev</u> et al.). 27 pp. Eur.Phys.J. C73 (2013) 2456

15 Emission of forward neutrons by 158A GeV indium nuclei in collisions with Al, Cu, Sn an Pb E.V. Karpechev, I.A. Pshenichnov, T.L. Karavicheva, A.B. Kurepin, M.B. Golubeva, F.F. Guber, A.I. Maevskaia, A.I. Reshetin, V.V. Tiflov, N.S. Topilskaya (Moscow, INR) *et al.*. Nucl.Phys. AAA921 (2014) 60-84, 14 pp.

16Net-ChargeFluctuationsinPb-Pbcollisionsat \surds\_NN = 2.76TeVALICECollaboration (Betty Abelev et al.).10 pp.Phys.Rev.Lett.110 (2013) 152301

17 <u>Beam test of FARICH prototype with Digital Photon Counter A.Yu.</u> <u>Barnyakov (Novosibirsk, IYF), M.Yu. Barnyakov (Novosibirsk, IYF & Novosibirsk State Tech.</u> <u>U.), V.S. Bobrovnikov, A.R. Buzykaev (Novosibirsk, IYF), A.F. Danilyuk (Inst. Thermophys.,</u> <u>Novosibirsk), C. Degenhardt, R. Dorscheid (Unlisted, DE), D.A. Finogeev (Moscow, INR), T.</u> <u>Frach (Unlisted, DE), V.V. Gulevich (Novosibirsk, IYF) *et al.*</u> 2013. 5 pp. Published in Nucl.Instrum.Meth. A732 (2013) 352-356

18 <u>Energy Dependence of the Transverse Momentum Distributions of Charged Particles</u> in pp Collisions Measured by ALICE ALICE Collaboration (Betty Bezverkhny Abelev (LLNL, Livermore) *et al.*). Jul 3, 2013. 18 pp. Published in Eur.Phys.J. C73 (2013) 2662

19 <u>Charmonium and e+e- pair photoproduction at mid-rapidity in ultra-peripheral Pb-</u> <u>Pb collisions at *sNN*----- $\sqrt{=2.76}$  TeV ALICE Collaboration (E. Abbas (Cairo, Acad. Sci. Res. Tech.) *et al.*). May 7, 2013. 26 pp. Published in Eur.Phys.J. C73 (2013) 2617</u>

20 Long-range angular correlations on the near and away side in *p*-Pb collisions at *sNN*---- $\sqrt{=5.02 \text{ TeV}}$  ALICE Collaboration (Betty Abelev (LLNL, Livermore) *et al.*). Dec 2012. 22 pp. Published in Phys.Lett. B719 (2013) 29-41

21 <u>Centrality Dependence of Charged Particle Production at Large Transverse</u> <u>Momentum in Pb--Pb Collisions at  $sNN---\sqrt{=2.76 \text{ TeV}}$  ALICE</u> Collaboration (<u>Betty</u> <u>Abelev (LLNL, Livermore) *et al.*</u>). Aug 2012. 18 pp. Published in Phys.Lett. B720 (2013) 52-62

22 <u>Measurement of electrons from beauty hadron decays in *pp* collisions at  $s\sqrt{=7 \text{ TeV}}$  ALICE Collaboration (Betty Abelev (LLNL, Livermore) *et al.*). Oct 2012. 15 pp. Published in Phys.Lett. B721 (2013) 13-23</u>

23 <u>Directed flow of charged particles at mid-rapidity relative to the spectator plane in</u> <u>Pb-Pb collisions at sqrt{s\_NN}=2.76 TeV ALICE</u> Collaboration (<u>Betty Abelev</u> (<u>LLNL</u>, <u>Livermore</u>) *et al.*). Jun 18, 2013. 18 pp. Published in Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 232302 24 <u>Charge separation relative to the reaction plane in Pb-Pb collisions</u> <u>at sNN----V=2.76 TeV ALICE</u> Collaboration (<u>Betty Abelev</u> (<u>LLNL</u>, <u>Livermore</u>) *et al.*). Jul 2012. Published in Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 012301

25 <u>Anisotropic flow of charged hadrons, pions and (anti-)protons measured at high</u> <u>transverse momentum in Pb-Pb collisions at *sNN*----V=2.76 TeV ALICE Collaboration (Betty <u>Abelev (LLNL, Livermore) *et al.*</u>). May 2012. 16 pp. Published in Phys.Lett. B719 (2013) 18-28</u>

26 J/psi Elliptic Flow in Pb-Pb Collisions at vsNN=2.76 TeV E.Abbas, ...,F. Guber, O. Karavichev, T. Karavicheva, E. Karpechev, A. Kurepin, A.N. Kurepin, A. Maevskaya, I. Pshenichnov, A. Reshetin et al., ALICE Collaboration, Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 162301

27 <u>Nuclear-nuclear collision centrality determination by the spectators calorimeter for</u> the MPD setup at the NICA facility M.B. Golubeva, F.F. Guber, A.P. Ivashkin (Moscow, INR), A.Yu. Isupov (Dubna, JINR), A.B. Kurepin (Moscow, INR), A.G. Litvinenko, E.I. Litvinenko, I.I. <u>Migulina, V.F. Peresedov</u> (Dubna, JINR). 2013. 16 pp. Phys.Atom.Nucl. 76 (2013) 1-15, Yad.Fiz. 76 (2013) 2-17

28 <u>Pion emission from the T2K replica target: method, results and application</u> <u>NA61/SHINE</u> Collaboration (<u>N. Abgrall</u> (<u>Geneva U.</u>),...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky, T.Drozhzhova, G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov <u>et al.</u>) Nucl.Instrum.Meth. A701 (2013) 99-114.

29 Measurements of Production Properties of K<sub>0</sub>S mesons and Lambda hyperons in Proton-Carbon Interactions at 31 GeV/c NA61 Collaboration, N. Abgrall, ,...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky, T.Drozhzhova, G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al.) CERN-PH-EP-2013-160 e-Print: arXiv:1309.1997 [physics.acc-ph], статья направлена в Phys.Rev. C.

30 Energy dependence of identified hadron spectra and event-by-event fluctuations in p+p interactions fromNA61/SHINE at the CERN SPS Maciej Rybczyenski (for the <u>NA61/SHINE</u> Collaboration) (...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky, T.Drozhzhova, G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al.)

31 Measurement of negatively charged pion spectra in inelastic p+p interactions at 20, 31, 40, 80 and 158 GeV/c <u>NA61/SHINE</u> Collaboration (<u>N. Abgrall</u> (<u>Geneva U.</u>) ...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky,

T.Drozhzhova, G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al.) e-Print: <u>arXiv:1310.2417</u> [hep-ex] статья направлена в EPJ

32 NA61/SHINE facility at the CERN SPS: beams and detector system <u>NA61/SHINE</u> Collaboration (<u>N. Abgrall</u> (<u>Geneva U.</u>) ...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky, T.Drozhzhova ,G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al.) статья направлена в JINST

33 The NA61/SHINE Collaboration , Status report to the proposal SPSC-P-330 - Report from the NA61/SHINE experiment at the CERN SPS <u>N. Abgrall</u> , ...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky, T.Drozhzhova,G.A.Feofilov, S.Igolkin, V.P.Kondratiev, V.V.Vechernin, L.Vinogradov et al.) CERN-SPSC-2013-028 / SPSC-SR-124, 15/10/2013, <u>http://cds.cern.ch/record/1610635?ln=en</u>

34 Экспериментальное исследование отклика модуля адронного калориметра при энергиях протонов и пионов 1-5 ГэВ. О. Андреева, М.Голубева, Ф.Губер, А.Ивашкин, А.Курепин, В.Марин, О.Петухов, А.Садовский, Препринт ИЯИ РАН 1363/2013, статья направлена в журнал «Приборы и техника эксперимента».

