

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ им. В. П. ДЖЕЛЕПОВА

ФИЗИКА НЕЙТРИНО И РЕДКИХ ПРОЦЕССОВ

В 2012 г. группа ОИЯИ в составе коллаборации «**Daya Bay**» выполнила цикл экспериментальных работ, посвященных измерению угла смешивания нейтрино θ_{13} . Этот угол — последний из трех углов смешивания нейтрино матрицы Понтекорво–Маки–Нагавы–Сакаты, который оставался неизвестным до марта 2012 г. Статистическая значимость опубликованного измерения превысила пять стандартных отклонений, что позволило говорить об открытии нового типа осциллирующей нейтрино. В июне 2012 г. на конференции «Neutrino-2012» коллаборацией «**Daya Bay**» был доложен результат нового измерения, $\sin^2 2\theta_{13} = 0,089 \pm 0,010(\text{стат.}) \pm 0,005(\text{сист.})$, который исключает нулевое значение угла θ_{13} на уровне достоверности, близком к 8 стандартным отклонениям [1–3].

Полученное однозначное доказательство этих осцилляций открывает новые возможности для дальнейшего изучения проблемы барионной асимметрии Вселенной, иерархии масс нейтрино и других принципиальных проблем в физике элементарных частиц и астрофизике.

В 2012 г. в эксперименте **OPERA** продолжался набор данных на нейтринном пучке CNGS, около 4000 нейтринных взаимодействий были зарегистрированы в детекторе. Всего за пять лет работы детектора было зарегистрировано около 18000 нейтринных событий в мишени детектора. К настоящему времени обнаружено 56 событий рождения очарованных мезонов, 29 событий взаимодействий электронных нейтрино и 2 события от тау-нейтрино. Об обнаружении второго события-кандидата на тау-нейтрино было доложено на международной конференции «Neutrino-2012». Анализ данных проводится в 10 институтах в Японии и Европе, в том числе в ОИЯИ. В 2012 г. в результате многочисленных проверок, в которые существенный вклад внесла группа из ОИЯИ, были обнаружены технические причины регистрации аномального значения скорости нейтрино в пучке CNGS, новые измерения были проведены с помощью детектора OPERA на пучке с хорошей временной привязкой. Окончательный результат

подтвердил совпадение скорости нейтрино и света с рекордной точностью [4–6].

В 2012 г. группа из ЛЯП в составе коллаборации **BOREXINO** участвовала в рабочих сменах по набору данных и в физическом анализе накопленных данных. Значительным достижением последнего времени можно считать снижение уровня фона за счет дополнительной очистки сцинтиллятора: $^{85}\text{Kr} < 6,4 \text{ соб./сут/100 т}$; $^{232}\text{Th} < 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ г/г}$; $^{238}\text{U} = (3,3 \pm 1,4) \cdot 10^{-19} \text{ г/г}$; $^{210}\text{Bi} = 17 \pm 3 \text{ соб./сут/100 т}$; $^{210}\text{Po} < 400 \text{ соб./сут/100 т}$. Были опубликованы результаты первого измерения потока солнечных *пер*-нейтрино и ограничения потока нейтрино из углеродно-азотного цикла [7], также было подтверждено отсутствие суточных вариаций потока бериллиевых нейтрино на уровне 1% [8]. Данные **BOREXINO** позволили установить пределы на рождение гипотетических аксионов с энергией 5,5 МэВ в реакции $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$ на Солнце. Получены пределы, на 2–4 порядка превышающие существующие пределы по результатам ускорительных и реакторных экспериментов [9].

Эксперимент **EDELWEISS-II** направлен на прямое детектирование слабовзаимодействующих массивных частиц (WIMP) из галактического гало, считающихся основными кандидатами на роль темной материи. Целью эксперимента является достижение чувствительности к важному классу SUSY-моделей («Focus Point»), предсказывающему сечение взаимодействия между WIMP и нуклонами на уровне 10^{-44} см^2 , что соответствует регистрации одного столкновения в сутки на 500 кг обычного вещества. Основной фон для поиска WIMP с ионизационно-фонными детекторами возникает из-за событий с неполным сбором заряда вблизи поверхности. Для решения данной проблемы в **EDELWEISS** были разработаны инновационные детекторы с системой копланарных кольцевых электродов (ID400-детекторы) для активного отбора событий на глубине, меньшей 1 мм от поверхности детектора. В 2012 г. данная тех-

нология получила дальнейшее инновационное развитие с использованием детекторов, в которых боковые поверхности германиевых кристаллов также имеют систему кольцевых электродов (FID800-детекторы). Порядка 10 кг новых детекторов было проверено и откалибровано в 2012 г. Кроме использования новых детекторов вся установка в 2012 г. подверглась значительному улучшению, это коснулось криогенной системы, защиты и использования новой быстрой электроники для набора данных.

