

# ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ им. В. П. ДЖЕЛЕПОВА

## ФИЗИКА НЕЙТРИНО И РЕДКИХ ПРОЦЕССОВ

В 2010 г. в рамках эксперимента **OPERA** на нейтринном пучке CNGS продолжался набор данных, что позволило к концу сеанса зарегистрировать почти 4500 нейтринных взаимодействий в детекторе при интегральной интенсивности  $4,5 \cdot 10^{19}$  протонов на мишени. Работа по анализу этих событий сейчас идет в 10 институтах Японии и Италии, имеющих автоматические сканирующие станции. Анализ данных, полученных в сеансах 2008–2009 гг., позволил перейти к важному результату — обнаружению первого события тау-нейтрино в пучке мюонных нейтрино [1]. Это является первым в мире наблюдением нейтринных осцилляций в режиме появления новых типов нейтрино (рис. 1).

Основным научным результатом, полученным на детекторе **BOREXINO** в 2010 г., является первое достоверное (99,997 % у.д.) подтверждение существования геонейтрино [2]. Наблюдается антинейтринный сигнал с энергетическим спектром, соответствующим ожидаемому от бета-распадов радиоактивных элементов в земле из цепочек урана-238 и тория-232. Таким образом, впервые подтверждено присутствие радиогенного

вклада в тепло, производимое в недрах земли (рис. 2).

В рамках работ по геонейтрино опубликована работа по результатам анализа формы спектра  $^{214}\text{Bi}$  на данных СТФ (прототипа детектора **BOREXINO**), представляющая интерес с точки зрения расчета геонейтринного сигнала [3]. Анализ антинейтринных данных позволил также установить новые модельно-независимые пределы на антинейтринные потоки в лаборатории Гран-Сассо.

Основной целью эксперимента **GEMMA** является измерение магнитного момента (анти)нейтрино на уровне чувствительности  $(4-7) \cdot 10^{-12} \mu_B$ . Спектрометр **GEMMA** состоит из HPGe-детектора весом 1,5 кг, окруженного пассивной и активной защитой. Он расположен на расстоянии 13,9 м от центра реактора №2 Калининской АЭС. Анализ данных, полученных в ходе первого этапа эксперимента, позволил установить лучший в мире верхний предел на магнитный момент нейтрино с учетом и без учета механизма атомной ионизации:  $5,0 \cdot 10^{-12} \mu_B$  и  $3,2 \cdot 10^{-11} \mu_B$  (с уровнем достоверности 90%). Началась модернизация спектрометра.

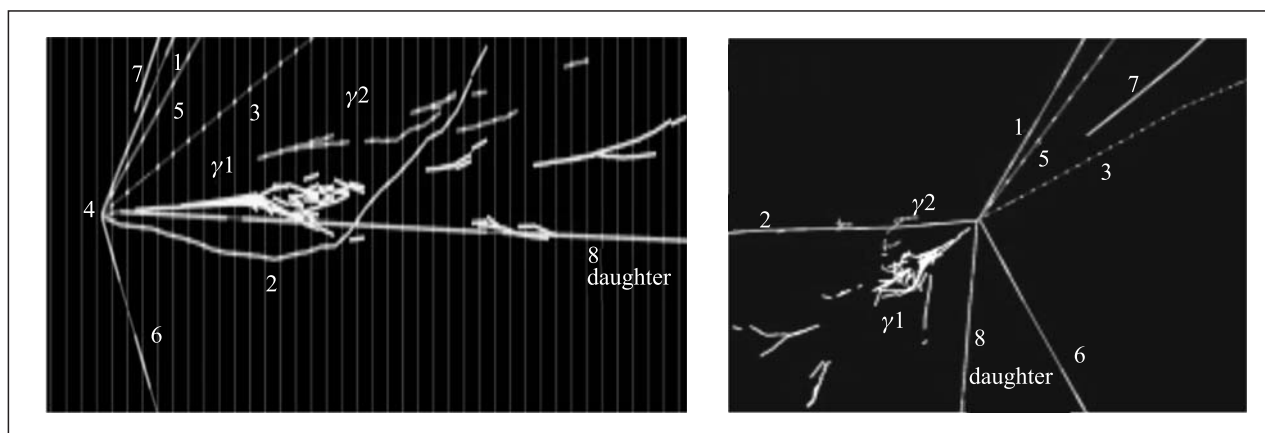


Рис. 1. Первое в мире наблюдение нейтринных осцилляций в режиме появления новых типов нейтрино

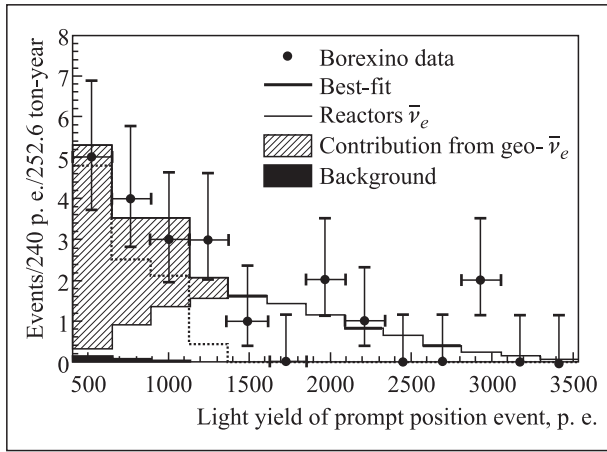


Рис. 2. Экспериментальный спектр антинейтрино, зарегистрированный за 537 дней набора данных на детекторе BOREXINO. Заштрихованная область соответствует вкладу геонейтрино в полный спектр, ожидаемый спектр реакторных антинейтрино отмечен тонкой линией. Ожидаемый фон (черная область в начале шкалы) пренебрежимо мал

