

# ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМ. В. П. ДЖЕЛЕПОВА

## ФИЗИКА НЕЙТРИНО И РЕДКИХ ПРОЦЕССОВ

Основной целью проекта **GEMMA** является измерение магнитного момента нейтрино с чувствительностью на уровне  $(4-7) \cdot 10^{-12} \mu_B$ , где  $\mu_B$  — магнетон Бора. Спектрометр GEMMA состоит из 1,5-килограммового сверхчистого германиевого детектора, окруженного пассивной и активной защитой, который расположен под 3-гигаваттным реактором № 2 Калининской АЭС на расстоянии 13,9 м от центра активной зоны. Анализ первых данных, полученных при включенном и выключенном реакторе (6200 и 2064 ч в 2005 и 2006 г. соответственно), позволил установить новый верхний предел на магнитный момент нейтрино  $5,8 \cdot 10^{-11} \mu_B$ . После анализа данных второй фазы эксперимента совместно с первой (6798 и 1020 ч в режиме включенного и заглушенного реактора) предел на магнитный момент нейтрино был улучшен до  $(3,8-4,0) \cdot 10^{-11} \mu_B$ . Третья фаза эксперимента стартовала в июне 2008 г. и продолжится до осени 2009 г. Ожидается, что чувствительность эксперимента составит  $(2,0-2,5) \times 10^{-11} \mu_B$ .

Основной целью эксперимента **NEMO-3** является поиск двойного двухнейтринного и безнейтринного бета-распада для семи различных изотопов. Двойной безнейтринный бета-распад  $(0\nu\beta\beta)$  является одним из свидетельств новой физики за пределами стандартной модели. Его экспериментальное обнаружение позволит подтвердить майорановскую природу нейтрино и установить абсолютную шкалу нейтринных масс. Детектор NEMO-3 работает при стабильных условиях с февраля 2003 г. в Моданской подземной лаборатории (LSM, Франция). В 2008 г. с использованием данных от 8024 ч наблюдения были изучены процессы двойного бета-распада для  $^{100}\text{Mo}$

на  $0_1^+$  и  $2_1^+$  возбужденные уровни  $^{100}\text{Ru}$ . Для перехода на  $0_1^+$ -уровень время полураспада составило  $T_{1/2}(2\nu\beta\beta) = (5,7_{-0,9}^{+1,3}(\text{стат.}) \pm 0,8(\text{сист.})) \cdot 10^{20}$  лет. Также получена информация об энергетическом и угловом распределении продуктов распада. Двойной безнейтринный бета-распад на  $0_1^+$ -уровень обнаружен не был. Соответствующий предел на время полураспада в этом процессе с 90%-й вероятностью составил  $T_{1/2}(0\nu\beta\beta)(0^+ \rightarrow 0_1^+) > 8,9 \cdot 10^{22}$  лет. Поиски двойного бета-распада на  $2_1^+$  возбужденный уровень позволили установить пределы для времени полураспада при двухнейтринной и безнейтринной модах, равные соответственно с 90%-й вероятностью  $T_{1/2}(2\nu\beta\beta)(0^+ \rightarrow 2_1^+) > 1,1 \cdot 10^{21}$  лет и  $T_{1/2}(0\nu\beta\beta)(0^+ \rightarrow 2_1^+) > 1,6 \cdot 10^{23}$  лет [1].

Основной целью эксперимента **GERDA** является поиск безнейтринного двойного бета-распада  $(0\nu\beta\beta)$   $^{76}\text{Ge}$ . Установка будет работать с германиевыми детекторами (из обогащенного  $^{76}\text{Ge}$ ), погруженными непосредственно в жидкий аргон (LAr). В настоящее время установка GERDA находится в стадии завершения сборки в подземной лаборатории LNGS (Италия). В ноябре 2008 г. основная часть установки была собрана. Протестированы восемь детекторов, взятые из предыдущих экспериментов «Heidelberg–Moscow» и IGEX, получено прежнее энергетическое разрешение, детекторы подготовлены для помещения в жидкий аргон. Разработана конструкция тестовой установки LArGe, рассчитанная на работу с 1 т жидкого аргона в качестве сцинтиллятора. Все элементы установки LArGe произведены и готовы к сборке в подземной лаборатории. Планируется, что полностью установка GERDA будет собрана в 2009 г.

В коллаборацию GERDA входят 80 физиков из 13 институтов пяти стран. Ученые из ОИЯИ участвуют в решении наиболее важных задач. В ОИЯИ измерена радиоактивность наибольшей части конструкционных материалов установки. Создан стенд для сборки и тестирования модулей мюонного вето на основе пластмассовых сцинтилляторов. В результате был выбран оптимальный дизайн и созданы оптимальные модули. Первая их часть (10 из 40) была собрана, оснащена электроникой и протестирована в ОИЯИ.

