



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМ. В. П. ДЖЕЛЕПОВА

ФИЗИКА НЕЙТРИНО И РЕДКИХ ПРОЦЕССОВ

В 2013 г. группа ОИЯИ в составе коллаборации **Daya Bay** провела два новых анализа данных. В этом эксперименте регистрируется число событий взаимодействия электронных антинейтрино, испущенных реакторами Daya Bay и Ling Ao в ближних и дальних детекторах, каждый из которых заполнен жидким сцинтиллятором, легированным гадолинием. В первом анализе, не учитывающем энергию частиц [1], был исследован дефицит электронных антинейтрино на основании информации о потоке, содержащей в три раза большее количество событий, чем было использовано в предыдущем анализе 2012 г., приведшего к открытию ненулевого значения θ_{13} . В результате было найдено значение $\sin^2 2\theta_{13} = 0,089 \pm 0,01$ (стат.) $\pm 0,005$ (сист.). Во втором анализе [2], который был произведен на еще большей статистике, использована информация об энергии антинейтрино. В результате было уточнено значение амплитуды осцилляций $\sin^2 2\theta_{13} = 0,090^{+0,008}_{-0,009}$. Также в анализе была получена разница квадратов масс $\Delta m_{ee}^2 = 2,59^{+0,19}_{-0,20}$.

В 2013 г. в эксперименте **OPERA** продолжался анализ данных, набранных в период 2008–2012 гг. на пучке CNGS. Всего за пять лет было зарегистрировано около 18 000 нейтринных взаимодействий в мишени. Среди них — 56 событий с образованием очарованных частиц, 32 события с электронными нейтрино и 3 события с тау-нейтрино. В настоящее время проанализировано около 55 % событий и анализ продолжается в 10 научных центрах, имеющих автоматические микроскопы (включая Дубну). В 2013 г. был проведен уточненный расчет эффективности и влияния фоновых процессов при регистрации тау-нейтрино. С новыми оценками статистическая значимость наблюдения трех событий на фоне 0,18 ожидаемых от фона составляет 3,4 стандартных отклонения [3–6].

Главным результатом 2013 г. для коллаборации **Borexino** является более точное измерение потока геонейтрино [7]. Результаты по измерению потоков солнечных нейтрино на первом этапе набора данных на детекторе приведены в [8], где представлены детали анализа как для уже опубликованных результатов, так и для ранее не опубликованных результатов поиска сезонных вариаций потока бериллиевых нейтрино. Опубликована также статья по фонам от космических мюонов [9]. Данные «Borexino» использовались для установления ограничений на примесь тяжелого нейтрино в распаде $8B$. Новые пределы превосходят полученные ранее другими группами в ускорительных и реакторных экспериментах [10].

В 2013 г. основные работы в эксперименте **EDELWEISS** были связаны с установкой и тестированием новых детекторов с увеличенным чувствительным объемом и высокой эффективностью к подавлению фона поверхностных событий. В эксперименте используются инновационные детекторы массой 800 г, в которых торцевые и боковые поверхности германиевых кристаллов имеют систему кольцевых электродов (детекторы FID800). Экспериментально удалось продемонстрировать, что данные детекторы по крайней мере на порядок лучше подавляют фон по сравнению с используемыми ранее в EDELWEISS ID400-детекторами. В 2013 г. протестировано и откалибровано ~ 10 кг новых детекторов. Кроме использования новых детекторов вся установка подверглась значительному улучшению. Это коснулось системы защиты, криогенной системы, использования новой быстрой электроники для набора данных [11, 12].

Целью проекта **NEMO-3/SuperNEMO** является исследование безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$), который является указателем на новую

фундаментальную физику за рамками Стандартной модели, такую как абсолютная шкала масс нейтрино, природа нейтрино (дираковская или майорановская), иерархия масс нейтрино. Наблюдение $0\nu\beta\beta$ -распада позволит разрешить такие актуальные вопросы фундаментальной физики, как CP-нарушение, лептогенезис. Главным преимуществом проекта NEMO-3/SuperNEMO является использование уникальной потенциально бесфоновой трекокалометрической техники, которая позволяет получить $\beta\beta$ -сигнатуру, составляющую треки и энергии электронов, измеренные с помощью трековой камеры и калориметра. Это позволяет проверить механизм $0\nu\beta\beta$ -моды в случае ее обнаружения. В 2013 г. был проведен окончательный анализ данных NEMO-3. Получено ограничение $T_{1/2}(0\nu\beta\beta) > 1,1 \cdot 10^{24}$ лет (90 %-й С.Л.), соответствующее пределу на эффективную майорановскую массу нейтрино: $\langle m_e \rangle < 0,3-0,8$ эВ, который сопоставим с лучшими $\beta\beta$ -результатами в мире [13]. Кроме того, ведутся анализ и подготовка к публикациям результатов NEMO-3 для других ядер — « $\beta\beta$ -фабрика» (моды $0\nu\beta\beta$ и $2\nu\beta\beta$ для ^{100}Mo , ^{82}Se , ^{116}Cd , ^{130}Te , ^{150}Nd , ^{96}Zr и ^{48}Ca) [14].