Детектор **NEMO-3**, расположенный в подземной лаборатории Модан (LSM, Франция), направлен на поиск двойного безнейтринного бета-распада, который позволит определить такие параметры новой физики за пределами стандартной модели, как абсолютная шкала нейтринных масс, природа нейтрино (дираковскую или майорановскую), иерархия нейтрино. Целью проектов NEMO-3/SuperNEMO является измерение эффективной майорановской массы нейтрино  $\langle m_\nu \rangle$  на уровне 0,2–1,0/0,04–0,1 эВ

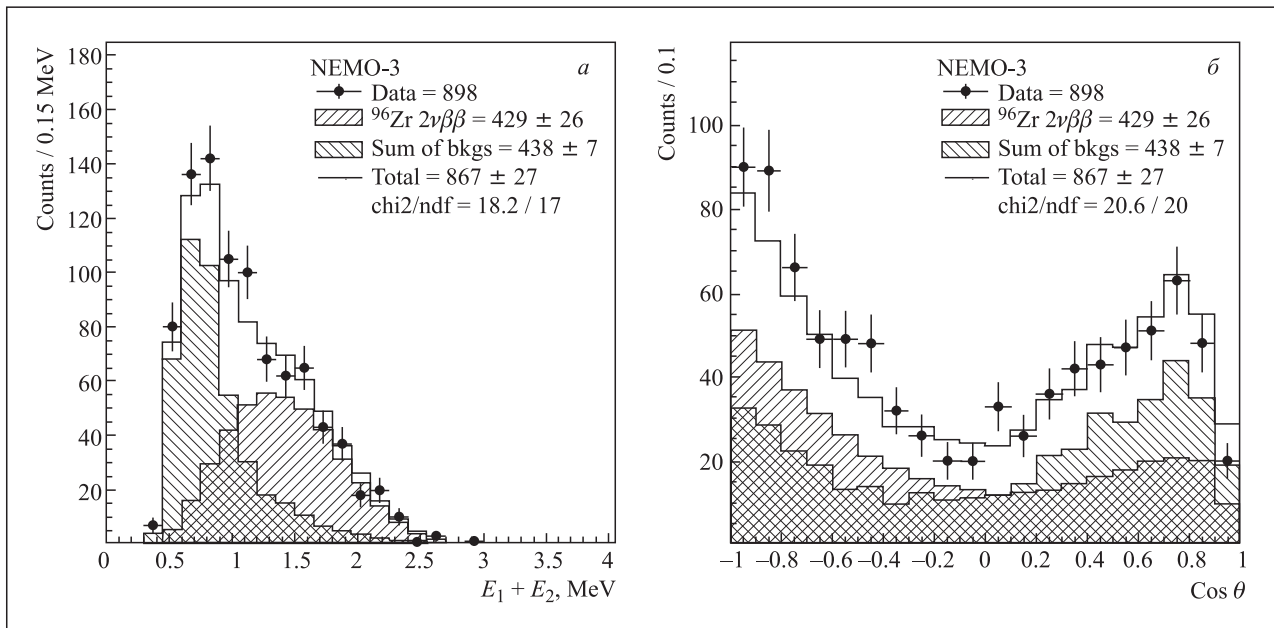


Рис. 3. Распределение полной энергии электронов (а) и угла между электронами (б) в двойном бета-распаде  $^{96}\text{Zr}$ , измеренные детектором NEMO-3

$(T_{1/2}^{0\nu 2\beta}(^{100}\text{Mo})/T_{1/2}^{0\nu 2\beta}(^{82}\text{Se})) \sim 4 \cdot 10^{24}/2 \cdot 10^{26}$  лет соответственно.

В 2010 г. на детекторе NEMO-3 завершается набор данных. Полная статистика, набранная с февраля 2003 г. до ноября 2010 г., составила  $\sim 2246$  сут (6,1 лет). Получены обновленные результаты для двойного бета-распада на основе данных, набранных за 4,5 года:  $T_{1/2}^{0\nu 2\beta}(^{100}\text{Mo}) > 10^{24}$  лет,  $\langle m_\nu \rangle < 0,47\text{--}0,96$  эВ (уровень достоверности 90%). Изучение продолжается. Для  $^{96}\text{Zr}$  время полураспада составило  $T_{1/2}^{0\nu 2\beta}(^{96}\text{Zr}) = [2,35 \pm 0,14(\text{stat.}) \pm 0,16(\text{syst.})] \times 10^{19}$  лет (рис. 3) [4, 5].

Интернациональный эксперимент **EDELWEISS-II**, проводящийся с активным участием физиков из ЛЯП ОИЯИ, направлен на поиск WIMP-частиц небарионной темной материи при помощи криогенных HPGe-детекторов. Целью эксперимента является обнаружение рассеяния частиц WIMP из галактики Млечный путь на ядрах германия.