35 Передний адронный калориметр эксперимента NA61 на ускорителе SPD в ЦЕРН. М.Голубева, Ф.Губер, А.Ивашкин, А.Курепин, В.Марин, О.Петухов, А.Садовский, Препринт ИЯИ РАН 1362/2013.

36 pK+\Lambda final state: towards the extraction of the ppK- contribution L. Fabbietti , M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al., Nucl.Phys. A914 (2013) 60-68

37 Baryonic resonances close to the Kbar-N threshold: the case of Lambda(1405) in pp collisions *G. Agakishiev,* ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... *et al.* Phys. Rev. C 87 (2013) 025201

38 Deep sub-threshold K\*(892)<sup>0</sup> production in collisions of Ar + KCl at 1.76-A-GeV HADES Collaboration (G. Agakishiev, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. Eur.Phys.J. A49 (2013)

39 <u>Hades experiments: investigation of hadron in-medium properties Piotr Salabura,</u> ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. J.Phys.Conf.Ser. 420 (2013) 012013 <u>Proton induced dielectron radiation off Nb: Pt and Y</u> <u>distributions M. Lorenz</u>, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. J.Phys.Conf.Ser. 426 (2013) 012034

40 Inclusive pion and eta production in p+Nb collisions at 3.5 GeV beam energy G. Agakishiev, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. Phys. Rev. C 88, 024904 (2013)

41 An upper limit on hypertriton production in collisions of Ar(1.76 A GeV) + KCl G. Agakishiev, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. The Eur. Phys. J. A49 (2013) 146

42 Передний сцинтилляционный годоскоп для регистрации ядерных фрагментов на установке ХАДЕС О.В. Андреева, М.Б. Голубева, Ф.Ф. Губер, А.П. Ивашкин, А.Б. Курепин, А.И. Решетин, А.С. Садовский, Е.А. Усенко, Препринт ИЯИ РАН 1349/2013; принято в печать в ПТЭ.

43 <u>Di-pion and di-electron production in NN reactions with HADES at 1.25GeV</u> <u>incident beam energy.</u> <u>Hubert Kuc ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva,</u> A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... *et al.* PoS Bormio2013 (2013) 060.

44 Экспериментальное исследование отклика модуля адронного калориметра при энергиях протонов и пионов 1-5 ГэВ. О. Андреева, М.Голубева, Ф.Губер, А.Ивашкин, А.Курепин, В.Марин, О.Петухов, А.Садовский, Препринт ИЯИ РАН 1363/2013, направлено в ПТЭ.

45 pK+\Lambda final state: towards the extraction of the ppK- contribution L.Fabbietti , ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al., Nucl.Phys. A914 (2013) 60-68

46 Baryonic resonances close to the Kbar-N threshold: the case of Lambda(1405) in pp collisions *G. Agakishiev*, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... *et al.* Phys. Rev. C 87 (2013) 025201

47 Deep sub-threshold K\*(892)<sup>0</sup> production in collisions of Ar + KCl at 1.76-A-GeV HADES Collaboration (G. Agakishiev, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. Eur.Phys.J. A49 (2013).

48 <u>Hades experiments: investigation of hadron in-medium properties</u> <u>Piotr</u> <u>Salabura</u>,...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. J.Phys.Conf.Ser. 420 (2013) 012013.

49 <u>Proton induced dielectron radiation off Nb: Pt and Y distributions M. Lorenz,</u> ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. J.Phys.Conf.Ser. 426 (2013) 012034. 50 Inclusive pion and eta production in p+Nb collisions at 3.5 GeV beam energy G.Agakishiev, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. Phys. Rev. C 88, 024904 (2013

51 An upper limit on hypertriton production in collisions of Ar(1.76 A GeV) + KClG. Agakishiev, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. Eur. Phys. J. A49 (2013) 146.

52 <u>Di-pion and di-electron production in NN reactions with HADES at 1.25GeV</u> <u>incident beam energy.</u> <u>Hubert Kuc ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva,</u> <u>A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... *et al.* PoS Bormio2013 (2013) 060.</u>

53 Н.С.Топильская «Рождение чармония в протон-протонных столкновениях и столкновениях ядер свинца и сравнение результатов, полученных в ЦЕРНе и Брукхейвене.» Яд. Физика, 76, №10 (2013) 1258-1266.

54 Н.С.Топильская «Эффекты ядерной среды в рождении чармония при столкновении тяжелых ионов.» Яд. Физика и Инжиниринг, 4, №9-10 (2013) 786-794.

55 N.S.Topilskaya "Charmonium production in poton-proton collisions and in collisions of lead nuclei at CERN and comparison with Brookhaven data". Phys.Atom.Nucl.76:1196-1204,2013.

56 <u>Measurement of charged jet suppression n Pb-Pb collisions at sNN---- $\sqrt{=2.76}$ </u> <u>TeV ALICE</u> Collaboration (<u>B. Abelev (LLNL, Livermore) et al.</u>). Nov 4, 2013. 28 pp. CERN-PH-EP-2013-205 e-Print: <u>arXiv:1311.0633</u> [nucl-ex]

57 <u>Centrality, rapidity and transverse momentum dependence of J/ $\psi$  suppression in Pb-Pb collisions at sNN----- $\sqrt{=2.76 \text{TeV}}$  ALICE Collaboration (Betty Bezverkhny Abelev (LLNL, Livermore) et al.). Nov 1, 2013. 20 pp. CERN-PH-EP-2013-203 e-Print: arXiv:1311.0214 [nucl-ex]</u>

58 <u>Two and Three-Pion Quantum Statistics Correlations in Pb-Pb Collisions</u> <u>at sNN---- $\sqrt{=2.76}$  TeV at the LHC ALICE</u> Collaboration (<u>Betty Bezverkhny Abelev</u> (<u>LLNL</u>, <u>Livermore</u>) et al.). Oct 29, 2013. 27 pp. CERN-PH-EP-2013-201 e-Print: <u>arXiv:1310.7808</u> [nucl-ex]

59 J/ $\psi$  production and nuclear effects in p-Pb collisions at sNN---- $\sqrt{=5.02 \text{ TeV}}$ ALICE Collaboration (Betty Bezverkhny Abelev (LLNL, Livermore) et al.). Aug 30, 2013. 20 pp. CERN-PH-EP-2013-163 e-Print: arXiv:1308.6726 [nucl-ex]