Целью эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge . В эксперименте оперируют с открытыми германиевыми детекторами из обогащенного ^{76}Ge , погруженными непосредственно в жидкий аргон. В 2013 г. была завершена 1-я фаза эксперимента. Проанализированы данные, которые непрерывно набирались с ноября 2011 г. по май 2013 г., что составило общую экспозицию 21,6 кг·лет. В первой фазе эксперимента GERDA был достигнут низкий фон $1 \cdot 10^{-2}$ с/кэВ·кг·лет в области поиска эффекта. Положительный сигнал не был обнаружен, полу-

чен новый нижний предел $T_{1/2} > 2,1 \cdot 10^{25}$ лет (90 %-й С.Л.). Комбинация с пределами, определенными в экспериментах HdM и IGEX, дает еще более строгий нижний предел $T_{1/2} > 3,0 \cdot 10^{25}$ лет (90 %-й С.Л.), при этом вероятность существования двойного безнейтринного бета-распада с $T_{1/2} = 1,19 \cdot 10^{25}$ лет оценивается как 0,02 % [15, 16]. Началась интенсивная подготовка ко 2-й фазе эксперимента (GERDA Phase II).

В 2013 г. в проекте «Байкал» была окончена отработка элементов детектора, начат монтаж первого кластера нейтринного телескопа НТ1000 кубокилометрового объема. Во время зимней экспедиции 2013 г. были смонтированы три полномасштабных гирлянды кластера и установка запущена как полноценный работающий детектор со всеми элементами и системами полного кластера. Первичный анализ полученных данных показал высокую стабильность работы детектирующих элементов и подтвердил ожидаемую точность измерительных систем и эффективность используемых калибровочных методов, так же как и эффективность процедур отбора событий и подавления шума.

Разработана и реализована система удаленного управления и мониторинга работы телескопа. Анализ результатов натурных испытаний опытных образцов гирлянды создаваемого детектора НТ1000 показал достаточно высокое качество работы всех ее основных элементов: оптической системы регистрации, системы сбора и передачи данных, кабельных коммуникаций и технологических узлов. Созданы все предпосылки, чтобы в 2015 г. ввести в строй первый кластер нейтринного телескопа НТ1000, который будет по своей апертуре сравним с детектором ANTARES.

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В 2013 г. продолжался поиск суперсимметричных частиц в эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере в $p-p$ -соударениях при начальной энергии 8 ТэВ в с.ц.м. Анализировались данные с интегральной светимостью 20 фб^{-1} , когда в конечном состоянии измерялись по крайней мере один изолированный лептон (электрон или мюон), струи, как содержащие, так и не содержащие b -кварки, и большой недостающий поперечный импульс. Не наблюдалось заметного превышения над предсказаниями Стандартной модели. Полученные результаты использовались для установления пределов масс s -частиц для различных упрощенных моделей,

предполагающих рождение пар s -глюино, s -кварков первой и второй генерации и топ- s -кварков. Установлены также пределы на основе модели MSURGA/CMSSM и параметры модели минимальной дополнительной размерности [17].

Были сделаны предсказания о возможном наблюдении в эксперименте ATLAS проявления кварковых состояний в протоне, внутреннего чарма, в $p-p$ -процессах рождения прямых фотонов или векторных бозонов (W), сопровождающихся образованием c -струй или b -струй соответственно. Расчеты методом Монте-Карло показали, что учет таких кварковых состояний может увеличить спектры по попе-

речному импульсу p_T -фотонов, c - и b -струй, а также лептонов, образующихся от распада W -бозона, в 2–3 раза при больших p_T ($p_T > 100$ ГэВ/с) по сравнению с расчетами, не учитывающими вклад внутреннего чарма в протоне).