Важным результатом 2012 г. стало полученное ограничение на сечение спин-независимого упругого рассеяния на нуклоне для слабозаимодействующих массивных частиц массой 10 ГэВ/ c^2 на уровне $1,0 \cdot 10^{-41}$ см². Удалось практически полностью закрыть области, для которых полученные в нескольких экспериментах результаты могут интерпретироваться как наблюдение WIMP. Этот результат расширяет имеющиеся данные для «традиционной» зоны поиска WIMP, где для упругого рассеяния WIMP–нуклон полученный предел на сечение спин-независимого взаимодействия WIMP–нуклон составляет $4,4 \cdot 10^{-44}$ см² (для 90 %-го С.Л. и для WIMP массой 85 ГэВ/ c^2) [10].

Целью проекта **SuperNEMO** является поиск двойного безнейтринного бета-распада ($0\nu\beta\beta$), который является уникальным процессом. Его открытие и изучение дадут сведения о таких пока неизвестных параметрах, как тип и массовая шкала нейтрино, а также могут дать ответ на фундаментальные вопросы физики, такие как CP-нарушение, лептогенезис, теория Великого объединения. В рамках проекта планируется увеличить на два порядка, по сравнению с проектом NEMO-3, чувствительность $T_{1/2}(0\nu\beta\beta) \sim 1 \cdot 10^{26}$ лет (эффективная масса нейтрино $\langle m_e \rangle \sim 0,030\text{--}0,100$ эВ), которая находится на уровне лучших мировых результатов в данной области. В 2012 г. в рамках эксперимента NEMO-3, который был завершен в 2011 г., проведен окончательный анализ данных. Цели, поставленные перед NEMO-3 « $\beta\beta$ -фабрикой», успешно выполнены, получены блестящие результаты по различным модам ($0\nu\beta\beta$, $2\nu\beta\beta$, переходу в возбужденные состояния, правым токам) распада с 7 изотопами: ¹⁰⁰Mo, ⁸²Se, ¹¹⁶Cd, ¹³⁰Te, ¹⁵⁰Nd, ⁹⁶Zr и ⁴⁸Ca. Полученный предел $T_{1/2}(0\nu\beta\beta) > 1,0 \cdot 10^{24}$ лет (с 90 %-й вероятностью) соответствует пределу на эффективную массу нейтрино $\langle m_e \rangle < 0,31\text{--}0,96$ эВ, что является лучшим результатом в мире.

В 2012 г. эксперимент **BES-III** на электрон-позитронном коллайдере BEPS-II (ИФВЭ АН КНР, Пекин) продолжил набор данных в области резонансов чармония. К настоящему времени, вместе с данными сеансов 2009–2011 гг., получена статистика распадов J/ψ (1,2 млрд событий), ψ' (0,5 млрд событий) и интегральная светимость $\psi(3770)$ (2,9 фб⁻¹) и $\psi(4040)$ (0,5 фб⁻¹), в несколько раз превышающая мировую. Кроме того, в 2012 г. было проведено

сканирование по энергии в области порога рождения тау-лептонов, в области резонансов J/ψ и ψ' , а также набор данных в интервале 2,2–3,4 ГэВ для измерения R -отношения.

В 2012 г. был проведен анализ по определению спина и четности околопороговой структуры pp , обнаруженной в радиационных распадах резонансов J/ψ и ψ' . Показано, что эта структура $X(pp)$ обладает квантовыми числами 0^{-+} , и измерены ее свойства и относительная вероятность распада [11]. Был впервые обнаружен распад $\eta(1405) \rightarrow f(980)\pi^0$, в котором нарушается сохранение изоспина. Этот распад зарегистрирован как в заряженной, так и в нейтральной модах [12]. Было завершено измерение массы и ширины η_c в распаде $\psi' \rightarrow \gamma\eta_c$. Полученные результаты, которые в настоящее время являются наиболее точными в мире, опубликованы в [13]. Также была завершена обработка данных и опубликованы результаты, касающиеся первого в мире наблюдения рождения $\eta_c(2S)$ в распадах чармония [14]. Впервые был зарегистрирован двухфотонный переход $\psi' \rightarrow \gamma\gamma J/\psi$, свойства которого могут быть полезны при интерпретации состояний XYZ и для лучшего понимания системы резонансов чармония в целом [15]. Получены предварительные результаты измерения относительных вероятностей лептонного распада $D^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$ и полуплептонных распадов $D^0 \rightarrow K^+e^-\nu_e$ и $D^0 \rightarrow \pi^+e^-\nu_e$.