60 <u>Multiplicity Dependence of Pion, Kaon, Proton and Lambda Production in p--Pb</u> <u>Collisions at sqrt(s\_NN) = 5.02 TeV ALICE</u> Collaboration (<u>Betty Bezverkhny Abelev</u> (<u>LLNL</u>, <u>Livermore) et al.</u>). Jul 25, 2013. 23 pp. CERN-PH-EP-2013-135 e-Print: <u>arXiv:1307.6796</u> [nucl-ex] 61Multi-strange baryon production at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at  $sNN----\sqrt{=}$ 2.76 TeV ALICE Collaboration (Betty Bezverkhny Abelev (LLNL, Livermore) et al.). Jul 21, 2013.18pp. CERN-PH-EP-2013-134

e-Print: <u>arXiv:1307.5543</u> [nucl-ex]

62 <u>Multiplicity dependence of the average transverse momentum in pp, p-Pb, and Pb-Pb</u> collisions at the LHC ALICE Collaboration (Betty Bezverkhny Abelev (LLNL, Livermore) et al.). Jul 3, 2013. 18 pp. CERN-PH-EP-2013-111 e-Print: <u>arXiv:1307.1094</u> [nucl-ex]

63PerformanceoftheALICEVZEROsystemALICE Collaboration (E. Abbas (Cairo, Acad. Sci. Res. Tech.) et al.).Jun 13, 2013. 20 pp.CERN-PH-EP-2013-082 e-Print:arXiv:1306.3130 [nucl-ex]

64 <u>J/Psi Elliptic Flow in Pb-Pb Collisions at sqrt(sNN) = 2.76 TeV</u> <u>ALICE</u> Collaboration (<u>Ehab Abbas</u> (<u>Cairo, Acad. Sci. Res. Tech.</u>) et al.). Mar 23, 2013. 16 pp. CERN-PH-EP-2013-042

65 Передний сцинтилляционный годоскоп для регистрации ядерных фрагментов на установке ХАДЕС. О.В. Андреева, М.Б. Голубева, Ф.Ф. Губер, А.П. Ивашкин, А.Б. Курепин, А.И. Решетин, А.С. Садовский, Е.А. Усенко. Препринт ИЯИ РАН 1349/2013; принято в печать в ПТЭ.

66 <u>Searching a Dark Photon with HADES</u>. G. Agakishiev, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al. e-Print: <u>arXiv:1311.0216</u> [hep-ex]

67 Передний сцинтилляционный годоскоп для регистрации ядерных фрагментов на установке ХАДЕС О.В. Андреева, М.Б. Голубева, Ф.Ф. Губер, А.П. Ивашкин, А.Б. Курепин, А.И. Решетин, А.С. Садовский, Е.А. Усенко, Препринт ИЯИ РАН 1349/2013., 8 авторов

68SearchingaDarkPhotonwithHADESG. Agakishiev, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin,A.Sadovsky... et al. e-Print: arXiv:1311.0216 [hep-ex], 100 authors

69 Measurements of Production Properties of K0S mesons and Lambda hyperons in Proton- Carbon Interactions at 31 GeV/c NA61 Collaboration, N. Abgrall, ....O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky et al.) CERN-PH-EP-2013-160 e-Print: arXiv:1309.1997 [physics.acc-ph], 144 authors

70 Measurement of negatively charged pion spectra in inelastic p+p interactions at 20, 31, 40, 80 and 158 GeV/c <u>NA61/SHINE</u> Collaboration (<u>N. Abgrall</u> (<u>Geneva U.</u>) ...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky et al.) e-Print: <u>arXiv:1310.2417</u> [hep-ex], 139 authors 71 The NA61/SHINE Collaboration , Status report to the proposal SPSC-P-330 -Report from the NA61/SHINE experiment at the CERN SPS <u>N. Abgrall</u> , ...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky et al.) CERN-SPSC-2013-028 / SPSC-SR-124, 15/10/2013, 144 authors

Экспериментальное исследование отклика модуля адронного калориметра при энергиях протонов и пионов 1-5 ГэВ.
 О. Андреева, М.Голубева, Ф.Губер, А.Ивашкин, А.Курепин, В.Марин, О.Петухов, А.Садовский, Препринт ИЯИ РАН 1363/2013, 8 авторов

73 Передний адронный калориметр эксперимента NA61 на ускорителе SPS в ЦЕРН. М.Голубева, Ф.Губер, А.Ивашкин, А.Курепин, В.Марин, О.Петухов, А.Садовский, Препринт ИЯИ РАН 1362/20136, 7 авторов

Emission of forward neutrons by 158A GeV indium nuclei in collisions with Al,
Cu, Sn and Pb <u>E.V. Karpechev</u>, <u>I.A. Pshenichnov</u>, <u>T.L. Karavicheva</u>, <u>A.B. Kurepin</u>, <u>M.B.</u>
<u>Golubeva</u>, <u>F.F. Guber</u>, <u>A.I. Maevskaia</u>, <u>A.I. Reshetin</u>, <u>V.V. Tiflov</u>, <u>N.S. Topilskaya</u> (Moscow,
INR) <u>et al.</u>. Jul 21, 2013. 14 pp. e-Print: <u>arXiv:1307.5548</u> [nucl-ex], 10 авторов

75 <u>Inclusive pion and eta production in p+Nb collisions at 3.5 GeV beam energy</u> <u>G. Agakishiev (Dubna, JINR), A. Balanda (Jagiellonian U.), D. Belver (Santiago de Compostela</u> <u>U.), A. Belyaev (Dubna, JINR), J.C. Berger-Chen (Munich, Tech. U., Universe), A. Blanco (LIP,</u> <u>Coimbra), M. Boehmer (Munich, Tech. U.), J.L. Boyard (Orsay, IPN), P. Cabanelas (Santiago de</u> <u>Compostela U.), S. Chernenko (Dubna, JINR) et al.</u> May 14, 2013. 10 pp. e-Print: <u>arXiv:1305.3118</u>, 97 authors

76 <u>Baryonic resonances close to the Kbar-N threshold: the case of Lambda(1405) in pp</u> collisions G. Agakishiev, A. Balanda, D. Belver, A.V. Belyaev, J.C. Berger-Chen, A. Blanco, M. <u>Bohmer, J.L. Boyard, P. Cabanelas, S. Chernenko et al.</u> Aug 2012. 5 pp. e-Print: <u>arXiv:1208.0205</u>, 95 authors

77 <u>Proposal for an Experiment to Search for Light Dark Matter at the SPS</u> <u>S. Andreas, S.V. Donskov, P. Crivelli, A. Gardikiotis, S.N. Gninenko, N.A. Golubev, F.F. Guber,</u> <u>A.P. Ivashkin, M.M. Kirsanov, N.V. Krasnikov et al.</u> Dec 11, 2013. 42 pp. e-Print: <u>arXiv:1312.3309</u> [hep-ex]

78 12. E.V. Karpechev, I.A. Pshenichnov, T.L. Karavicheva, A.B. Kurepin, M.B. Golubeva, F.F. Guber, A.I. Maevskaia, A.I. Reshetin, V.V. Tiflov, N.S. Topilskaya, P. Cortese, G. Dellacasa, R. Arnaldi, N. DeMarco, A. Ferretti, M. Gallio, A. Musso, C. Oppedisano, A. Piccotti, E. Scomparin, E. Vercellin, C. Cicalo, G. Puddu, E. Siddi, P. Szymanski, I. Efthymiopoulos,

79 Emission of forward neutrons by 158A GeV indium nuclei in collisions with Al, Cu, Sn and Pb arXiv:1307.5548, Nuclear Experiment (nucl-ex)

## 9.3 Публикации к разделу 3

1 C. Lazzeroni, ..., V. Bolotov, V. Duk, ... et al. / Precision Measurement of the Ratio of the Charged Kaon Leptonic Decay Rates // Phys.Lett. B719 (2013) 326-336

2 V.A. Uvarov, ..., V.N. Bolotov, V.A. Duk, A.A. Khudyakov, A.I. Makarov, A.Yu. Polyarush / Measurement of charged kaon semileptonic decay branching fraction  $K- -> e-ve \pi 0$  using ISTRA+ detector // IHEP Preprint 2013-7, 15 pp.