Была дана новая теоретическая интерпретация данных о спектрах заряженных адронов, рожденных в p - p -соударениях при их небольших поперечных импульсах, полученных коллаборацией ATLAS. Вычислено распределение непертурбативных глюонов в протоне при их малых поперечных импульсах, параметры которого были извлечены из данных ATLAS. Показано, что при совместном анализе этих данных, полученных на LHC в мягкой кинематической области, и данных HERA о глубоко неупругом электрон-протонном рассеянии можно извлечь информацию о масштабе насыщения распределения глюонов при малых передачах квадрата четырехимпульса Q^2 [18, 19].

В рамках проекта CDF основными результатами 2013 г. были: получение усредненного значения массы топ-кварка на основе данных тэватрона с точностью 0,87 ГэВ/с², изучение корреляций в событиях с высокой множественностью заряженных адронов, испытания в Дубне кристаллов типа LYSO как потенциальных элементов электромагнитного калориметра эксперимента «Mu2e» в FNAL, а также измерение эффективности работы сцинтилляционного счетчика в нейтронном пучке.

Коллаборации CDF и D0 при участии дубненской группы измерили среднее значение массы топ-кварка на основании значений, полученных в различных каналах распада пар топ-анти топ-кварков. Результат достигнут на статистике до 8,7 фб⁻¹. Комбинация этих измерений с учетом корреляции ошибок позволила получить наиболее точное значение массы топ-кварка $M_{\text{top}} = 173,20 \pm 0,51$ (стат.) $\pm 0,71$ (сист.) ГэВ/с², что соответствует полной неопределенности 0,87 ГэВ/с², или 0,50 %-й точности [20].

В 2013 г. были проведены: НИОКР для будущих экспериментов во FNAL — «Mu2e», ORKA, «ProjectX», в частности, с кристаллами типа LYSO, BaF2 и CsI; дальнейшие тесты прототипов сцинтилляционных счетчиков вето-системы совместно с коллегами из FNAL, а также моделирование элементов калориметра и вето-системы [21].

В 2013 г. дубненская группа в эксперименте D0 (FNAL) завершила новое измерение процесса с рождением высокоэнергетичного фотона и адронной струи в протон-антипротонных соударениях при суммарной энергии пучков тэватрона, равной 1,96 ТэВ. Сравнение результатов, опубликованных коллаборацией D0 в [22], с предсказаниями квантовой хромодинамики свидетельствует о необходимости усовершенствования теоретического аппарата для описания сильных взаимодействий в целом ряде кинематических областей, таких как большие и малые значе-

ния поперечного импульса прямого фотона, а также для объяснения зависимости от взаимной ориентации струи и фотона.

В рамках эксперимента DIRAC завершен анализ πK -данных, набранных в 2008–2010 гг., первая оценка времени жизни атомов $K^+\pi^-$ и π^+K^- составляет $\tau = 2,5_{-1,8}^{+3,0}$ фс. Выполнен предварительный анализ данных 2008–2010 гг. по изучению $\pi^+\pi^-$ -атомов. Идентифицировано около 22 000 событий развала $\pi^+\pi^-$ -атомов, что удваивает статистику для измерения времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома. Предварительный анализ данных, набранных в 2012 г., позволил осуществить первое наблюдение метастабильных состояний $\pi^+\pi^-$ -атомов.

Проект SANC включает теоретические предсказания для многих трех- и четырехчастичных процессов Стандартной модели на однопетлевом уровне точности (QCD и EW NLO). Важнейшим результатом 2013 г. является развитие и создание продвинутых версий инструментов моделирования Монте-Карло (интегратора и генератора) для анализа событий на LHC с учетом взаимного влияния следующих за ведущими поправок (NLO) QCD и EW [23, 24]. Эти продукты, дополненные расчетом вкладов поправок NNLO QCD с помощью программ других групп, уже использовались при анализе данных LHC.

В 2013 г. в эксперименте BES-III на электрон-позитронном коллайдере BEPC-II (ИФВЭ АН КНР, Пекин) продолжился набор данных в области резонансов чармония. Основной целью в 2013 г. был набор данных при энергии столкновений 4,2–4,4 ГэВ для изучения XYZ -состояний. Наибольшая статистика была накоплена в области резонансов $Y(4260)$ и $Y(4360)$. В марте 2013 г. коллаборация BES-III сообщила о наблюдении «заряженной чармоний-подобной структуры» $Z_c^+(3900)$ в реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^- Z_c^+ \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ при энергии столкновений $\sqrt{s} = 4,26$ ГэВ [25]. Позднее это наблюдение было независимо подтверждено данными экспериментов BELLE и CLEO-c. Высокая вероятность перехода Z_c в J/ψ требует наличия в его составе пары очарованных кварка и антикварка, а отличный от нуля электрический заряд делает минимально возможную структуру Z_c^+ четырехкварковой. Это дает серьезные основания считать новую частицу «экзотическим» адроном. Существование «экзотических» частиц предсказывается КХД, но интенсивные экспериментальные поиски в течение 30 лет были безуспешными. Позже подобное состояние было обнаружено в эксперименте BES-III в реакции $e^+e^- \rightarrow DD^*$ [26].