Основные работы, выполненные группой ОИЯИ в 2012 г., были связаны с несколькими физическими задачами. Одной из них является работа по спектроскопии легких адронов, выполненная в сотрудничестве с ПИЯФ (Гатчина). Завершен парциально-волновой анализ группы реакций $J/\psi \rightarrow KK\pi$. В настоящее время ведется подготовка к опубликованию этих результатов. Были измерены относительная вероятность распада и формфакторы в спиральном базисе в полуплептонном распаде $D^+ \rightarrow K^-\pi^+e^+\nu_e$. Анализ данных близок к завершению, и в настоящее время ведется подготовка технического отчета. Группой ОИЯИ был также проведен анализ данных, полученных при сканировании по энергии в области резонанса J/ψ в мае 2012 г. Основной целью этого анализа является измерение разности фаз между сильной и электромагнитной амплитудами в распаде J/ψ . В ходе анализа измерялось сечение процесса $J/\psi \rightarrow \rho\pi$, измерения были проведены в нескольких точках по энергии в окрестности резонанса J/ψ . Предварительные результаты были доложены на совещании коллаборации BES-III. В настоящее время проводятся интерпретация полученных результатов и подгонка теоретического описания для определения значения разности фаз.

Космический детектор **TUS** предназначен для исследования спектра, состава и углового распределения космических лучей в области $10^{19}\text{--}10^{20}$ эВ. Он состоит из оптического зеркала Френеля и матрицы 16×16 фотоумножителей в качестве фото-

приемника в его фокальной плоскости. С высоты 400–500 км предполагается измерять флуоресцентное излучение широких атмосферных ливней (ШАЛ), образованных частицами сверхвысокой энергии, — в области ГЗК-обрезания. Детектор TUS состоит из сегментированного зеркала Френеля и матрицы 16×16 фотоумножителей вместе с электроникой в его фокальной плоскости в качестве фотоприемника. В 2012 г. были проведены комплексные испытания аппаратуры детектора в составе спутника «Михаил Ломоносов». Запуск спутника на орбиту запланирован на середину 2013 г. Опубликованы результаты измерений оптических параметров зеркала-концентратора детектора TUS [16]. К проекту TUS присоединились группы из Румынии (Институт космических исследований) и Украины (Киевский национальный университет им. Т. Г. Шевченко). В настоящее время создаются программы моделирования, экспресс-анализа на борту спутника и off-line рекон-

струкции ШАЛ космических частиц сверхвысоких энергий.

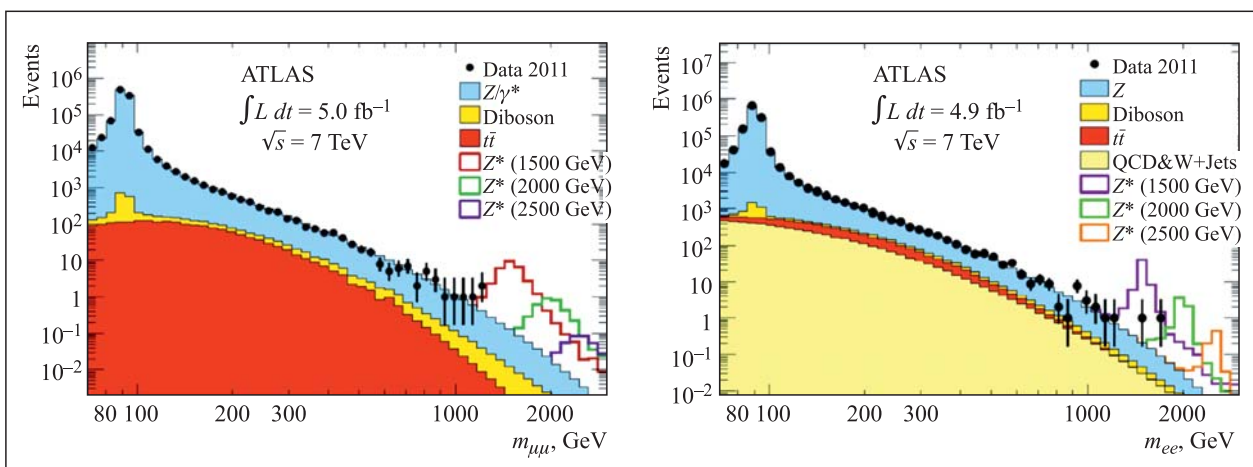
Главной задачей в эксперименте NUCLEON является измерение потока космических лучей в области 10^{11} – $5 \cdot 10^{14}$ эВ, а также их элементного состава и возможной анизотропии. Запуск детектора NUCLEON планируется в конце 2013 г. на борту космического аппарата «Ресурс». Предполагаемый срок набора данных — не менее 5 лет. Ответственностью ОИЯИ является разработка, изготовление и испытания триггерной системы, в том числе FE- и DAQ-электроники для выработки триггерных сигналов 1-го и 2-го уровней. В 2012 г. проведен тест полетного варианта детектора на пучках SPS в ЦЕРН. В настоящее время проводится off-line анализ полученных данных. Детектор готовится к отправке в ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (Самара) для комплексных испытаний в составе космического аппарата «Ресурс-П» № 2.

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На установке ATLAS в 2012 г. был получен долгожданный положительный результат по поиску бозона Хиггса. В подготовку, обеспечение и проведение эксперимента внесли весомый вклад сотрудники ЛЯП из научно-экспериментального отдела встречных пучков, научно-экспериментального отдела адронных процессов, научно-экспериментального отдела новых ускорителей, а также сектора элементарных частиц и ряда других научно-производственных подразделений.