В 2010 г. в эксперименте была набрана эффективная экспозиция в 322 кг·сут. Сечения спин-независимого взаимодействия WIMP–нуклон на уровне выше  $5,0 \cdot 10^{-8}$  пб ( $5,0 \cdot 10^{-44}$  см<sup>2</sup>) исключаются с 90%-м уровнем достоверности для WIMP с массой 80 ГэВ/c<sup>2</sup>. Это один из трех лучших результатов в мире (вместе с экспериментами CDMS и XENON100). Уже в 2011 г. в эксперименте планируется достичь лучшей чувствительности в мире на уровне  $10^{-44}$  см<sup>2</sup>, а дальнейшей целью является достижение уровня лучше  $4 \cdot 10^{-45}$  см<sup>2</sup> для WIMP с массой в районе 100 ГэВ, что позволит проверить большой класс суперсимметричных моделей и значительно улучшить имеющуюся экспериментальную чувствительность к детектированию WIMP [6, 7].

**GERDA** и **MAJORANA** являются экспериментами нового поколения, нацеленными на поиск безнейтринного двойного бета-распада  $(0\nu\beta\beta)$   $^{76}\text{Ge}$ . В 2010 г. был достигнут значительный прогресс в разработке и вводе в строй эксперимента GERDA [8]. Сборка установки была закончена летом 2010 г. Затем начались работы по физическому пуску и тестовым измерениям с первым стрингом, состоящим из трех «раздетых» германиевых детекторов из натурального Ge, которые помещены внутри криостата, заполненного 90 т жидкого аргона.

В настоящее время коллаборация GERDA проводит интенсивные исследования по изучению содержания и пространственного распределения  $^{42}\text{Ar}$  в установке LAr, проверяя влияние различных потенциалов электрического поля в жидком аргоне вблизи детекторов и исследуя форму импульсов фоновых событий.

В первой фазе эксперимента GERDA жидкий аргон используется только в качестве пассивной защиты. Для дальнейшего снижения фона на следующих фазах эксперимента необходимо разработать дополнительные методы активного подавления фоновых событий. Собранная установка-прототип LArGe, рассчитанная на работу с 1,4 т жидкого аргона в качестве сцинтиллятора и девятью Ge-детекторами, предназначена в первую очередь для отработки методов подавления внутреннего фона Ge-детекторов за счет антисовпадений с LAr сцинтилляционными сигналами. Другая задача установки LArGe — это проведение R&D-работ с перспективными для второй фазы GERDA детекторами нового типа BEGe (Broad-Energy Germanium).

Космический детектор ТУС предназначен для исследования спектра, состава и углового распределения космических лучей в области  $10^{19}$ – $10^{20}$  эВ. Он состоит из оптического зеркала Френеля и ма-

трицы  $16 \times 16$  фотоумножителей в качестве фотоприемника в его фокальной плоскости. С высоты 400–500 км предполагается измерять флюоресцентное излучение широких атмосферных ливней, образованных частицами сверхвысокой энергии в области ГЗК-обрезания.

ОИЯИ совместно с ОАО «Консорциум "Космическая регата"» (г. Королев) создают наиболее сложную часть установки — составное фокусирующее зеркало Френеля площадью  $\approx 2 \text{ м}^2$  для работы в открытом космосе с перепадом температур  $\pm 80^\circ\text{C}$ . В течение 2010 г. проведены термовакуумные и вибрационные испытания ТО, обрабатывалась методика измерения оптических параметров. В настоящее время заканчивается изготовление полетного образца детектора ТУС, в том числе зеркала Френеля. Запуск и начало набора данных планируется с осени 2011 г. с борта спутника «Михаил Ломоносов» [9].

Детектор **НУКЛОН** предназначен для исследования спектра и состава космических лучей в области  $10^{11}$ – $5 \cdot 10^{14}$  эВ и состоит из кремниевых и сцинтилляционных детекторов, углеродной мишени, а также вольфрамового конвертора  $\gamma$ -квантов. ОИЯИ отвечает за создание сцинтилляционной системы быстрого триггера (ССБТ), целью которой является способность регистрации всех событий с целью выборки событий в диапазоне энергий  $10^{11}$ – $5 \cdot 10^{14}$  эВ и выработки управляющих команд для электроники других детекторов. ССБТ содержит перестраиваемые триггеры 1-го и 2-го уровней и состоит из трех модулей. В 2010 г. был изготовлен полетный образец ССБТ. В 2011 г. планируется изготовление полетного образца триггерной электроники и проведение испытаний на долговременную стабильность технологического образца ССБТ, изготовленного раньше [10].

## ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В рамках проекта **CDF** основными результатами 2010 г. были получение средней массы топ-кварка, соответствующей неопределенности  $1,16 \text{ ГэВ}/c^2$ ; поиски хиггс-бозона и обеспечение эффективной работы CDF II. Полная статистика, полученная в 1992–1996 гг. (во время Run-I) вместе с данными, набираемыми с 2011 г. (во время Run-II), составила  $5,6 \text{ фб}^{-1}$ . С учетом корреляции неопределенностей была получена средняя масса топ-кварка  $M_{\text{top}} = (173,13 \pm 0,67(\text{стат.}) \pm 0,95(\text{сист.})) \text{ ГэВ}/c^2$ , что соответствует  $1,16 \text{ ГэВ}/c^2$  полной неопределенности или  $0,67\%$  от точности [11, 12].