С использованием данных, полученных в диапазоне энергий столкновений от 4,009 до 4,420 ГэВ, впервые был зарегистрирован переход $e^+e^- \rightarrow \gamma X(3872)$. Статистическая значимость сигнала составила $6,3\sigma$. Измеренная масса $X(3872)$, равная $(3871,9 \pm 0,7$ (стат.) $\pm 0,2$ (сист.)) МэВ/с², согласуется с результатами, полученными в других экс-

периментах. Было также измерено произведение сечения $\sigma[e^+e^- \rightarrow \gamma X(3872)]$ и относительной вероятности распада $B(X(3872) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi)$ при энергии столкновений пучков 4,009, 4,229, 4,260 и 4,360 ГэВ [27].

С использованием наибольшего в мире набора событий $\psi(3770) \rightarrow DD$ вблизи порога, полученного в 2010–2011 гг., в эксперименте BES-III было проведено прецизионное измерение относительной вероятности распада $\text{Br}(D^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu) = (3,71 \pm 0,19 \text{ (стат.)} \pm 0,06 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{-4}$ [28]. Это измерение, в сочетании со значением элемента ККМ-матрицы $|V_{cd}|$, найденным путем глобальной аппроксимации, основанной на Стандартной модели, позволило определить константу слабого распада $f_{D^+} = (203,2 \pm 5,3 \pm 1,8)$ МэВ. Кроме того, на основе значения f_{D^+} , вычисленного в теоретических расчетах в рамках решеточной КХД, было измерено значение элемента ККМ-матрицы $|V_{cd}| = 0,2210 \pm 0,0058 \pm 0,0047$. В обоих случаях были получены значения с лучшей в мире точностью.

Основная цель, достигаемая с помощью орбитального детектора **TUS**, — измерение спектра и состава космических лучей предельно высоких энергий вплоть до 10^{20} эВ. Детектор состоит из фокусирующего зеркала Френеля площадью $\sim 2 \text{ м}^2$ и фотодетектора в его фокусе, представляющего собой матрицу ФЭУ размером 16×16 . Задачами ОИЯИ и консорциума «Космическая регата» корпорации «Энергия» из г. Королева были разработка, изготовление и проведение измерений оптических параметров зеркала Френеля, которые полностью выпол-

нены в 2011–2012 гг. В 2013 г. проводились заключительные комплексные испытания аппаратуры **TUS** в составе космической платформы в космическом центре НИИЭМ (Москва). В 2014 г. предполагается: запуск детектора **TUS** на орбиту спутника Земли в составе спутника «Михаил Ломоносов» и набор данных о потоке и составе космических ливней (КЛ) при энергии $> 10^{20}$ эВ в течение 3–5 лет [29].

Измерение спектра, композиции и анизотропии КЛ прямым методом в широком интервале энергий является важной частью астрофизики. Диапазон «колена» в интервале энергий 10^{14} – 10^{16} эВ представляет особый интерес для понимания происхождения, ускорения и распространения КЛ в нашей Галактике. Существующие данные противоречивы и их недостаточно, что и послужило одной из мотивировок создания широкоапертурного детектора **NUCLEON**, на котором предполагается получить в течение длительного космического полета статистику, необходимую для решения указанных выше задач. Задачей ОИЯИ была разработка, изготовление и тесты двухуровневой триггерной системы, в том числе координатных детекторов и электроники, которые были созданы и протестированы на различных тестовых пучках ускорителя **SPS** в ЦЕРН.

В феврале 2013 г. был проведен завершающий тест аппаратуры детектора **NUCLEON** на ядерном пучке ускорителя **SPS** в ЦЕРН. Было установлено, что зарядовая система детектора с точностью 0,2–0,3 дискриминирует ядра вплоть до $Z \sim 30$ [30]. Запуск детектора **NUCLEON** запланирован на 2014 г. на борту спутника **РЕСУРС-П № 2**.