В 2012 г. участниками коллаборации ATLAS из ОИЯИ был проведен анализ данных, направленный на поиск возможных проявлений суперсимме-

трии. При анализе использовались данные, полученные за 2011 г. при энергии протон-протонного соударения 7 ТэВ в с.ц.м. на ЛНС. Суммарный объем данных соответствует $4,7 \text{ fb}^{-1}$ интегральной светимости. Для анализа отбирались события с одним только лептоном (электроном или мюоном), потерянной (незарегистрированной) поперечной энергией и как минимум с семью адронными струями в конечном состоянии. Большое количество адронных струй, с одной стороны, могло бы свидетельствовать о рождении тяжелых суперсимметричных частиц в промежуточном состоянии, а с другой — говорило бы о практическом отсутствии фона. Срав-



Распределение инвариантных масс димюонов (слева) и диэлектронов (справа). Данные сравниваются с суммарным вкладом фонов Стандартной модели

нение полученных распределений всех проанализированных событий с соответствующими предсказаниями Стандартной модели показало, что в рассматриваемом конечном состоянии никаких отклонений от Стандартной модели обнаружено не было. Кроме того, были установлены нижние пределы на параметры нескольких моделей суперсимметрии, таких как MSUGRA/CMSSM, упрощенные модели (Simplified Models) и MSUGRA/CMSSM с билинейным нарушением R -четности [17]. Дальнейшие планы работ включают в себя анализ данных 2012 г. с оценкой фона методом «Data-driven».

Группа ATLAS в ОИЯИ представила результаты поиска нового возбужденного Z^* -бозона на детекторе ATLAS в 2011 г. [18]. Результаты получены на основе анализа данных протон-протонных столкновений при энергии 7 ТэВ в с. ц. м., соответствующих интегральной светимости $4,9 \text{ фб}^{-1}$ в диэлектронном канале (на рисунке справа) и $5,0 \text{ фб}^{-1}$ в мюонном канале (на рисунке слева). Статистически значимых отклонений экспериментальных данных от предсказаний Стандартной модели не наблюдается. Существование Z^* -бозона исключено с 95 %-й вероятностью вплоть до массы 2,20 ТэВ.

В рамках проекта CDF основными результатами 2012 г. были: получение усредненного значения массы топ-кварка на данных тэватрона с точностью $0,94 \text{ ГэВ}/c^2$, изучение корреляций в событиях с высокой множественностью заряженных адронов, испытания в Дубне и Минске кристаллов типа LYSO как потенциальных элементов электромагнитного калориметра эксперимента «Mu2e» во 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 (на статистике до $5,8 \text{ фб}^{-1}$). Комбинация этих измерений с учетом корреляции ошибок позволила получить наиболее точное значение массы топ-кварка $M_{\text{top}} = 173,18 \pm 0,56(\text{стат.}) \pm 0,75(\text{сист.}) \text{ ГэВ}/c^2$, что соответствует полной неопределенности $0,94 \text{ ГэВ}/c^2$, или 0,54 % точности [19, 20].

Были проведены исследования энергетических корреляторов $K_2(n)$, $K_3(n)$, компонент корреляторов и отношения $R_3(n)$ корреляторов $K_3(n)$ к $K_2(n)$ в зависимости от множественности вторичных заряженных адронов для кинематической области $p_T > 0,5 \text{ ГэВ}/c$ и $|\eta| < 1$ во взаимодействиях протон-антипротон при 1,96 ТэВ с использованием CDF2-детектора на тэватроне и триггера минимум-байас, а также триггера на большую множественность. Данные были откорректированы на эффективность трековой реконструкции. Впервые была изучена форма распределений в зависимости от множественности для K_2 , K_3 и их отношения R_3 . Обнаружено, что события с лидирующим адронным ливнем с энер-

гией не более 14 ГэВ совместимы с термодинамической интерпретацией. Для событий с большой множественностью, $n \geq 22$, средняя энергия медленно растет с увеличением множественности, отношение корреляторов $R_3(n)$ меньше единицы и равно $0,610 \pm 0,079 \pm 0,025$, химический потенциал μ растет медленнее, чем предсказанное теорией αn^2 . Наблюдаемые величины $R_3(n) < 1$ и $\mu(n) \approx \alpha n^2$ для $n \geq 22$ являются первыми экспериментальными наблюдениями явления термализации. Это явление не описывается современными моделями Монте-Карло.

Для понимания опасности нейтронного фона для счетчиков «Cosmic Ray Veto» системы эксперимента «Mu2e» были проведены первые тестовые измерения эффективности сцинтилляционного счетчика к нейтронам на установке ИРЕН в ЛНФ ОИЯИ. Оценки эффективности детектирования нейтронов получены для двух энергетических областей и составляют $3 \cdot 10^{-4}$ для нейтронов с кинетической энергией 1,18–4,7 эВ и $4 \cdot 10^{-4}$ для 0,032–0,16 эВ.