На основе сгруппированных данных **CDF** и **D0** при  $\sqrt{s} = 1,96 \text{ ТэВ}$  был выполнен прямой по-

иск хиггс-бозона при протон-антипротонных столкновениях на тэватроне [13]. По сравнению с предыдущими измерениями для получения необходимой чувствительности были добавлены новые данные, включены в рассмотрение дополнительные новые каналы, а каналы, использованные ранее, были повторно проанализированы.

На основе  $5,9 \text{ фб}^{-1}$  данных CDF и  $6,7 \text{ фб}^{-1}$  данных D0 с 95%-м уровнем достоверности установлены верхние пределы на сечение рождения хиггс-бозона для масс  $m_H = 115 \text{ ГэВ}/c^2$  и  $165 \text{ ГэВ}/c^2$ , эти пределы составили 1,56 и 0,68 от значений, предсказанных стандартной моделью. В результате с 95%-м уровнем достоверности исключено рожде-

ние бозона Хиггса в области масс  $158 < m_H < 175 \text{ ГэВ}/c^2$  (рис. 4).

В 2010 г. на основе самых первых данных с установки **ATLAS**, так называемых минимум-байэс

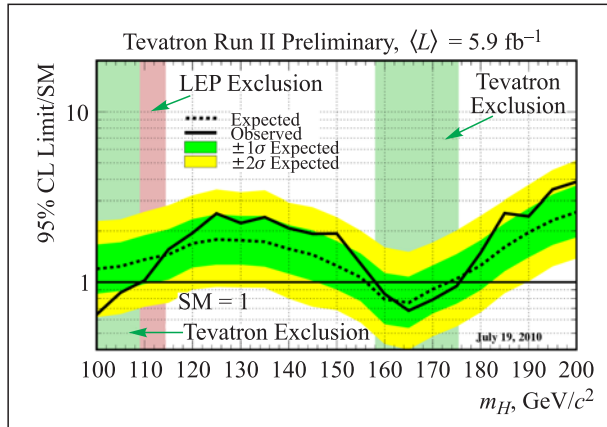


Рис. 4. Новая область для массы хиггс-бозона

событий, сотрудниками ЛЯП ОИЯИ были проведены поиски и идентификации  $\rho(770)$ - и  $\phi(1020)$ -мезонов, образованных в столкновениях протонов LHC при 7 ТэВ. Были также проанализированы данные с особенно большой множественностью как для столкновений при 900 ГэВ, так и для данных при энергии 7 ТэВ. Внимание было уделено анализу неопределенностей при выделении струй, а также их калибровке и измерению их сечений.

С целью наблюдения  $\phi(1020)$ -мезонов посредством их распадов на два заряженных каона сотрудниками ОИЯИ проанализированы данные, накопленные в эксперименте ATLAS во время первых месяцев работы ускорителя LHC с энергией протонов 3,5 ТэВ и полной накопленной светимостью примерно  $405 \text{ мкб}^{-1}$ . Эти каоны были идентифицированы путем измерения потерь энергии во внутреннем пиксельном детекторе треков установки ATLAS. Для фитирования данных были использованы различные подходы. Они все показали, что измеренные параметры  $\phi(1020)$ -мезона (масса и ширина) находятся в согласии с мировыми данными.

В работе сотрудников ЛЯП [14] обращено внимание на новую возможность обнаружения проявлений новой физики в двухструйных событиях, образованных в результате адронных столкновений. Принято считать, что практически все модели новой физики предсказывают, что эти две струи, будучи продуктами распада экзотического состояния, «населяют» центральную по быстроте область, т.е. значения их быстрот  $y_{1,2} \sim 0$ . Распады же возбужденных  $Z^*$ -бозонов на две струи не дают вклада именно в эту область. Наличие таких бозонов приводит к избытку двухструйных событий по отношению к практически постоянному в терминах  $\chi = e^{|y_1 - y_2|}$  фону КХД как раз вне этой области. При определенном выборе параметров такое поведение приводит к провалу в

центральной области распределения по инвариантой массе двух струй, в то время как основная часть экзотических моделей, наоборот, предсказывает наличие горба в этой области. Данная возможность интенсивно исследуется в настоящее время на данных ATLAS.

Был проведен поиск экзотического барион-пентакварка  $\theta^+$  посредством его возможного распада на протон и нейтральный каон. Был проанализирован набор данных, полученных при энергии 7 ТэВ во время периодов светимости А и В (что соответствует примерно 76,1 млн событий типа минимум-байэс). Нейтральный каон был идентифицирован с помощью его двухчастичного V0-подобного распада на заряженные пионы, а протоны были идентифицированы посредством измерения потери энергии во внутреннем детекторе ATLAS. Не удалось обнаружить никакого узкого резонансного состояния в ожидаемой области инвариантных масс протона и каона, в отличие от хорошо наблюдаемых пиков известных частиц  $K^*(890)^+$ ,  $\Lambda$ - и  $\Lambda(1520)$ -барионов.