3 А.И. Макаров, А.П. Останков, В.Д. Самойленко, В.К. Семенов, С.А. Холоденко, А.А. Худяков / Исследование временных характеристик счетчиков триггерного годоскопа заряженных частиц для эксперимента NA62 // Препринт ИФВЭ 2013-18 ОЭФ, 17 стр.

4 В. Дук, П. Ченчи, М. Пене и др. / CHOD в техническом ране 2012 года // PREPRINT INR 1370/2013, OCTOBER 2013, MOSCOW 2013

5 С.В. Донсков, ..., А.И. Макаров, А.А. Худяков / Система сбора данных эксперимента ОКА // Препринт ИФВЭ 2013-22, ОЭФ, 28 стр.

6 И.Бритвич, В.В.Бреховских, В.К.Семенов и др. / Основные характеристики сцинтилляторов производства ИФВЭ // Препринт ИФВЭ 2013-23, ОЭФ, Протвино 2013.

## 9.4 Публикации к разделу 4

1 A. Shaikhiev / Search for heavy neutrino in the E949 experiment // Talk on The International Neutrino Summer School INSS2013, August 6-16, Beijing, China.

2 Ю.Г. Куденко / Наблюдение осцилляций мюонных нейтрино в электронные нейтрино в эксперименте Т2К // УФН, т. 183, 2013, с. 1225-1230.

3 K. Abe,..., D. Gudin,..., A. Izmaylov,..., I. Karpikov,..., M. Khabibullin,..., A. Khotjantsev,..., Y. Kudenko,..., O. Mineev,..., Y. Shustrov,..., N. Yershov et al. / Observation of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam // 8 pages, Physical Review Letters, 2013 (в печати), arXiv:1311.4750 [hep-ex].

4 Yu.G. Kudenko / Results from the T2K experiment // Phys. Atom. Nucl. 76 (2013) 1205-1212.

5 K. Abe,..., D. Gudin,..., A. Izmaylov,..., I. Karpikov,..., M. Khabibullin,..., A. Khotjantsev,..., Y. Kudenko,..., O. Mineev,..., Y. Shustrov,..., N. Yershov et al. / Measurement of neutrino oscillation parameters from muon neutrino disappearance with an off-axis beam // Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 211803, arXiv: 1308.0465 [hep-ex].

6 K. Abe,..., D. Gudin,..., A. Izmaylov,..., I. Karpikov,..., M. Khabibullin,..., A. Khotjantsev,..., Y. Kudenko,..., O. Mineev,..., Y. Shustrov,..., N. Yershov et al. / Evidence of

electron neutrino appearance in a muon neutrino beam // Phys.Rev. D88 (2013) 032002, arXiv:1304.0841 [hep-ex].

7 A. de Gouvea,..., Yu. Kudenko,... et al. (Intensity Frontier Neutrino Working Group Collaboration) / Neutrinos // arXiv:1310.4340 [hep-ex].

8 E. Kearns,..., A. Izmaylov, M. Khabibullin, Y. Kudenko,... et al. (Hyper-Kamiokande Workin Group) / Hyper-Kamiokande physics opportunities // 8 pages, arXiv:1309.0184.

9 K. Abe,..., D. Gudin,..., A. Izmaylov,..., I. Karpikov,..., M. Khabibullin,..., A. Khotjantsev,..., Y. Kudenko,..., O. Mineev,..., Y. Shustrov,..., N. Yershov et al. / The T2K neutrino flux prediction // Phys.Rev. D87 (2013) 012001.

10 S.K. Agarwalla,..., A. Izmaylov,..., M. Khabibullin, A. Khotjantsev,..., Y. Kudenko,..., O. Mineev,..., N. Yershov et al. / The mass-hierarchy and CP-violation discovery reach of the LBNO long-baseline neutrino experiment// 38 pages, arXiv:1312.6520 [hep-ph].

11 Ю.Г. Куденко / Нейтринные осцилляции: от измерения θ<sub>13</sub> к иерархии масс и СР нарушению. // Доклад на Сессии секции ЯФ ОФН РАН, ИФВЭ, Протвино, 5-8 ноября 2013 г.

12 Ю.Г. Куденко / Нейтринные ускорительные эксперименты с длинной базой: результаты и перспективы // Доклад на Научной сессии ОФН РАН, посвященной 100-летию со дня рождения Б.М. Понтекорво, 2-3 сентября 2013 г., Дубна, Россия.

13 И.С. Карпиков / Результаты эксперимента Т2К // Доклад на Сессии секции ЯФ ОФН РАН, ИФВЭ, Протвино, 5-8 ноября 2013 г.

14 Yu. Kudenko / Neutrino – source of new physics // Talk at the Conference on Fundamental Constants, FFK2013, 7-11 October, Pulkovo, Russia.

15 M. Khabibullin, Yu. Kudenko / Neutrino oscillations: recent results and perspectives // Talk at XXIX-th International Workshop on High Energy Physics «New results and actual problems in particle & astroparticle physics and cosmology» HEPFT2013, 26-28 June 2013, Protvino, Russia.

16 K. Abe,..., D. Gudin,..., A. Izmaylov,..., I. Karpikov,..., M. Khabibullin,..., A. Khotjantsev,..., Y. Kudenko,..., O. Mineev,..., Y. Shustrov,..., N. Yershov et al. / Measurement of the inclusive  $v_{\mu}$  charged current cross section on carbon in the Near detector of the T2K experiment // Phys.Rev. D87 (2013) 092003, arXiv:1302.4908 [hep-ex].

## 9.5 Публикации к разделу 5

1 N. Agafonova et al. OPERA Collaboration, New results on  $\nu\mu \rightarrow \nu\tau$  appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam, arXiv:1308.2553, (2013)

2 N. Agafonova et al. OPERA Collaboration, Search for  $\nu\mu\rightarrow\nu e$  oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam, JHEP 07 (2013) 004, http://arxiv.org/abs/1303.3953

3 О.Г. Ряжская, «Об экспериментах в подземной физике», УФН т.183, №3 (2013), с.317-323

4 T. Adam et al. (OPERA Coll.) Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicat. JHEP 01 (2013) 153

5 V. Dadykin and O. Ryazhskaya. Search for neutrino radiation from collapsing stars and the sensitivity of experiments to the different types of neutrinos. Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov Proceedings of the Fifteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics/ ed. by Alexander I. Studenikin. - Singapore: World Scientific, 2013. p. 190

6 V. V. Ashikhmin, K. V. Manukovskiy, O. G. Ryazhskaya, I. R. Shakiryanova and A. V. Yudin, for LVD Collaboration.Supernova neutrino type identification with adding sodium chloride in LVD. Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov Proceedings of the Fifteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics/ ed. by Alexander I. Studenikin. - Singapore: World Scientific, 2013. p. 199.