В рамках эксперимента DIRAC проведен 6-месячный сеанс по набору данных для наблюдения метастабильных долгоживущих состояний $\pi^+\pi^-$ -атома. Набрано $5,1 \cdot 10^9$ первичных событий. До начала набора данных был изготовлен и установлен новый радиационно стойкий постоянный магнит на основе Sm-Co с максимальным полем в центре магнита 2550 Гс и протяженностью полюсов магнита по пучку 60 мм. Магнит имеет на два порядка большую радиационную стойкость по сравнению с магнитом, использованным в 2011 г. Поскольку габариты и вес нового магнита отличны от использовавшегося в 2011 г., потребовалось спроектировать и изготовить новую подставку для крепления и перемещения магнита внутри мишенной станции. Параллельно с набором основных данных набрана статистика, необходимая для измерения многократного рассеяния в тонких металлических фольгах, с точностью лучше 1 %. Выполнено тестирование нового ионизационного детектора высокой гранулярности для дальнейшего развития установки DIRAC. Модернизирована программа off-line анализа данных.

Проект SANC включает теоретические предсказания для многих 3- и 4-частичных процессов Стандартной модели (SM) на однопетлевом уровне точности (QCD и EW NLO). В 2012 г. проведено внедрение в систему SANC двух новых 4-бозонных процессов: процесса рождения $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$, распада $Z \rightarrow 3\gamma$, а также описаны стандартные модули для процессов одиночного рождения тор-кварков на LHC. Проводится дальнейшее приложение результатов SANC к анализу экспериментальных данных ATLAS [21, 22]. Продолжена оценка так называемых неучтенных правок высших порядков, т. е. тех, которые не учитываются в стандартных программах ATLAS по моделированию сечений процессов рождения W - и Z -бозонов. Важнейшим результатом 2012 г. является создание продвинутых версий Монте-Карло инстру-

ментов (интегратора и генератора) для анализа событий с учетом взаимного влияния NLO КХД и электрослабых поправок. Был проведен тщательный анализ вклада тормозного излучения заряженными лептонами в конечном состоянии для процессов, изучаемых на LHC. Эти результаты важны для повышения точности анализа данных и уже используются при выводе суммарной неопределенности при анализе процессов типа Дрелла–Яна.

В 2012 г. совместно с ИСМА (Харьков, Украина) была отработана технология изготовления модулей электромагнитного калориметра для экспери-

ментов **COMPASS-II** и **NICA/MPD**. Новая технология основана на использовании сцинтилляционных структур типа «шашлык» и считывании сигналов кремниевыми лавинными фотодетекторами нового поколения, предложенными в ОИЯИ. Прототип электромагнитного калориметра установки **COMPASS-II**, состоящий из 504 башен, был испытан на пучке в ЦЕРН, где он показал требуемые параметры. Разработанная новая методика будет использована также для электромагнитного калориметра установки **NICA/MPD**.

ФИЗИКА НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

В соответствии с научной программой проекта **SPRING** на установке **ANKE** на ускорителе **COSY** в Юлихе (ФРГ) выполнялись эксперименты в области адронной физики промежуточных энергий с применением поляризованных протонных (дейтронных) пучков и/или поляризованных струйных водородных (дейтериевых) мишеней. Опубликованы результаты экспериментов по пионному рождению вблизи порога на поляризованных пучках [23, 24]. Измерение дифференциального сечения и векторной анализирующей способности в реакциях $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ и $\vec{p}n \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ позволило провести фазовый анализ и извлечь комплексные амплитуды этих процессов. Полученные амплитуды теперь должны быть проанализированы в рамках киральной теории для установления связи между рождением пионов в нуклон-нуклонных столкновениях и низкоэнергетичным трехнуклонным рассеянием. Изучались нейтрон-протонные зарядово-обменные амплитуды [25]. В реакции $\vec{d}p \rightarrow \{pp\}_s n$ при энергиях 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 эксперимент проведен также в двойной поляризованной постановке (т. е. с поляризованными как дейтронным пучком, так и водородной мишенью). Это позволило измерить спин-корреляционные параметры C_{xx} и C_{yy} . Полученные результаты существенно дополняют нейтрон-протонную часть базы данных SAID.

По программе **PAX** успешно выполнен эксперимент [26] по так называемой фильтрации спина. Измерялось нарастание поляризации в изначально неполяризованном протонном пучке в результате его циркуляции через поляризованную водородную мишень. Полученное эффективное сечение поляризации пучка $\sigma_{\text{meas}} = 23,4 \pm 3,9(\text{стат.}) \pm 1,9(\text{сист.})$ мб хорошо согласуется с теоретическим значением $\sigma_{\text{theor}} = 26,9$ мб, что указывает на полное понимание природы исследуемого процесса.