Начиная с 2010 г. ОИЯИ принял участие в новой и быстро развивающейся компьютерной деятельности коллаборации ATLAS, касающейся так называемой Tier-3 активности. Задача гридовского узла Tier-3 — проведение физического анализа, дополнительного к узлам Tier-2s (разгрузка этих общих узлов). Наличие таких узлов позволит вести интерактивный анализ отдельным ученым на базе локальных компьютерных ресурсов. Здесь будет удобно проводить ускоренную обработку данных путем распараллеливания вычислительных процессов с помощью пакета PROOF. То же самое можно будет делать в направлении доступа к данным с помощью распределенного хранилища данных Xrootd. Прототип ATLAS Tier-3 уже запущен на компьютерной ферме ЛЯП.

В 2010 г. в рамках эксперимента **DIRAC** происходил набор данных в течение 6 мес. для наблюдения атомов, состоящих из  $\pi^-$  и  $K$ -мезонов, и для улучшения точности измерения времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атома. Было набрано данных на 30 % больше, чем в 2009 г. Были обработаны данные, набранные в 2008 и 2009 г. Данные, полученные в 2001–2003 гг., были переобработаны с учетом информации из всех детекторов. Число наблюдаемых  $\pi^+\pi^-$ -атомов составило более 21000. (В предыдущем анализе было восстановлено только 13300 атомов.) Было измерено время жизни основного состояния  $\pi^+\pi^-$ -атома  $\tau = 3,15 \cdot 10^{-15} \text{ с}$  с полной точностью, включающей статистическую и систематическую ошибки, около 9 %. Это позволило определить разность длин  $\pi\pi$ -рассеяния  $|a_0 - a_2| = 0,253 \text{ м}_\pi^{-1}$  с полной точностью около 4,3 %. Это немного лучше, чем точность в 5 %, запланированная для этого этапа эксперимента.

Работы по приложению результатов проекта SANC к физике на LHC ведутся с 2004 г. В со-

временном состоянии SANC включает в себя теоретические предсказания для многих трех- и четырехчастичных процессов стандартной модели на однопетлевом уровне точности. Группа выполнила точный анализ процессов типа Дрелла–Яна, что вместе с включением в SANC простых КХД-процессов и учетом вкладов фотонных подпроцессов практически завершило эту часть исследований. Затем группа

выполнила точные расчеты вероятности полуплеетонных распадов топ-кварка. В течение 2010 г. система SANC была расширена для более сложных процессов физики на ЛHC. Главный результат 2010 г. — появление работ [15, 16], которые непосредственно связаны с анализом первых экспериментальных данных ЛHC и написаны в сотрудничестве с физиками ЦЕРН.

## ФИЗИКА НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

С помощью спектрометра ANKE на ускорителе COSY (Юлих) изучались взаимодействия адронов при промежуточных энергиях. Исследован процесс жесткого тормозного излучения в протон-протонных столкновениях. Фоторасщепление дейтрона  $\gamma d \rightarrow pn$  давно используется при изучении фундаментальных свойств нуклонов на малых расстояниях. Подобную, но независимую информацию может дать и расщепление дипротонов. В отсутствие свободных дипротонов оно изучалось ранее с дипротонными парами, формируемыми внутри легких ядер, поэтому уровень физического фона был большим. Был исследован обратный процесс фоторасщепления дипротона  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ , свободный от подобных трудностей [17]. В диапазоне энергий пучка 353–800 МэВ измерены дифференциальные сечения при малых углах вылета дипротона. В энергетической зависимости сечения обнаружен широкий пик, согласующийся с возбужденным состоянием  $\Delta(1232)N$ . Сечение образования дипротонных пар в этой реакции по величине на два порядка ниже, чем сечение фотодезинтеграции дейтрона.

В рамках проекта PEN в Институте Пауля Шеррера (PSI, Швейцария) завершен набор статистики по измерению относительной вероятности распада  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu(\gamma)$ . Установка PIBETA в PSI была модернизирована с целью ее оптимизации для измерения относительной вероятности распада  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu(\gamma)$ . Была изготовлена «безмассовая» (плотность конструктивных материалов 0,1–0,2 г/см<sup>3</sup>) времяпроекционная камера m-TPC, позволившая восстанавливать вершины распада пиона в мишени и проводить коррекцию потерь энергии пиона, мюона и позитрона. Также она позволила исключать события с пионами и мюонами, распавшимися на лету. К настоящему моменту в эксперименте остановлено  $3,94 \cdot 10^{11}$  пионов и зарегистрировано  $2,12 \cdot 10^7$  нефилтрированных событий распада  $\pi \rightarrow e \nu$ , что соответствует статистической неопределенности лучше  $\delta B/B = 5 \cdot 10^{-4}$  [18].

На установке MEG, созданной для поиска распада  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ , в 2010 г. проведен очередной физический сеанс по набору статистики. Одновременно идет обработка уже набранных в предыдущих сеан-

сах данных. По результатам сеанса 2008 г. полученное в 2010 г. ограничение на вероятность распада составляет  $< 2,8 \cdot 10^{-11}$  после анализа  $\sim 10^{14}$  распадов мюонов. По результатам статистики 2009 г. это значение должно быть улучшено [19]. Этот распад интересен тем, что запрещенный в стандартной модели в некоторых фундаментальных теориях он может проходить на уровне, достижимом в данном эксперименте. Поэтому этот эксперимент имеет реальный шанс показать наличие новой физики за пределами стандартной модели. Даже если распад не будет зарегистрирован на таком уровне чувствительности, будут даны ограничения на многие экзотические фундаментальные теории.