7 F. Pupilli, on behalf of the OPERA Collaboration. Search for nt interactions with the nuclear emulsion films of the OPERA experiment. Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov Proceedings of the Fifteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics/ ed. by Alexander I. Studenikin. - Singapore: World Scientific, 2013. p. 116

8 R. Rescigno, on behalf of the OPERA Collaboration. The electronic detectors of the hybrid OPERA neutrino experiment. Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov Proceedings of the Fifteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics/ ed. by Alexander I. Studenikin. - Singapore: World Scientific, 2013. p. 120.

9 Н. Ю. Агафонова и др. (Коллаборация LVD), Нейтроны, генерированные мюонами на установке LVD, Известия РАН сер. Физ. 2013, 77 N11, 1587-1590

10 Н. Ю. Агафонова и др. (Коллаборация LVD), Изучение взаимодействия нейтронов с поваренной солью в детекторе LVD, Известия РАН сер. Физ., 2013, 77 N11, 1591-1593

11 Р.И. Еникеев и др. Поиск нейтринного излучения от коллапсирующих звезд на Артемовском сцинтилляционном детекторе, Известия РАН сер. Физ, 2013, 77 N 11, 1594-1596

12 N.Yu. Agafonova et al. (LVD Collaboration), Study of neutron interactions with NaCl in LVD, 2013 J. Phys.: Conf. Ser. 409 012140

13 N.Yu. Agafonova et al. (LVD Collaboration), Neutrons produced by muons in LVD: Monte Carlo Simulation, 2013 J. Phys.: Conf. Ser. 409 012139
14 Ляшко И.А."Дипломная работа, 2013, Измерение выхода нейтронов, генерируемых мюонами естественного и искусственного происхождения на установке LVD"

15 Н.Ю. Агафонова, А.С. Мальгин. Анализ экспериментальных данных по выходу нейтронов от мюонов. Яд. Физ., т.76, No.5, 2013, с.650-658.

16 N. Yu. Agafonova, A. S. Malgin, Universal formula for the muon-induced neutron yield, Phys. Rev. D 87, 113013 (2013), arXiv:1304.0919, (2013)

17 Н.Ю. Агафонова и др., Поиск осцилляций нейтрино в канале nu\_mu -> nu\_tau с помощью гибридного детектора эксперимента OPERA,Физика Элементарных частиц и Атомного ядра, 2013, Vol. 44, No. 4., Дубна, (Eng: Physics of Particles and Nuclei, 2013, Vol. 44, No. 4, pp. 703–727)

18 N. Yu. Agafonova, W. Fulgione, A.S. Malgin "Origin of a Signal Detected with the LSD Detector after the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant", Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2013, Vol. 117, No. 2, pp. 258267. (2013)

19 N. Yu. Agafonova et al., LVD Collaboration. "Measurement of muon charge ratio with the Large Volume Detector" http://arxiv.org/abs/1311.6995

20 Poster on Low Radioactivity Techniques 2013: R. Persiani for the LVD Collaboration, "Measurement of the neutron yield induced by muons in liquid scintillator and iron at LNGS with the LVD experiment", 10-12 April, 2013, LNGS, Italy

21 Talk on 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: I. Shakyrianova "Perent status of LVD", 22-28 August, 2013, MSU

22 Poster on 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: K.V. Manukovskiy, O.G. Ryazhskaya, N.M. Sobolevskiy, A.V. Yudin "Muon-induced neutron background study for underground experiments with liquid scintillator searching for rare event physics", 22-28 August, 2013, MSU

23 Talk on 33rd ICRC2013: G. Bruno, W.Fulgione, A.Molinario, C.Vigorito for the LVD Collaboration, "Neutrino bursts from gravitational stellar collapses with LVD: 20 years of continuous monitoring", Proc. of 33rd ICRC, 2-9 July, 2013, in Rio de Janeiro, Brazil.

24 Two Posters on The Pontecorvo100 Symposium, 18-20 September, 2013. I. Shakyrianova, "Search for  $\nu\mu \rightarrow \nu e$  oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam", "Measurements of neutrino velocity with LVD"

## 9.6 Публикации к разделу 6

1 В.Н. Гаврин. Вклад галлиевых экспериментов в понимание физики Солнца и физики нейтрино. Ядерная физика. - Москва: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2013. - 76, 10. - стр.1299-1304.

2 D. Frekers, M.C. Simon, C. Andreoiu, J.C. Bale, H. Ejiri, V. Gavrin, et. al. Penning trap Q-value determination of the 71Ge(v, e-)71Ge reaction using threshold charge breeding of on-line produced isotopes. Physics Letters B. - Atlanta: Elsevier, 2013. -722: - crp.233-237.

3 V. Gavrin, V. Gorbachev, T. Ibragimova, E. Veretenkin, Baksan measurements of low energy neutrino: results and plans, Wilhelm and Else Heraeus Seminars "Exploring the Neutrino Sky and Fundamental Particle Physics on the Megaton Scale", January 21-23, 2013 Physikzentrum Bad Honnef, Germany

4 V. Matveev, V. Gavrin, Tribute to our Milla Baldo Ceolin, XV Neutrino Telescopes, 11-15 March 2013, Palazzo Franchetti, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Italy.

5 В.В. Горбачев, Е.П. Веретенкин, В.Н. Гаврин, С.Н. Даньшин, Т.В. Ибрагимова, А.В. Калихов, Т.В. Кнодель. Поиск осцилляций электронных нейтрино на короткой базе в экспериментах SAGE и Borexino с искусственным источником нейтрино. Ядерная физика. - Москва: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2013.- 76, 12. – стр. 1591-1596

6 Gorbachev, B. Cleveland, V. Gavrin, S. Danshin, T. Ibragimova, A. Kalikhov, T. Knodel, I. Mirmov, A. Shikhin, E. Veretenkin, Search for sterile neutrino using SAGE gallium detector, The International Workshop on Non-Accelerator New Physics (NANPino-2013), June 24-29, 2013, Valday, Novgorod region, Russia

7 В.Н. Гаврин, «Исследование низкоэнергетических нейтрино в Баксанской нейтринной обсерватории». Научная сессия ОФН РАН "Перспективы исследований в области нейтринной физики частиц и астрофизики", посвященная 100-летию со дня рождения академика Б.М. Понтекорво, 2-3 сентября 2013, Дубна,

## 9.7 Публикации к разделу 7

1 A.V. Avrorin et al., "A hydroacoustic positioning system for the experimental cluster of the cubic-kilometer-scale neutrino telescope at Lake Baikal", ПТЭ (2013) 87-97 (Instrum. Exp.Tech.56(2013)449-458).

2 A.V.Avrorin et al., "Current status of the BAIKAL-GVD project", Nucl. Instrum. Meth. A725 (2013) 23-26.

3 A.D. Avrorin et al., Proc. of 4th Roma International Conference on Astro-particle Physics RICAP 2013, Rome, Italy, May 22-24, 2013, "The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project", arXiv:1308.1833 [astro-ph.IM].

4 A.V.Avrorin et al., "Present status of the BAIKAL-GVD project development", Journal of Physics: Conference Series 409 (2013) 012141.