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 существования распада $\mu \rightarrow e\gamma$ на уровне 10^{-13} , для того чтобы исследовать область, предсказываемую многими теоретическими моделями за пределами Стандартной модели. Данные, собранные **MEG** в 2009–2010 гг., не дают никаких доказательств существования событий выше ожидаемого фона. Это трансформируется в самое жесткое ограничение в настоящее время на существование распада $\mu \rightarrow e\gamma$ ($\text{BR} < 2,4 \cdot 10^{-12}$, 90%-й С.Л.) и улучшает предыдущий предел в пять раз. Поиск этого процесса в низкоэнергетическом, высокоинтенсивном и прецизионном эксперименте является мощным средством исследования перспективных моделей «новой физики», таких как суперсимметричные теории (**SUSY-TBO**) или теории с дополнительными размерностями, и, таким образом, дополняет поиски на ускорителях ТэВ-масштаба, как у LHC в ЦЕРН. Коллаборация **MEG** выполнила набор статистики в 2011–2012 гг. Эксперимент, как ожидается, продлится до конца лета 2013 г., что позволит достичь чувствительности $\sim 5 \cdot 10^{-13}$, в 30–50 раз лучше, чем нынешняя граница.

Основываясь на результатах экспериментов на спектрометре **PIBETA** по редким распадам пионов и мюонов, коллаборация **PEN** провела точные измерения относительной вероятности (BR_{1e2})-распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu(\gamma)$ в Институте им. П. Шеррера, для того чтобы уменьшить настоящее 40-кратное отставание экспериментальных результатов от предсказаний теории до 6-, 7-кратного. Из-за большого подавления по спиральности $\text{BR}_{\pi e2}$ очень чувствителен к вкладам от не-($V-A$)-физики, что делает этот распад особенно подходящим предметом исследования. С хорошим теоретическим пониманием распада $\text{BR}_{\pi e2}$ его измерение становится самым точно

выполняемым тестом лептонной универсальности. Во время сеансов в 2008–2010 гг. было зарегистрировано более $2 \cdot 10^7$ $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ (π_{e2}) событий, анализ которых проводится в настоящее время методом максимального правдоподобия. Новые данные также приведут к улучшению точности полученных ранее на RIBETA результатов по радиационным π - и μ -распадам.

В 2012 г. в совместном ОИЯИ–INFN (Италия) эксперименте PAINUC продолжалась работа по обработке и анализу имеющихся данных по $\pi^{\pm 4}$ Не-взаимодействию. Изучались трехлучевые события для определения относительных вероятностей различных каналов. В 2012 г. также проводилась работа по улучшению параметров пучка пионов с энергиями ниже Δ -резонанса в мюонном тракте фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ; этот пучок выводится в экспериментальный зал (лаборатория 4 ЛЯП) в направлении XIII и используется в эксперименте PAINUC.

В соответствии с полуэмпирической моделью возбуждения коллективных резонансов, созданной в 2011 г. [27] для объяснения параметров неупругого рассеяния пионов на ядрах в области Δ -резонанса (таких как равномерное распределение углов между двумя тяжелыми, сильно ионизирующими вторичными частицами, распределение инвариантной массы трех нуклонов, наблюдаемое при поглощении положительных пионов в гелии, и др.), сила взаимодействия с окружающей ядерной средой резко падает на расстоянии 1 фм.

Согласно рекомендации 33-й сессии ПКК ОИЯИ по ядерной физике, начата реализация проекта «Экспериментальное исследование реакций ядерного синтеза в системе $pt\mu$ » (проект TRITON). Цель проекта состоит в получении новых экспериментальных данных для реакций синтеза в среде изотопов во-

дорода, 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 $pt\mu$. В плане подготовки инфраструктуры фазотрона модернизирована система вывода пучка отрицательных мюонов в низкофоновую лабораторию. Для модернизации системы регистрации установки TRITON изготовлены детектор полного поглощения мюонов конверсии и секционированный электронный телескоп для регистрации предполагаемых электрон-позитронных пар. Проведено испытание системы сбора данных [28].

В рамках проекта NN-GDN на пучке поляризованных меченых фотонов ускорителя MAMI-C (Майнц, ФРГ) выполнен цикл экспериментов с использованием поляризованной мишени с замороженными спинами протонов, разработанной и созданной ОИЯИ совместно с ИЯИ РАН и ИЯФ (Майнц). В рамках программы исследования спиновой структуры нуклонов проведены измерения комптон-эффекта на протоне в области Δ -резонанса с поляризационными степенями свободы с целью получения первых в мире экспериментальных данных о спиновых поляризациях. Данные эксперимента обрабатываются. Выполнены измерения спиновых асимметрий сечения фоторождения π^0 и $2\pi^0$ на протоне, получены первые данные о поляризационных наблюдаемых T и F , которые позволяют определить вклад различных резонансов, а также осуществить проверку теоретических моделей. Начата работа по созданию активной (сцинтилляционной) поляризованной мишени, которая позволит измерять комптон-эффект на протоне при энергиях ниже порога рождения π -мезонов и получать спиновые поляризации модельно-независимым образом [29].