В 2010 г. в совместном ОИЯИ–INFN (Италия) эксперименте PAINUC продолжались обработка и анализ имеющихся данных по  $\pi^{\pm 4}\text{He}$ -взаимодействию, а также по улучшению параметров пучка пионов с энергиями ниже  $\Delta$ -резонанса в мюонном тракте фазотрона ЛЯП. Из полученных результатов можно отметить наблюдение рождения одиночных  $\gamma$ -квантов при упругом рассеянии отрицательных пионов с энергией 68 МэВ, ранее это явление наблюдалось при энергии 106 МэВ. Если рассматривать ядро как черное тело, то планковские температуры, соответствующие энергиям 68 и 106 МэВ, оказываются равными  $14,4 \pm 1,6$  и  $(14,6 \pm 1,1)$  МэВ соответственно. В 2010 г. также создана полуэмпирическая модель возбуждения коллективных резонансов, объясняющая параметры неупругого рассеяния пионов на ядрах в области  $\Delta$ -резонанса, в частности распределение инвариантных масс трех нуклонов, наблюдаемое при поглощении положительных пионов в гелии [20].

Проведенные в 2010 г. в рамках проекта МЮОН эксперименты были нацелены на изучение акцепторных центров в германии и алмазе с помощью поляризованных отрицательных мюонов. В предыдущих экспериментах не было обнаружено сдвига частоты прецессии спина мюонов в алмазе на уровне  $5 \cdot 10^{-3}$ . Сейчас эксперименты были выполнены на модифицированной установке ALC в PSI в магнитном поле 14 кГс и диапазоне температур 15–330 К для улучшения точности измерения сдвига ча-

стоты. Было обнаружено, что в поликристаллическом образце алмаза D6 амплитуда мюонной поляризации не зависит от температуры, и положительный (парамагнитный) сдвиг частоты прецессии спина мюонов не наблюдается. Более того, есть указание на аномально большой отрицательный сдвиг частоты ( $-1,4 \cdot 10^{-3}$ ) в температурном диапазоне 80–250 К. Наблюдаемый сдвиг намного больше, чем ожидаемый от магнитной восприимчивости и химического сдвига  $^{11}\text{B}$ , который имитируется мюонным атомом, в алмазе. Для окончательных выводов необходимы измерения с лучшей точностью на основе большей статистики [21, 22].

Было продолжено изучение систем с объектами нанометровых размеров. С помощью метода электронного парамагнитного резонанса получена информация о парамагнитных центрах в полимерной матрице мембран, проведено определение концентрации нитроксильного радикала и вращательной подвижности спинового зонда в них. Был получен патент на способ выделения и очистки ДНК и РНК с помощью монодисперсных сферических частиц размером 100–500 нм [23].

Согласно рекомендации 31-й сессии ПКК ОИЯИ по ядерной физике, разработан проект «Экспериментальное исследование реакций ядерного синтеза в системе  $pt\mu$ » (проект ТРИТОН). Цель проекта состоит в получении новых экспериментальных данных для реакций синтеза в среде изотопов водорода, катализируемых отрицательными мюонами, в той области, где данные отсутствуют или противоречат современной теории. С помощью методов, развитых при решении экспериментальных задач в мюонном катализе, будет изучено явление  $pt$ -синтеза в мюонной молекуле  $pt\mu$ . Планируется обнаружить конверсию  $e^+e^-$ -пар в выходном канале реакции  $pt$ -синтеза, ко-

торая не наблюдалась «на лету» (beam-target) и в  $pt\mu$ -молекулах. Также будет очень важно прояснить имеющееся значительное расхождение теоретических ожиданий и эксперимента в  $pt\mu$ -системе (каналы с выходом  $\gamma$  и  $\mu$ ):  $pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma$ ,  ${}^4\text{He} + \mu(\text{conv})$ ,  ${}^4\text{He}\mu + e^+e^- + 19 \text{ МэВ}$ . Эксперимент будет проведен в ОИЯИ (Дубна) на установке ТРИТОН. Специально созданная мишень объемом  $50 \text{ см}^3$ , заполненная жидкой смесью  $pt$  (1%  ${}^3\text{H}$ ), будет экспонироваться на пучке отрицательных мюонов ( $10^4 \text{ с}^{-1}$ ,  $100 \text{ МэВ}/c$ ) фазотрона ОИЯИ.