Для исследования функции отклика установки LArGe в ОИЯИ был создан точечный альфа-источник  $^{148}\text{Gd}$  с требуемой активностью. С помощью источника продемонстрирована хорошая прозрачность LAr-сцинтиллятора. Была создана специальная система для передвижения источника альфа-лучей, с помощью которой показано, что германиевые детекторы могут работать в жидком аргоне, энергетическое разрешение и ток утечки у них остается в пределах нормы после нескольких циклов помещения и подъема их из жидкого аргона.

Поиск процессов двойного бета-распада  $^{106}\text{Cd}$  проводится в Моданской подземной лаборатории (4800 м вод. экв., Франция) с использованием 32 низкофононых детекторов высокоэффективного низкофонового спектрометра **TGV-2** (телескоп германиевый вертикальный) с чувствительным объемом  $400\text{ см}^3$  (около 3 кг Ge). Произведена оценка предела  $0\nu EC/EC$  распада  $^{106}\text{Cd}$  по собранным данным и данным, которые будут собраны в 2009 г. ( $\sim 10\,000$  ч), она составляет  $T_{1/2} \geq 1,5 \cdot 10^{20}$  лет с 90%-м уровнем достоверности. Также был получен новый предел на время полураспада  $2\nu EC/EC$  в  $^{106}\text{Cd}$ :  $T_{1/2} \geq 4,5 \cdot 10^{20}$  лет с 90%-м уровнем достоверности. Были улучшены пределы на время для других ветвей распада  $^{106}\text{Cd}$ :  $T_{1/2}(2\nu\beta\beta^+) \geq 1,4 \cdot 10^{20}$  и  $T_{1/2}(2\nu\beta^+EC) \geq 1,1 \cdot 10^{20}$  лет для  $0^+ \rightarrow 0^+$ -перехода,  $T_{1/2}(2\nu\beta^+\beta^+) \geq 1,6 \cdot 10^{20}$ ,  $T_{1/2}(2\nu\beta^+EC) \geq 1,1 \cdot 10^{20}$  и  $T_{1/2}(2\nu EC/EC) \geq 6 \cdot 10^{19}$  лет для  $0^+ \rightarrow 2^+$ , 512-кэВ переходов,  $T_{1/2}(2\nu\beta^+EC) \geq 1,5 \cdot 10^{20}$  лет и  $T_{1/2}(2\nu EC/EC) \geq 5 \cdot 10^{19}$  лет для  $0^+ \rightarrow 0_1^+$ , 1334-кэВ переходов [2].

Эксперимент **EDELWEISS**, проводящийся в подземной лаборатории (LSM), в туннеле Фрежус, соединяющем Францию и Италию, посвящен прямому поиску небарионной холодной темной материи в виде массивных слабодействующих частиц (WIMPs). Принцип прямого поиска заключается в измерении энергвыделения, производимого при упругом рассеянии WIMP на ядрах мишени, состоящей из обычной материи. В **EDELWEISS** детекторами являются криогенные Ge-болометры, имеющие возможность одновременного измерения фонного и ионизационного сигналов при температуре 20 мК. Все параметры установки **EDELWEISS-2** прошли тестирование в 2006–2007 гг. Среднее энергетическое

разрешение по фотонному каналу составило 2 кэВ, в то время как лучшим является 1,2 кэВ для Ge/NTD-детекторов. Энергетическое разрешение для ионизационных каналов 1,5–2 кэВ. Возможность выделения гамма-событий составляет  $10^4$ . В данный момент на установке из 28 детекторов идет работа по набору низкофононых данных для повышения чувствительности к WIMP-нуклонному сечению взаимодействия до  $10^{-7}$  пб (масса WIMP 100 ГэВ). В течение 2 лет для увеличения чувствительности к установке будут добавлены еще 40 детекторов.

В рамках эксперимента **E391a** продолжен анализ информации, полученной ранее. С 90%-м уровнем достоверности экспериментально определена новая верхняя граница относительной вероятности распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ :  $6,7 \cdot 10^{-8}$ . Полученное экспериментальное значение является в настоящее время самым точным в мире. Проведен анализ работы главного баррель-калориметра установки **E391a**. Сделана попытка обнаружения новой псевдоскалярной частицы в распаде  $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0 + X$ , частица не найдена, с 90%-й вероятностью установлен верхний предел на относительную вероятность, который составил  $2,4 \cdot 10^{-7}$  [6–8].