ФИЗИКА НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

На установке **ANKE** на ускорителе **COSY** в Юлихе выполнялись эксперименты в области адронной физики промежуточных энергий с применением поляризованных пучков и поляризованных струйных мишеней. Проведены исследования спиновых наблюдаемых в двойной поляризационной постановке, т. е. с использованием поляризованного дейтронного пучка и поляризованной водородной мишени. В квазисвободной реакции $\vec{n}\vec{p} \rightarrow \{pp\}_s\pi^-$ при энергии 353 МэВ/нуклон измерены коэффициенты спиновой корреляции A_{xx} , A_{yy} и векторная анализирующая способность A_y [31]. Совместный парциальный волновой анализ этих данных вместе с прежними результатами по A_y и дифференциальному сечению для реакции $\vec{p}\vec{p} \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ привел к неоднозначности, разрешение которой возможно только путем измерения коэффициента спиновой корреляции A_{xz} на продольно поляризованном пучке, что намечено на 2014 г.

Впервые в квазисвободной кинематике **ANKE** измерены коэффициенты спиновой корреляции A_{xx} и A_{yy} в реакции $\vec{n}p \rightarrow d\pi^0$ при энергиях нейтрона, близких к 353 и 600 МэВ [32]. Результаты находятся в хорошем согласии с предсказаниями **SAID** для реакции $pp \rightarrow d\pi^+$, не наблюдается признаков нарушения изоспиновой инвариантности.

В реакции $d\vec{p} \rightarrow \{pp\}_s n$ при энергиях поляризованных дейтронов 1,2, 1,6, 1,8 и 2,27 ГэВ измерены дифференциальное сечение и две тензорные анализирующие способности A_{xx} и A_{yy} . При энергиях 1,2 и 2,27 ГэВ была также поляризована водородная мишень, что позволило измерить спин-корреляционные параметры C_{xx} и C_{yy} . Полученные результаты существенно дополняют нейтрон-протонную часть базы данных **SAID**. В этой же реакции при энергиях 1,6, 1,8 и 2,27 ГэВ изучалось возбуждение $\Delta(1232)$ -

изобары [33]. Анализ дифференциального сечения показал, что результаты только частично описываются прямым возбуждением Δ из однопионного обмена.

Проект **MEG** является одним из основных экспериментов в физике элементарных частиц на ускорителе протонов в Институте им. П. Шеррера в Швейцарии. Целью эксперимента является поиск распада $\mu \rightarrow e\gamma$ на уровне 10^{-13} , для того чтобы исследовать область, предсказываемую многими теоретическими моделями, за пределами Стандартной модели. В 2013 г. коллаборация представила анализ распада $3,6 \cdot 10^{14}$ мюонов, остановленных в мишени, которые зарегистрированы в эксперименте MEG (2009–2011 гг.), для детектирования нарушающего закон сохранения лептонного числа распада $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$. Никакого эффекта, превышающего фон, не наблюдалось, и новый верхний предел вероятности этого распада зарегистрирован на уровне $5,7 \cdot 10^{-13}$ (90 %-й уровень достоверности) [34]. Это ограничение в четыре раза более строгое, чем предыдущее значение, полученное в эксперименте MEG.

Коллаборация **PEN** провела в Институте им. П. Шеррера прецизионные измерения относительной вероятности $BR_{\pi e2}$ распада $\pi^+ \rightarrow e^+\nu(\gamma)$ с целью улучшить в 6–7 раз существующее 40-кратное отставание точности эксперимента от теории. Величина $BR_{\pi e2}$ сильно подавлена из-за спиральности нейтрино, что делает ее особо чувствительной ко вкладу механизмов, отличных от $V-A$ взаимодействия. Даже при достигнутом уровне точности экспериментальное измерение $BR_{\pi e2}$ обеспечивает наиболее строгую проверку лептонной универсальности. За время сеансов набора статистики в 2008–2010 гг. было зарегистрировано более $2 \cdot 10^7$ событий $\pi^+ \rightarrow e^+\nu(\pi_{e2})$. Новые экспериментальные данные позволяют также улучшить точность прежних результатов эксперимента RIBETA по радиационным распадам пионов и мюонов.

В 2013 г. проведены полномасштабные функциональные испытания оборудования установки **TRITON**. В плане подготовки инфраструктуры фазотрона в феврале проведен технический сеанс с целью оптимизации параметров вывода пучка отрицательных мюонов в низкофоновую лабораторию. В марте проведен сеанс измерений с пенопластовым макетом мишени для совместной проверки системы регистрации и системы сбора данных. В ноябре проведены криогенные испытания мишени на приобретенном криогенном оборудовании МКС МСМР-150Н-5/20 с холодопроизводительностью 10 Вт при 20 К. Точность долговременного (десятки часов) поддержания температуры жидкого водорода в мишени не хуже 0,1 К. В декабре проведен 10-часовой сеанс физических измерений с мишенью, заполненной жидким водородом, на пучке мюонов. Достигнуто число 140 значимых остановок мюонов

в водороде в секунду. Измерены фоновые энергетические и временные спектры экспериментальных событий мюонного катализа в чистом (без добавления трития) водороде. Измеренный выход 10^5 γ -квантов с энергией $E_\gamma = 5,5$ МэВ от процесса мю-катализа в системе $pd\mu$ (при естественной концентрации дейтерия 10^{-4} объемных долей) показывает корректную работу всех элементов установки [35].