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И УСКОРИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

В последние годы в развитых странах проблема онкологических заболеваний встала очень остро. Лучевая терапия сегодня — один из основных методов лечения онкологических заболеваний. Наиболее эффективным направлением радиационной онкологии является адронная терапия пучками тяжелых ядерных частиц (протонов и ионов углерода). Она обладает целым рядом преимуществ перед обычной лучевой терапией с использованием гамма-радиации и электронов. Для внедрения современных методов лучевой терапии в практику отечественной радиологии в настоящее время под руководством Федерального медико-биологического агентства создается первый госпитальный центр радиационной медицины в г. Димитровграде Ульяновской обл. ОИЯИ и

бельгийская фирма «Ion Beam Application» (IBA) совместно разработали в 2011–2012 гг. и осуществили в Дубне сборку, шиммирование магнитного поля и пучковые испытания циклотрона C235-V3. По своим характеристикам он превосходит медицинские циклотроны IBA, уже установленные в 11 госпитальных онкологических центрах разных стран мира.

Летом и осенью 2012 г. в ОИЯИ проведены пучковые испытания медицинского циклотрона C235-V3. В ходе тестов с циркулирующим внутренним и выведенным пучками получены следующие результаты: экспериментально проверен изохронизм сформированного магнитного поля ускорителя, окончательно выбрана рабочая частота ВЧ-системы 106,27 МГц и ток питания обмоток —

760,7 А; пучок ускоряется в центральной области до радиусов 300 мм без существенных вертикальных потерь; эффективность ускорения от радиуса 300 мм до конечных радиусов в отсутствие коллимирующей диафрагмы составляет 72 % (для серийного циклотрона ИВА в этом случае она составляет около 50 %); когерентное смещение пучка от средней плоскости в процессе ускорения не превышает 2–3 мм, что обеспечивает отсутствие вертикальных потерь в основной зоне ускорения; эффективность новой системы вывода пучка, разработанной и предложенной в ОИЯИ, в первых экспериментах составляет 62 % (в серийном ускорителе ИВА с прежней системой вывода она составляет 50 %). При окончательной настройке циклотрона в г. Димитровграде планируется ее увеличить до 75 % в соответствии с экспериментальными результатами, уже полученными при установке новой системы вывода ОИЯИ в других серийных циклотронах ИВА. Циклотрон будет установлен в радиологическом центре в г. Димитровграде в 2013 г. [30, 31].

Основные цели исследований в рамках темы **«Проведение медико-биологических исследований на адронных пучках ОИЯИ»:** проведение на базе медико-технического комплекса 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 (Обнинск) и радиологическим отделением МСЧ-9 (Дубна) 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 94 пациента, при этом общее количество протонных терапевтических облучений (полей) превысило 6000. Кроме того, на гамма-аппарате «Рокус-М» были про-

лечены еще 16 пациентов. Продолжались работы по разработке и созданию программно-аппаратного комплекса для макета многолепесткового коллиматора протонного пучка на 4 пары пластин. Макет послужит прообразом полномасштабного варианта устройства на 33 пары пластин, необходимого для реализации так называемого динамического метода облучения протонным пучком различных новообразований [32].

Совместно с сотрудниками Отдела радиационной дозиметрии Института ядерной физики (Прага, Чехия) продолжались работы по измерению фоновых условий в кабине протонной терапии № 1 с использованием термомюнесцентных и трековых детекторов. В дальнейшем измерения будут продолжены с использованием других типов детекторов. 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.

Хорошо известно, что угнетенное кроветворение — одно из наиболее серьезных последствий радиационного облучения человека. Поэтому в терапии лучевых поражений чрезвычайно важную роль играют процедуры и лекарственные средства, способные восстановить кроветворные функции организма. Полученные ранее результаты исследований показали возможность стимулирования с помощью лазерного излучения угнетенного кроветворения в организме, возникшего вследствие радиационного облучения. На основании этих результатов было разработано и сконструировано новое устройство для радиационной защиты биологических объектов и терапии лучевой болезни [33]. Изготовлен опытный образец устройства. Подана соответствующая заявка на изобретение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Daya Bay Collab.* Improved Measurement of Electron Antineutrino Disappearance at Daya Bay // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. P. 171803.
2. *Daya Bay Collab.* A Side-by-Side Comparison of Daya Bay Antineutrino Detectors // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2012. V. 685. P. 78–97.
3. *Gonchar M. (Daya Bay Collab.)* Precise $\sin^2 2\theta_{13}$ Measurement by the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment // *DAE Symposium on Nuclear Physics, Dec. 3–7, New Deli.* Daya Bay document 8103.
4. *Agafonova N. et al.* Search for $\nu-\mu$ to $\nu-\tau$ Oscillations in the OPERA Experiment in the CNGS Beam // *New J. Phys.* 2012. V. 14. P. 033017.
5. *Agafonova N. et al.* Determination of a Time-Shift in the OPERA Setup Using the Horizontal Muons in the LVD and OPERA Detectors // *Eur. Phys. J. Plus.* 2012. V. 127. P. 71.
6. *Adam T. et al.* Measurement of the Neutrino Velocity with the OPERA Detector in the CNGS Beam // *JHEP.* 2012. V. 10. P. 093.