5 Домогацкий Г. В., Никифоров А. И., Панфилов А. И., Розанов М. И., "Подводные несущие конструкции и донные кабельные линии глубоководного нейтринного телескопа HT-1000 на озере Байкал", Технический проект HT-1000M.00.000 ТП (Корректировка технического проекта HT-200M.00.000 ТП), ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, 2013.

6 A.D. Avrorin et al., 4th Roma International Conference on Astro-particle Physics RICAP 2013, Rome, Italy, May 22-24, 2013, "The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project".

7 A.D. Avrorin et al., 2nd International Workshop on Exotic physics with neutrino telescopes, EPNT 2013, Centre de Physique des Particules de Marseille, France, 3-5 Aprile, 2013, "Search for Neutrinos from Dark Matter Annihilation in the Sun with the Baikal Neutrino Experiment", <u>https://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confld=7381</u>, in press.

8 A.D. Avrorin et al., "Status of the BAIKAL-GVD project", Ломоносовские чтения, Москва, МГУ, 21-25 августа 2013, in press.

9 Б.А. Шойбонов. "Байкальский нейтринный эксперимент: история, статус, перспективы", 13-ая Байкальская школа по физике элементарных частиц и астрофизике. Иркутская область, пос. Большие Коты, ИГУ, 5-12 июля 2013.

10 Т.А. Овсянникова, студентка НИЯУ МИФИ 5 курс, "Методики поиска локальных источников нейтрино высоких энергий в проекте Байкал-НТ1000"; Доклад на 56-й научной конференции МФТИ: Всероссийская молодёжная научно-инновационная конференция «Физико-математические науки: актуальные проблемы и их решения», г. Догопрудный, 25–30 ноября 2013; опубликован в Трудах, том "Проблемы современной физики", стр. 182-183.

11 В.В. Синев «Экспериментальный спектр антинейтрино от ядерного реактора и спектры основных делящихся изотопов», Ядерная Физика, 73, 5, 578, 2013.

12 Л.Б. Безруков, Е.А. Литвинович, И.Н. Мачулин, В.В. Синев, М.Д. Скорохватов, С.В. Сухотин. «Поиски потока антинейтрино от 40К из Земли в сцинтилляционных детекторах большого объема», Препринт ИЯИ-1372/2013.

13 Axion inflation with gauge field production and primordial black holes. E.Bugaev, P.Klimai, arXiv: 1312.7435 [astro-ph.CO]

14 Vector-meson dominance and photonuclear interactions at superhigh energies. E.Bugaev,B.Mangazeev, Bull.Russ.Acad.Sci.Phys 77(2013) 1319-1321

15 Primordial black hole constraints for curvaton models with large non-Gaussianity. P.Klimai, E.Bugaev, Int.J.Mod.Phys. D22(2013)135003

16 Cosmological constraints on the curvaton web parameters. E.Bugaev, P.Klimai, Phys.Rev.D88 (2013)023521

17 Photonuclear interactions at very high energies and vector meson dominance. E.Bugaev, B.Mangazeev, J.Phys.Conf.Ser.409 (2013)012129

18 Demidov S.D., Suvorova O.V., Boliev M.M., «Results of Dark Matter searches with Baksan», 2nd International Workshop on Exotic physics with neutrino telescopes, EPNT 2013, Centre de Physique des Particules de Marseille, France, 3-5 Aprile, 2013, https://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confld=7381

19 С.В.Демидов. "Dark Matter searches at Baksan underground scintillator telescope", Ломоносовские чтения, Москва, МГУ, 21-25 августа, 2013

20 О.В.Суворова. "Neutrino physics with the Baksan Underground Scintillator Telescope", Pontecorvo100, International Symposium in honour of Bruno Pontecorvo for centennial of the birth, Pisa, Italy, Sept 18-20, 2013.

21 M.M. Boliev, S.V. Demidov, S.P. Mikheyev<sup>†</sup>, O.V. Suvorova, "Search for muon signal from dark matter annihilations in the Sun with the Baksan Underground Scintillator Telescope for 24.12 years", JCAP09(2013)019 and arXiv:1301.1138 v1, v2[astro-ph.HE].

22 О. В. Суворова, М. М. Болиев, С. В. Демидов, С. П. Михеев, "Ограничения на сечения упругого рассеяния нейтралино на нуклоне в нейтринном эксперименте на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе", Ядерная Физика, 2013, том 76, No 11, с. 1433–1442.

## 9.8 Публикации к разделу 8

1 S.R. Klein. IceCube collaboration, 2013, arXiv:1311.6519 [astro-ph.HE].

2И.М. Железных. О взаимодействии нейтрино высоких энергий в космическихлучах с веществом. Дипломная работа, физический факультет, МГУ, 1958.М.А. Markov.Proc,10 Int. Conf. High-Energy Physics, Rochester, 1960, p. 579.М.А. Markov, I.M. Zheleznykh.Onhighenergyneutrinophysicsincosmicrays.Nucl.Phys., 1961, v.27, pp. 385-394.

3 Г.А.Гусев, И.М. Железных. О детектировании мюонов и нейтрино по радиоизлучению каскадов, производимых ими в диэлектрических средах. Письма в ЖЭТФ, т. 38, стр.505-507, 1983.

4 <u>I.M. Zheleznykh</u> (Moscow, INR). Prospects for large scale detectors of superhigh energy neutrinos (10<sup>15</sup> eV to 10<sup>20</sup> eV). Published in "Boston 1988, Proceedings of the 13<sup>th</sup> Int. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics", ed. J.Schneps, T. Kafka et al., World Scientific, pp. 528-535.

Р.Д. Дагкесаманский, И.М. Железных, Радиоастрономический метод регистрации нейтрино и других элементарных частиц супервысоких энергий. Письма в ЖЭТФ, т. 50, вып.5, стр. 233-235, 1989.

5 I.N. Boldyrev, M.A. Markov, A.L. Provorov, I.M. Zheleznykh et al. RAMAND: a status report. "Venice 1991", Proc. of the 3d Int. Workshop on Neutrino Telescopes, ed. Baldo-Ceolin, pp. 337-355.

6 Березняк А.Р., Дагкесаманский Р.Д., Железных И.М., Коваленко А.В., Орешко В.В., «Ограничения на поток нейтрино сверхвысоких энергий по радиоастрономическим наблюдениям», Астрон. журнал, 82, № 2, 1-8 (2005).

7 V.A. Matveev, I.M. Zheleznykh, P.I. Korotin, V.T. Paka, N.M. Surin/ "Alternative Techniques for dear-water monitoring"//Nuclear Instr. & Methods in Phys. Res. A 626-627 (2011) S106-S108.

8 R.D. Dagkesamanskii, V.A. Matveev, I.M. Zheleznykh/ "Prospects of radio Detection of extremely high energy neutrinos bombarding the Moon"//Nuclear Instr. & Methods in Phys. Res. A 626-627 (2011) S44-S47.

9 D. Besson, R. Dagkesamanskii, E. Kravchenko, I Kravchenko, I. Zheleznykh/ "Tethered balloons for radio detection of ultra high energy cosmic neutrinos in Antarctica"//Nuclear Instr.& Methods in Phys. Res. A662 (2012) S50-S53.