В 2013 г. в рамках проекта **MUON** продолжались исследования поведения поляризованных мюонов в веществе. Было изучено поведение мюония в двух поликристаллических образцах алмазов и в образце, состоящем из нескольких монокристаллических синтетических алмазов. Найденное значение константы сверхтонкого взаимодействия мюона и электрона в MuT-положении в синтетических алмазных образцах аналогично полученному для природного алмаза. Скорости релаксации спина мюонов в положениях MuT и MuB в синтетических и природных образцах Па- и Пб-типа похожи. Было установлено, что в монокристаллическом образце типа Па при 150 К вклады фракций диамагнитного мюона, MuT и MuBC равны 1,5, 57 и 8,1 % соответственно. Недостающая часть поляризации мюона составила 33,4 %. Разница между синтетическими и природными алмазами II типа заключается, вероятно, в более высокой концентрации дефектов в синтетических образцах. Известно, что для MuBC есть определенное «магическое» поле, в котором частота прецессии спина мюона почти не зависит от ориентации кристалла. Этот эффект позволяет наблюдать прецессии спина мюона в позиции MuBC [36].

В рамках проекта **NN-GDH** в эксперименте по комптоновскому рассеянию поляризованных фотонов на поляризованных протонах, проведенном совместно с коллаборацией A2 на ускорителе MAMI (Майнц, Германия), впервые получена оценка величины спиновой поляризуемости протона — фундаментальной структурной константы, характеризующей отклик спина протона на изменяющееся электромагнитное поле. Этот результат открывает принципиальную возможность для прецизионного исследования спиновой структуры нуклонов в электромагнитных взаимодействиях. В рамках программы реализации «полного опыта» выполнены первые в мире измерения поляризационных наблюдаемых E , G в фоторождении π^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 MAMI-C и мишени с продольной поляризацией протонов и дейтронов. Эти данные (в сочетании с полученными ранее результатами для наблюдаемых T , F) закладывают основу для амплитудного и мультипольного анализа индивидуальных каналов фоторождения мезонов [37, 38].

В НЭОНУ ЛЯП с 2013 г. ведутся работы над проектом сверхпроводящего циклотрона **SCC250**, предназначенного для ускорения протонов до энергии 250 МэВ. Энергия протонов порядка 250 МэВ признана оптимальной для проникновения на полную глубину человеческого тела (~ 32 см) и лечения внутренних глубокозалегающих опухолей. В циклотроне SCC250 модуляция тока пучка будет осуществляться посредством изменения тока из внутреннего источника с частотой до 1 кГц, что позволит реализовать новый перспективный метод протонной терапии на основе активного сканирования с модулированными по интенсивности пучками.

Разработка магнитной системы циклотрона для протонной терапии основывается на общих требуемых параметрах циклотрона, учитывает требования и взаимодействие с другими системами циклотрона — ВЧ-системой, системой вывода и криогенной системой. В результате моделирования магнитного поля и динамики пучка была определена частота обращения иона — 37 МГц. В случае циклотрона с четырьмя секторами и ускоряющими электродами, угловая протяженность которых составляет 45° , оптимальной гармоникой ускорения является четвертая. При работе циклотрона SCC250 на 4-й кратности резонансная частота должна составлять 148 МГц. Разработана компьютерная модель резонатора с проектной частотой и ростом ускоряющего напряжения вдоль радиуса, проведены расчеты динамики пучка в зоне ускорения и вывода.

Цикл расчетных и экспериментальных работ на циклотроне **АИЦ-144** был направлен на реализацию оптимального режима ускорения и вывода пучка с энергией протонов $\sim 60,5$ МэВ для проведения сеансов терапии меланомы глаза. Путем настройки фазового движения ускоряемого пучка была проведена минимизация энергетического разброса в выведенном пучке протонов, что позволило получить рекордное значение спада пика Брэгга $\sim 0,8$ мм на уровне 10–90 % среди циклотронов, используемых для терапии глаза. Подготовлено техническое задание на разработку программного обеспечения для измерения параметров фазового движения ускоряемого сгустка протонов. Проведены расчеты по выбору технических параметров новых поворотных магнитов для линии транспортировки пучка из циклотрона, и подготовлено техническое задание на их проектирование. Проведен цикл расчетов по выбору параметров новой резонансной системы циклотрона [39].