В рамках проекта NN-GDH в декабре 2009 г. при определяющем участии сотрудников ЛЯП был проведен успешный запуск поляризованной мишени в рабочих условиях с пробным набором статистики. Были начаты исследования двойных спиновых асимметрий во взаимодействиях поляризованных фотонов с энергией  $E_{\text{лаб}} \leq 1,5 \text{ ГэВ}$  на поляризованной дейтронной мишени. В 2010 г. успешно проведены сеансы с использованием пучка поляризованных фотонов ускорителя MAMI C на новой поляризованной мишени по следующей экспериментальной программе: первое измерение спиновой асимметрии в фоторождении мезонов при энергиях до 1500 МэВ с использованием линейно-поляризованного фотонного пучка и поперечно-поляризованной протонной мишени; измерение поперечных асимметрий  $T$  и  $F$  в фоторождении  $\eta$ -мезона в области резонанса S11(1535) с использованием циркулярно-поляризованного фотонного пучка и поперечно-поляризованной протонной мишени; измерение спиральной зависимости одно- и двухпионного процесса фоторождения и интеграла GDH на нейтроне с использованием циркулярно-поляризованных фотонов с энергией до 1450 МэВ и продольно-поляризованной дейтронной мишени.

## ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И УСКОРИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

В последнее годы в развитых странах проблема онкологических заболеваний встала особенно остро, являясь второй по численности причиной всех смертей. Одним из наиболее эффективных методов лечения онкологических заболеваний является терапия протонами и легкими ионами, так как она позволяет позиционировать облучение точно на раковой опухоли, минимизируя дозу, полученную здоровыми органами, окружающими опухоль.

В ЛЯП ОИЯИ были рассмотрены возможные причины потерь пучка в процессе ускорения в циклотроне С235, проанализировано влияние основных резонансов, изучено влияние радиальной составляющей магнитного поля в медианной плоскости ускорителя. Были осуществлены расчеты системы вывода, в результате система вывода пучка была успешно мо-

дернизирована. Эффективность вывода возросла с 60 до 77%. По результатам проведенного анализа в конструкцию серийного циклотрона С235 внесены существенные изменения. Новая версия циклотрона С235 V3 будет введена в эксплуатацию в Димитровградском центре радиационной медицины. В настоящее время все основные системы циклотрона изготовлены. В 2011 г. планируется осуществить сборку, а в 2012 г. провести пусконаладочные работы циклотрона в ОИЯИ.

В последние годы во всем мире растет интерес к адронной терапии ядрами  $^{12}\text{C}^{6+}$ . По заказу и в сотрудничестве с фирмой ИВА (Бельгия) произведены теоретические исследования динамики пучка и основных систем сверхпроводящего циклотрона С400. Результаты компьютерного моделирования по-

казали, что можно ускорить ионы углерода до энергии 400 МэВ/нуклон ( $K = 1600$ ) в циклотроне, спроектированном аналогично дизайну серийного протонного циклотрона фирмы IBA C235. Начиная с ионного источника и принимая во внимание коэффициенты прохождения пучка не выше расчетных, получили коэффициент прохождения пучка через все системы циклотрона. Коэффициент прохождения от источника и после системы вывода составляет 13 %. Это, конечно, высокий, но, безусловно, достижимый результат. Циклотрон С400 также обеспечит потребителя протонный пучком с энергией 265 МэВ. Потери пучка на перезарядку при взаимодействии с остаточным газом не превысят 10 %. Изготовление циклотрона С400 началось в 2010 г. в рамках проекта Archade (Франция) [24].

Основной целью исследований в рамках темы «Проведение медико-биологических исследований на адронных пучках ОИЯИ» является осуществление на базе Медико-технического комплекса (МТК) ЛЯП ОИЯИ медико-биологических и клинических исследований по лечению онкологических больных, совершенствование оборудования и аппаратуры и разработка новых методов лучевой терапии и сопутствующей диагностики онкологических больных на медицинских адронных пучках фазотрона ОИЯИ. Совместно с Медицинским радиологическим научным центром (г. Обнинск) и радиологическим отделением МСЧ-9 проводились регулярные сеансы протонной терапии по клиническому исследованию эффективности при лечении различных новообразований. В течение года проведено семь лечебных циклов суммарной продолжительностью 28 недель. На медицинском протонном пучке курс фракционированного лучевого лечения прошли 124 пациента, при этом общее количество протонных терапевтических облучений (полей) превысило 6000. Кроме того, на гамма-аппарате «Рокус-М» были пролечены еще 16 пациентов. Приобретено все необходимое оборудование и освоена технология изготовления болюсов (замедлителей протонного пучка сложной формы) из специального воска для машинной обработки с использованием ЧПУ фрезеровального станка. Это позволило повысить точность воспроизведения формируемого дозного распределения пучка в сеансах терапии. Раз-

работан и изготовлен макет многопесткового коллиматора протонного пучка на четыре пары пластин. Макет послужит прообразом полномасштабного варианта устройства на 33 пары пластин, необходимого для реализации так называемого динамического метода облучения протонным пучком различных новообразований.