10 I.M. Zheleznykh, Z.Ya. Sadygov, B.A. Khrenov, A.F. Zerrouk./ Prospects of Application of Multi-pixel Avalanche Photo Diodes in Cosmic Rays Experiments// Proc. 32<sup>nd</sup> ICRC, Beijing, 11-18 Aug. 2011.

11 Igor Zheleznykh, Leonid Dedenko, Grigorii Dedenko, Anna Mironovich, "Simulation of cascades caused by UHE and EHE neutrinos in dense media", report at Int. Cosmic Ray Conf., Rio de Janeiro, Brazil, 2-7 July 2013.

12 Z. Sadygov A. Ariffin, Zheleznykh et al./"Technology of manufacturing micropixel avalanche photodiodes and a compact matrix on their basis"// Physics of Particles and Nuclei Letters, 2013, Vol. 10, No. 7, pp. 780-782.

## 9.9 Публикации к разделу 9

1 Y.Maghrbi, R Kondratiev, V.Lisin, A.Polonski et al. Coherent photoproduction of  $\pi$ 0and  $\eta$ -mesons off 7Li. European Physical Journal 49 (2013) 38.

2 M.Oberle, R Kondratiev, V.Lisin, A.Polonski et al. Measurement of the beam-helicity asymmetry  $I^{\circ}$  in the photoproduction of  $\pi^{0}$ -pairs off the proton and off the neutron. Phys. Lett. B 721 (2013) 237-243.

3 J. Robinson, R. Kondratiev, V. Lisin, A.Mushkarenkov, A. Polonski et al. Measurements of  $12C(\gamma, pp)$  photon asymmetries for  $E\gamma = 200-450$  MeV. Eur.Phys.J. A 49 (2013) 65.

4 P.Aguar Bartolome, R. Kondratiev, V. Lisin, A. Polonski et al. First measurement of the helicity dependence for the  $\gamma$  <sup>3</sup>He interaction in the D(1232) resonance region. Phys.Lett. B 723 (2013) 71-77.

5 Y.Maghrbi, R Kondratiev, V.Lisin, A.Polonski et al. Double pion photoproduction off nuclei - are there effects beyond final-state interaction? Phys. Lett. B 722 (2013) 69-75.

6 D.Hornidge, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Accurate test of Chiral Dynamics in the  $\gamma p \rightarrow \pi 0 p$  reaction. Phys. Rev. Lett. 111 062004 (2013).

7 P.Aguar Bartolome, R. Kondratiev, V. Lisin, A. Mushkarenkov, A. Polonski et al. Measurement of the  $\gamma p \rightarrow K0 \square \square$  reaction with the Crystal Ball/TAPS detectors at the Mainz Microtron. Phys.Rev. C88, 044601 (2013).

8 M.Tiel, R. Kondratiev, V. Lisin, A. Mushkarenkov, A. Polonski et al. In-medium modifications of the  $\omega$  meson near the production threshold. EPJ A 49, 132 (2013).

9 D. Werthmüller, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. A narrow structure in the excitation function of  $\eta$  -photoproduction off the neutron. Phys. Rev. Lett. (in print).

10 N.S.Borisov, A.N.Fedorov, G.M.Gurevich, R.L.Kondratiev, M.Korolija, A.B.Lazarev, M.Martinez, S.V.Mironov, A.B.Neganov, V.N.Pavlov, H.Ortega, A.Thomas, Yu.A.Usov. Frozenspin target for experiments at MAMI C. Nuclear Instruments and Methods A (в печати).

11 V.L.Kashevarov, G.Gurevich, R. Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A. Polonski et al. Target and beam asymmetry for the  $\gamma p \rightarrow \pi 0 \pi 0 p$ . Phys. Rev. C (в печати).

12 Г.М.Гуревич. «Активная» поляризованная мишень: измерение спиновых поляризуемостей протона. Письма в ЭЧАЯ (в печати).

13 G.M.Gurevich. "Active" polarized target: measurement of the proton spin polarizabilities. Physics of Particles and Nuclei Letters (в печати).

14 Г.М.Гуревич. Измерение спиновых поляризуемостей протона. Ядерная физика (в печати).

15 G.M.Gurevich. Measurement of spin polarizabilities of the proton. Physics of Atomic Nuclei (в печати).

16 Р.В. Волков, К.А. Иванов, А.Б. Савельев-Трофимов, Д.С. Урюпина, С.А.Шуляпов, Р.М. Джилкибаев, В.Г. Недорезов, А.В. Русаков, А.А. Туринге, А.В. Брантов, В.Ю. Быченков. Новые фотоядерные методы на основе фемтосекундных лазеров. ЭЧАЯ, Дубна (2013), в печати.

17 K.A. Ivanov, S.A. Shulyapov, A.A. Turinge, e.a. "X-ray diagnostics of ultrashort laserdriven plasma: experiment and simulations", Plasma Physics, v.53 (2013), in press.

18 С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, А.Н. Ермаков, Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов, А.С. Курилик, К.А. Стопани, В.В. Ханкин, В.И. Шведунов. «ОБРАЗОВАНИЕ 18F В РЕАКЦИИ 19F(γ,n)». Известия РАН. Серия физическая 2013, Том 77, № 4, стр. 531-534.

19 S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, A.N. Ermakov, B.S. Ishkhanov, V.V. Khankin, A.S. Kurilik, A.A. Kuznetsov, V.I. Shvedunov, K.A. Stopani. "18F PRODUCTION IN THE  $19F(\gamma,n)$  REACTION". Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics 2013, Vol. 77, No. 4, pp. 480-482.

20 Л.З.Джилавян, В.Г.Недорезов. «Фотоделение 238U в области гигантского резонанса». Ядерная физика (в печати).

21 L.Z.Dzhilavyan, V.G.Nedorezov. "The 238U photofission in the giant resonance region". Physics of Atomic Nuclei 2013.

22 Л.З.Джилавяні «Потоки и спектры квазимонохроматических аннигиляционных фотонов для исследований Е1 гигантских резонансов в атомных ядрах». Ядерная физика (в печати).

23 L.Z.Dzhilavyan. "FLUXES AND SPECTRA OF QUASIMONOCHROMATIC ANNIHILATION PHOTONS FOR STUDIES OF E1 GIANT RESONANCES IN ATOMIC NUCLEI". Physics of Atomic Nuclei (in print).

24 Л.З.Джилавян. «Сопоставление реальных тормозных фотонов от электронов и позитронов и виртуальных фотонов в электрон- и позитрон- ядерных реакциях для задач исследования гигантских резонансов». Известия РАН. Серия физическая (в печати).

25 L.Z.Dzhilavyan. "COMPARISON OF REAL BREMSSTRAHLUNG PHOTONS FROM ELECTRONS AND POSITRONS AND VIRTUAL PHOTONS IN ELECTRON- AND POSITRON- NUCLEAR REACTIONS FOR STUDIES OF GIANT RESONANCES". Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics (in print).

26 А.И.Карев, В.Г.Раевский, С.Н.Черепня, Л.З.Джилавян, С.С.Белышев, А.Н.Ермаков, Б.С.Ишханов, В.В.Ханкин, Н.И.Пахомов, В.И.Шведунов, В.А.Берлянд. «РАДИАЦИОННАЯ

БЕЗОПАСНОСТЬ БАГАЖА, ДОСМОТРЕННОГО В АЭРОПОРТАХ ФОТОЯДЕРНЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ». Известия РАН. Серия физическая (в печати).