В рамках темы **«Проведение медико-биологических исследований на адронных пучках ОИЯИ»** на базе медико-технического комплекса

(МТК) ЛЯП проводятся медико-биологические и клинические исследования по лечению онкологических больных, совершенствование оборудования и аппаратуры, а также разработка новых методов лучевой терапии и сопутствующей диагностики онкологических больных на медицинских адронных пучках фазотрона ОИЯИ [40].

Совместно с Медицинским радиологическим научным центром (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 25 недель. На медицинском протонном пучке курс фракционированного лучевого лечения прошли 73 пациента, при этом общее количество протонных терапевтических облучений (полей) составило около 4500. Кроме того, на гамма-аппарате «Рокус-М» были пролечены еще 15 пациентов. Разработано и создано компьютеризированное устройство, позволяющее проводить верификацию болюсов — индивидуальных замедлителей пучка сложной формы, изготавливаемых в мастерских МТК с помощью фрезерного станка с числовым программным управлением. Контроль правильности изготовления болюсов повышает уровень «гарантии качества» проводимой радиотерапии.

Совместно с сотрудниками Отдела радиационной дозиметрии Института ядерной физики (Прага) продолжались работы по измерению фоновых условий в кабине протонной терапии №1 с использованием термолюминесцентных, трековых и кремниевых детекторов MEDIPIX, а также по изучению спектров линейной передачи энергии терапевтического протонного пучка фазотрона ЛЯП ОИЯИ с использованием детекторов LIULIN и MEDIPIX. Совместно с сотрудниками Великопольского онкологического центра (Познань, Польша) на протонном пучке с использованием радиохромных пленок и гетерогенного фантома Алдерсона были продолжены эксперименты по верификации всех технологических этапов подготовки и проведения терапевтического облучения пациентов. Полученные результаты подтвердили высокую точность совмещения дозного распределения с облучаемой мишенью и были представлены в июне 2013 г. в докладе на крупнейшем форуме мирового сообщества адронной терапии «Particle Therapy Cooperative Group Meeting 52» (Эссен, Германия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *An F.P. et al. (Daya Bay Collab.)*. Spectral Measurement of Electron Antineutrino Oscillation Amplitude and Frequency at Daya Bay, Oct. 24, 2013. arXiv:1310.6732; Phys. Rev. Lett. (submitted).
2. *An F.P. et al. (Daya Bay Collab.)*. Improved Measurement of Electron Antineutrino Disappearance at Daya Bay // Chin. Phys. C. 2013. V. 37. P. 011001.
3. *Agafonova N. Yu. et al.* Search for the $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ Oscillation with the OPERA Hybrid Detector // Phys. Part. Nucl. 2013. V. 44. P. 703–727.
4. *Agafonova N. et al.* New Results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ Appearance with the OPERA Experiment in the CNGS Beam // JHEP. 2013. V. 1311. P. 036.
5. *Agafonova N. et al.* Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Oscillations with the OPERA Experiment in the CNGS Beam // Ibid. V. 1307. P. 004; Addendum ibid. P. 085.
6. *Adam T. et al.* Measurement of the Neutrino Velocity with the OPERA Detector in the CNGS Beam Using the 2012 Dedicated Data // Ibid. V. 1301. P. 153.
7. *Bellini G. et al.* Measurement of Geo-Neutrinos from 1353 days of Borexino // Phys. Lett. B. 2013. V. 722, Iss. 4–5. P. 295–300.
8. *Bellini G. et al.* Final Results of Borexino Phase-I on Low Energy Solar Neutrino Spectroscopy. arXiv:1308.0443 [hep-ex].
9. *Bellini G. et al.* Cosmogenic Backgrounds in Borexino at 3800 m Water-Equivalent Depth Borexino Collaboration // JCAP. 2013. V. 1308. P. 049.
10. *Bellini G. et al.* New Limits on Heavy Sterile Neutrino Mixing in 8B Decay Obtained with the Borexino Detector // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. P. 072010.
11. *Armengaud E. et al. (EDELWEISS Collab.)*. Background Studies for the EDELWEISS Dark Matter Experiment // Astropart. Phys. 2013. V. 47. P. 1–9.