7. Bellini G. et al. First Evidence of pep Solar Neutrinos by Direct Detection in Borexino // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 051302.
8. Bellini G. et al. Absence of Day–Night Asymmetry of 862 keV ${}^7\text{Be}$ Solar Neutrino Rate in Borexino and MSW Oscillation Parameters // Phys. Lett. B. 2012. V. 707. P. 22–26.
9. Bellini G. et al. Search for Solar Axions Produced in the $p(d, {}^3\text{He})\text{A}$ Reaction with Borexino Detector // Phys. Rev. D. 2012. V. 85. P. 092003.
10. Armengaud E. et al. (EDELWEISS Collab.) A Search for Low-Mass WIMPs with EDELWEISS-II Heat-and-Ionization Detectors // Phys. Rev. D. 2012. V. 86. P. 051701(R)-1–6.
11. Ablikim M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 112003.
12. Ablikim M. et al. // Ibid. P. 182001.
13. Ablikim M. et al. // Ibid. P. 222002.
14. Ablikim M. et al. // Ibid. V. 109. P. 042003.
15. Ablikim M. et al. // Ibid. P. 172002.
16. Garipov G. et al. The TUS Fresnel Mirror Production and Optical Parameters Measurement // Part. Nucl., Lett. 2013. V. 10. P. 84–94.
17. Aad G. et al. Further Search for Supersymmetry at $\sqrt{s} = 7$ TeV in Final States with Jets, Missing Transverse Momentum and Isolated Leptons with the ATLAS Detector. ATLAS Collaboration // Phys. Rev. D. 2012. V. 86. P. 092002.
18. Aad G. et al. Measurement of the Inclusive W^+ and $Z\gamma$ Cross Sections in the Electron and Muon Decay Channels in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // Phys. Rev. D. 2012. V. 85, No. 7. P. 072004-1–39.
19. CDF, D0 Collab. Combination of the Top-Quark Mass Measurements from the Tevatron Collider // Phys. Rev. D. 2012. V. 86. P. 092003.
20. Flyagin V. B., Glagolev V. V. The Top Quark Properties Measured in $p\bar{p}$ Collisions Using CDF Detector at 1.96 TeV // Part. Nucl. 2012. V. 43, No. 1. P. 106–127.
21. Bardin D. et al. SANC Integrator in the Progress: QCD and EW Contributions // JETP Lett. 2012. V. 96, No. 5. P. 285–289.
22. Arbuzov A. B., Sadykov R. R., Was Z. Bremsstrahlung in Decays of Electroweak Bosons. Preprint CERN-TH-2012-354, CERN, Geneva, 2012. 26 p.
23. Tsirkov D. et al. Differential Cross Section and Analyzing Power of the $\bar{p}p \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ Reaction at 353 MeV // Phys. Lett. B. 2012. V. 712. P. 370.
24. Dymov S. et al. Differential Cross Section and Analyzing Power of the Quasifree $\bar{p}n \rightarrow \{pp\}_s\pi^-$ Reaction at 353 MeV // Phys. Lett. B. 2012. V. 712. P. 375.
25. Mchedishvili D. et al. The Neutron-Proton Charge-Exchange Amplitudes Measured in the $dp \rightarrow ppn$ Reaction. nucl-ex/1212.2365; Eur. Phys. J. A. (submitted).
26. Augustyniak W. et al. Polarization of a Stored Beam by Spin-Filtering // Phys. Lett. B. 2012. V. 718. P. 64.
27. Gnesi I. et al. // Eur. Phys. J. 2011. V. 47. P. 3.
28. Bogdanova L. N. et al. Experimental Study of Nuclear Fusion Reactions in a $pt\mu$ System // Part. Nucl., Lett. 2012. V. 9, No. 8. P. 605–614.
29. Borisov N. S. et al. Frozen-Spin Target for Experiments at MAMI C // Nucl. Instr. Meth. A. (submitted).
30. Karamysheva G. et al. Beam Dynamics in a C253 Cyclotron for Proton Therapy // Tech. Phys. 2012. V. 57, No. 1. P. 106–112.
31. Костромин С. А. и др. Влияние магнитного поля от ускоряющей системы на динамику пучка в циклотроне // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 4–5. С. 384.
32. Агапов А. В. и др. Технология расчета и изготовления устройств формирования протонного пучка в радиотерапии // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 6–7(176–177). С. 924–936.
33. Voskanyan K. et al. Laser Device for the Protection of Biological Objects from the Damaging Action of Ionizing Radiation // J. Phys. Sci. Appl. 2012. V. 2(6). P. 152–157.