Совместно с сотрудниками Отдела радиационной дозиметрии Института ядерной физики (Прага, Чехия) проводились работы по измерению фоновых условий в кабине протонной терапии №1 с использованием термолюминесцентных и трековых детекторов. По результатам измерений была скорректирована система формирования пучка в кабине. Совместно с сотрудниками Института атомной энергии, Отвоцк-Сверк, Польша, были проведены измерения по определению коэффициента качества излучения в протонном пучке с помощью рекомбинационной камеры. Совместно с сотрудниками Великопольского онкологического центра (г. Познань) проведены дозиметрические исследования по формированию протонного пучка с помощью болюсов, изготовленных на основе разработанной технологии их производства из воска. Измерения подтвердили высокую точность формирования дозного поля протонного пучка, что позволило использовать данную технологию в сеансах протонной терапии, проводимых в МТК. Совместно с сотрудниками Отдела радиационной дозиметрии Института ядерной физики (Прага, Чехия) проводились работы по изучению спектров ЛПЭ терапевтических пучков ионов  $^{12}\text{C}$  с энергиями 135, 290 и 400 МэВ/нуклон. Совместно с сотрудниками Межуниверситетского ускорительного центра (Нью-Дели, Индия) изучались характеристики различных типов термолюминесцентных детекторов, изготовленных с использованием нанокристаллических термолюминесцентных фосфоров. Работы проводились в рамках российско-индийского гранта РФФИ совместно с сотрудниками ЛРБ ОИЯИ и ФИАН.

Был спроектирован и изготовлен вариант устройства лазерного облучения биологических объектов для их защиты от повреждающего действия ионизирующего излучения для практического использования. Работа устройства была успешно проверена на мышцах линии C57BL/6 [25].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agafonova N. et al. (OPERA). Observation of a First  $\nu_\tau$  Candidate in the OPERA Experiment in the CNGS Beam // Phys. Lett. B. 2010. V. 691. P. 138–145.
2. Bellini G. et al. Observation of Geo-neutrinos // Phys. Lett. B. 2010. V. 687. P. 299–304.
3. Fiorentini G. et al. Nuclear Physics for Geo-neutrino Studies // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. P. 033006.
4. Argyriades J. et al. // Nucl. Phys. A. 2010. V. 847. P. 168–179.
5. Argyriades J. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 622. P. 120–128.
6. Armengaud E. et al. (EDELWEISS Collab.) First Results of the EDELWEISS-II WIMP Search Using Ge Cryogenic Detectors with Interleaved Electrodes // Phys. Lett. B. 2010. V. 687. P. 294–298.
7. Kozlov V. Yu. et al. (EDELWEISS Collab.) A Detection System to Measure Muon-Induced Neutrons for Direct Dark Matter Searches // Astropart. Phys. 2010. V. 34. P. 97–105.
8. Smolnikov A. A. for the GERDA Collab. Development and

- Installation of the GERDA Experiment // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. V. 203. P. 012059–012064.
9. Tkachev L. et al. Status of the TUS Space Experiment Preparation // Proc of the 35th Intern. Conf. of High Energy Physics (ICHEP2010), Paris, July 22–28, 2010.
  10. Булатов В.Л. и др. Тестирование технологического образца установки НУКЛОН на пионном пучке // ПТЭ. 2010. Т. 53, № 1. С. 34–41.
  11. Combination of CDF Top Quark Mass Measurements using up to  $5.6 \text{ fb}^{-1}$  of Data. CDF Note 10202.
  12. Flyagin V. B. et al. The Top Quark, Other New Phenomena Observed at the CDF in  $p\bar{p}$  Collisions at 1.96 TeV // Part. Nucl. 2010. V. 41, No. 3.
  13. CDF, D0 Collab. Combined CDF and D0 Upper Limits on Standard Model Higgs-Boson Production with up to  $6.7 \text{ fb}^{-1}$  of Data. arXiv:1007.4587.
  14. Chizhov M. V., Bednyakov V. A., Budagov J. A. A Unique Signal of Excited Bosons in Dijet Data from  $pp$  Collisions. hep-ph/1010.2648.
  15. Richardson P. et al. QCD Parton Showers and NLO EW Corrections to Drell–Yan. hep-ph/1011.5444.
  16. Aharrouche M. et al. Double Differential  $Z, W$  Cross Sections and Their Ratios in the Electron Channels. ATLCOM-PHYS-2010-325.
  17. Tsirkov D. et al. Energy Dependence of Hard Bremsstrahlung Production in Proton–Proton Collisions in the  $\Delta(1232)N$  Region // J. Phys. G.: Nucl. Part. Phys. 2010. V. 37. P. 105005.
  18. Pocanic D. et al. // Nucl. Phys. A. 2010. V. 844. P. 26–29.
  19. Adam J. et al. // Nucl. Phys. B. 2010. V. 834. P. 1–12.
  20. Angelov N. et al. Features of Pion Induced Collective Resonances in Nuclei. EPJA-101452.R1 (2010).
  21. Mamedov T. N. et al. Search for Magnetic Ordered Phase in ZnCoO Compound Using  $\mu\text{SR}$  Method // Phys. Part. and Nucl., Lett. 2010. V. 7, No. 6. P. 410–414.
  22. Барашикова И. И., Бунятова Э. И., Кравец Л. И. Полипропиленовые трековые мембраны — перспективный материал для тонких мишеней с поляризованными протонами. Препринт ОИЯИ Р18-2010-107; Перспективные материалы (направлено).
  23. Пузынин А. И., Репин М. В., Филин С. В. Method of Separating and Purifying Nucleic Acids. Patent RU 2 382 081 C2.
  24. Jongen Y. et al. Compact Superconducting Cyclotron C400 for Hadron Therapy // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 624, Iss. 1. P. 47–53.
  25. Мицын Г. В. и др. Протонная терапия на пучках фазотрона ОИЯИ // Сб. материалов III Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика-2010». М., 2010. С. 308.