12. *Schmidt B. et al. (EDELWEISS Collab.)*. Muon-Induced Background in the EDELWEISS Dark Matter Search // Ibid. V. 44. P. 28–39.
13. *Agostini M. et al.* Results on Neutrinoless Double Beta Decay of ^{76}Ge from Phase I of the GERDA Experiment // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 122503.
14. *Ackermann K.-H. et al.* The GERDA Experiment for the Search of $0\nu\beta\beta$ Decay in ^{76}Ge // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73, No. 3. P. 1–29.
15. *Arnold R. et al.* Search for Neutrinoless Double-Beta Decay of ^{100}Mo with the NEMO-3 Detector. hep-ex arXiv:1311.5695; Phys. Rev. Lett. (submitted).
16. *Rukhadze N.I. et al.* A Highly Efficient HPGe Gamma-Ray Spectrometer for Investigation $\beta\beta$ Decay to Excited States // Bull. of the Rus. Acad. of Sci. Phys. 2013. V. 77, No. 4. P. 424–427.
17. *ATLAS Collab.* ATLAS-CONF-2013-062.
18. *Lykasov G.I. et al.* // Nucl. Phys. B. 2013. Proc. Suppl. V. 245. P. 215.
19. *Bednyakov V.A. et al.* // Phys. Lett. B. (in press); hep-ph/1305.3548.
20. *CDF, D0 Collab.* Combination of CDF and D0 Results on the Mass of the Top Quark Using up to 8.7 fb^{-1} at the Tevatron; <http://arxiv.org/abs/1305.3929>. 2013.
21. *Budagov J. et al.* The Calorimeter Project for the Mu2e Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 718. P. 56–59.
22. *Abazov V.M. et al.* Measurement of the Differential Cross Section of Photon Plus Jet Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. P. 072008.
23. *Sapronov A., Bondarenko S.* NLO EW and QCD Proton-Proton Cross Section Calculations with mcsanc-v1.01 // Comp. Phys. Commun. 2013. V. 184. P. 2343–2350.
24. *Arbuzov A. et al.* SANC Integrator in the Progress: Inclusion of Photon Induced Processes (in press).
25. *Ablikim M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 252001.
26. *Ablikim M. et al.* arXiv:1310.1163.
27. *Ablikim M. et al.* arXiv:1310.4101.
28. *Ablikim M. et al.* arXiv:1312.0374.
29. *Klimov P.A. et al.* Ultra High Energy Cosmic Rays Detector TUS on Board Lomonosov Satellite // Proc. of ICRC2013, Rio de Janeiro, 2013. ID-0406.
30. *Podorozhnyi D. et al.* The NUCLEON Device for High Energy Cosmic Rays Investigation by Space Experiment // Nucl. Instr. Meth. (submitted).
31. *Dymov S. et al.* Measurement of Spin Observables in the Quasi-Free $np \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ Reaction at 353 MeV // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 014001.
32. *Shmakova V. et al.* First Measurements of Spin Correlations in the $\bar{n}\bar{p} \rightarrow d\pi^0$ Reaction // Phys. Lett. B. 2013. V. 726. P. 634.
33. *Mchedlishvili D. et al.* Excitation of the $\Delta(1232)$ Isobar in Deuteron Charge Exchange on Hydrogen at 1.6, 1.8, and 2.3 GeV // Ibid. P. 145.
34. *Adam J. et al.* New Constraint on the Existence of the $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ Decay // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 201801.
35. *Bogdanova L.N., Demin D.L., Filchenkov V.V.* Study of the Mechanism of Muon-Catalyzed $t + t$ Fusion Reaction. JINR Preprint E15-2013-115. Dubna, 2013. (submitted to Nucl. Phys.)
36. *Mamedov T. et al.* Muonium in Synthetic Diamond // Diamond and Related Materials. 2013. V. 31. P. 38.
37. *Kashevarov V.L. et al.* Target and Beam Asymmetry for the $\gamma p \rightarrow \pi^0 \pi^0 p$ // Phys. Rev. C. (submitted).
38. *Downie E.* Nucleon Polarizabilities via Compton Scattering at MAMI // Proc. of SPIN-2012. Dubna, 2012.
39. *Amirhanov I.V. et al.* Operation Mode of AIC-144 Multipurpose Isochronous Cyclotron for Eye Melanoma Treatment // 20th Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Triumpf, Vancouver, Canada, 2013.
40. *Voskanyan K.S. et al.* Modification of Radiation Damage to Biological Objects by Lasing // Lasers in Medical Science. 2013. V. 28, No. 6. P. 1241.