27 A.I.Karev, V.G.Raevsky, S.N.Cherepnya, L.Z.Dzhilavyan, S.S.Belyshev, A.N.Ermakov, B.S.Ishkhanov, V.V.Khankin, N.I.Pakhomov, V.I.Shvedunov, V.A.Berlyand. "RADIATION SAFETY OF LUGGAGE INSPECTED BY PHOTO-NUCLEAR EXPLOSIVE DETECTORS IN AIRPORTS". Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics (in print).

28 С.С.Белышев, Л.З.Джилавян, Б.С.Ишханов, А.С.Курилик, В.В.Ханкин, В.И.Шведунов. «ИЗМЕРЕНИЯ ВЫХОДОВ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА ПРИРОДНОМ ТИТАНЕ ПРИ Еγ макс ≈ 55 МэВ». Известия РАН. Серия физическая (в печати).

29 S.S.Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, B.S.Ishkhanov, A.S.Kurilik, V.V.Khankin, V.I.Shvedunov. MEASUREMENTS OF PHOTONUCLEAR REACTIONS YIELDS IN NATURAL TITANIUM AT E $\gamma$  max  $\approx$  55 MeV. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics (in print).

30 Б.А.Тулупов. Описание простейших фотоядерных реакций в рамках частичнодырочной дисперсионной оптической модели. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013.

31 Иванов К.А., Шуляпова С.А., Урюпиной Д.С., Ларькина А.С., Савельев-Трофимов А.Б., Брантов А.В., Быченков В.Ю. Русаков А.В., Лапик А.М., Недорезов В.Г. Ускорение электронов при взаимодействии лазерного импульса субрелятивистской интенсивности с пространственно-неоднородной плазмой. Ломоносовские чтения. МГУ 2013.

32 А.А.Туринге, В.Г.Недорезов, И.А.Пшеничнов « Мультифрагментации ядер углерода фотонами с энергией 0,8 – 1,5 ГэВ.» 63 International conference NUCLEUS 2013 ( Moscow, October 8-12, 2013).

33 G.M.Gurevich. Compton scattering with polarization degrees of freedom: Study of the nucleon spin structure. 63 International conference NUCLEUS 2013 (Moscow, October 8-12, 2013).

34 Б.А.Тулупов, М.Г.Урин. 21 Международный семинар «Взаимодействие нейтронов с ядрами» (21 International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei), Украина, г. Алушта, 20-25 мая 2013.

35 L.Z.Dzhilavyan. "FLUXES AND SPECTRA OF QUASIMONOCHROMATIC ANNIHILATION PHOTONS FOR STUDIES OF E1 GIANT RESONANCES" LXIII International Conference "Nucleus 2013".

36 L.Z. Dzhilavyan. "ROLE OF BREMSSTRAHLUNG DIFFERENCES FOR ELECTRONS AND POSITRONS AT E1GR STUDIES WITH QUASIMONOCHROMATIC ANNIHILATION PHOTONS". LXIII International Conference "Nucleus 2013".

37 L.Z. Dzhilavyan. "IVE1GR-IVE2GR SEPARATION USING REAL PHOTONS AND VIRTUAL PHOTONS IN ELECTRON- AND POSITRON- NUCLEAR REACTIONS". LXIII International Conference "Nucleus 2013".

38. D.Middleton, G.M.Gurevich, V.P.Lisin, R.Kondratjev, A.A.Polonski et al. (A2 collaboration). Compton scattering - Spin polarizabilities. 21th Crystal Ball at MAMI collaboration meeting (February 2013).

39. Громов А.М., Нестеров К.Н., Солодухов Г.В., Трусова В.М. 9 Международная конференция по ядерной и радиационной физике ICNRP'2013. Алматы, Казахстан 24–27 сент. Сб. тезисов, с.276.Радиационно-химическая регенерация окислителя – ионов железа (Ш) в реакциях сернокислотного выщелачивания металлов.

40. Оценка возможных характеристик установки для НАА на основе ускорителя электронов ЛУЭ-8 и фотонейтронной W-Be мишени. А.В.Андреев, Ю.М.Бурмистров, А.М.Громов С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, Г.В.Солодухов, В.И.Фирсов, Ю.М.Ципенюк Ядро 2013, Москва, 8–12 окт. 2013 г. Сборник тезисов. С.251.

41. Monte Carlo simulation of the photoneutron source of thermal neutrons based on the electron accelerator LUE-8 INR RAS L.N.Latysheva, A.V.Andreev, S.V.Zuev, E.S.Konobeevsky, N.M.Sobolevsky, G.V.Soloduhov, R.D.Ilic Ядро 2013, Москва, 8–12 окт. 2013 г. Сборник тезисов. С.239.

42. R.V. Volkov1, K.A. Ivanov1, A.B. Savel'ev1, D.S. Uryupina1, S.A. Shulyapov1, R.M. Dzhilkibaev2, D.P. Zagorodnyuk2, A.M. Lapik2, V.G. Nedorezov2, A.V. Rusakov2, A.A. Turinge2, A.V. Brantov3, V.Yu. Bychenkov3. The study of electromagnetic radiation from the iron target, irradiated by femtosecond laser pulses. Доклад на международной конференции «Ядро 2013», Москва, 2013.

43 Р.А. Алиев, С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, А.Н. Ермаков, Б.С. Ишханов, Н.И. Пахомов, В.В. Ханкин, В.И. Шведунов. «Экспериментальное исследование возможностей наработки 18F, 67Cu, 177Lu для ядерной медицины на ускорителях электронов». Препринт ИЯИ РАН. М. 2013, 52 стр.

44 С.С. Белышев, В.А. Берлянд, Т.П. Берлянд, Л.З. Джилавян, А.Н. Ермаков, А.Н. Каманин, Б.С. Ишханов, А.И. Карев, Н.И. Пахомов, В.Г. Раевский, В.В. Ханкин, С.Н. Черепня, В.И. Шведунов. «Экспериментальное исследование проблем радиационной безопасности при использовании фотоядерного детектора скрытых взрывчатых веществ». Препринт ИЯИ РАН. М. 2013, 28 стр.

45 «Способ генерации медицинских радиоизотопов». Джилавян Леонид Завенович, Карев Александр Иванович, Валерий Георгиевич Раевский. Заявка на патент подана в Роспатент. Патент РФ № 2500429 (10.12.2013, Бюл. № 34). 46 "Method of detection and identification of carbon and identification of carbon- and nitrogen- containing materials". Inventors: Karev Aleksandr Ivanovich, Raevsky Valeriy Georgievich, Dzhilavyan Leonid Zavenovich, Brothers Louis Joseph, Wilhide Larry Kenneth. United States Patent Karev et al. Patent No: US 8,582,712 B2 Date of Patent: Nov. 12, 2013.

47 А.В.Андреев, Ю.М.Бурмистров, А.М Громов. С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, Л.Н.Латышева, М.В Мордовской, Н.М.Соболевский, Г.В.Солодухов. Техническое задание «Разработка источника медленных нейтронов на базе ускорителя ЛУЭ-8». ИЯИ РАН, 2013 г. www.inr.ac.ru/~pnlab.