В рамках международного сотрудничества в Институте Пауля Шеррера (PSI) коллаборация PEN с помощью детектора **PIBETA** проводит новые измерения вероятности ( $B_{\pi e 2}$ ) распада  $\pi^+ \rightarrow e^+\nu(\gamma)$  с относительной точностью менее  $5 \cdot 10^{-4}$ . В 2008 г. успешно проведен сеанс по набору экспериментальных данных, во время которого параметры установки были доведены до проектных значений. К настоящему моменту зарегистрировано  $4,7 \cdot 10^6$  событий распада  $\pi \rightarrow e\nu$ , что соответствует статистической неопределенности  $\delta B/B = 5 \cdot 10^{-4}$  [9].

На установке **MEG**, созданной для поиска распада  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  на уровне вероятности  $10^{-14}$  в 2008 г., проведен первый физический сеанс по набору статистики. Этот распад интересен тем, что, будучи запрещенным в стандартной модели, в некоторых фундаментальных теориях он может проходить на уровне  $10^{-14}$ . Поэтому этот эксперимент имеет реальный шанс обнаружить 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 2008 г. эксперимент **OPERA** имел первый полномасштабный сеанс работы в Гран-Сассо на нейтринном пучке из ЦЕРН, что позволило зарегистрировать 1680 нейтринных взаимодействий в детекторе. В 2009 г. ожидается регистрация около 2500 нейтринных взаимодействий. Таким образом, вместе с событиями 2008 г. количество зарегистрированных взаимодействий будет достаточным для обнаружения первого тау-нейтрино в пучке мюонных нейтрино. Это будет первым в мире прямым наблюдением нейтринных осцилляций в режиме появления новых ти-

пов нейтрино. Экспериментальные данные, наблюдавшиеся до сих пор и свидетельствующие об осцилляциях нейтрино, демонстрировали пока только дефицит, т. е. исчезновение нейтрино.

В 2008 г. ОИЯИ одновременно с участием в наборе данных в Гран-Сассо создал первую в России автоматическую сканирующую станцию, полностью аналогичную используемым другими участниками эксперимента. Одновременно продолжалась работа по развитию программного обеспечения, связанного с решением задач целеуказания, т. е. локализации вершины нейтринных событий и определения эмульсионного блока, который нужно извлечь из детектора для анализа вершины события. Был разработан пакет *BrickFinder*, который позволяет решать эту задачу с высокой эффективностью. На событиях Монте-Карло эффективность обнаружения вершины в первом наиболее вероятном блоке была оценена 75 %, в первых двух блоках — 87 %. В настоящее время по мере анализа реальных событий сеанса 2008 г. эффективность поиска вершин событий с помощью программы *BrickFinder* уточняется и одновременно настраиваются алгоритмы поиска треков и анализа адронных ливней, зарегистрированных в электронных детекторах.

Продолжается набор данных в эксперименте **BOREXINO** после успешного запуска детектора в мае 2007 г. Основные усилия коллаборации в течение года были направлены на улучшение точности измерения потока солнечных нейтрино от  ${}^7\text{Be}$ , на сегодня опубликованы результаты анализа 192 сут реального времени. Поток нейтрино от  ${}^7\text{Be}$  за 192 сут составил  $(49 \pm 3(\text{стат.}) \pm 4(\text{сист.}))$  соб./сут/100 т сцинтиллятора [10]. Сигнал, ожидаемый в стандартной модели Солнца с высокой металличностью, составляет  $(74 \pm 4)$  соб./сут/100 т, эффект MSW-LMA уменьшает ожидаемую скорость счета до  $(48 \pm 4)$  соб./сут/100 т. Гипотеза отсутствия осцилляций несовместима с измерением на уровне  $4\sigma$ .

Другим интересным результатом, полученным с теми же данными, является ограничение на эффективный магнитный момент нейтрино. Изучение максимально возможных отклонений экспериментального спектра электронов отдачи от формы спек-

тра для чисто электрослабого взаимодействия, выполненное на данных **BOREXINO**, приводит к новому ограничению на эффективный магнитный момент нейтрино  $\mu_\nu < 5,4 \cdot 10^{-11} \mu_B$  с 90%-й вероятностью.

Целью эксперимента **TUS** является исследование спектра космических лучей (КЛ) предельно высоких энергий в области  $10^{19} - 10^{20}$  эВ. Особый интерес к этой области обусловлен эффектом ГЗК — обрезанием спектра КЛ из-за взаимодействия первичных частиц с фотонами реликтового излучения. Вследствие ГЗК-обрезания космическая среда становится непрозрачной: у протона с энергией больше  $5 \cdot 10^{19}$  эВ длина свободного пробега равна  $\approx 50$  Мпк. В настоящее время с целью увеличения статистики в 10–100 раз в области  $10^{19} - 10^{20}$  эВ создаются несколько экспериментов космического базирования, в том числе **TUS/КЛПВЭ**.

ОИЯИ и НПО «Энергия» создают оптическую систему, являющуюся одним из основных компонентов **TUS**, состоящую из зеркала Френеля большой площади с матрицей из 256 фотоумножителей в его фокусе. В 2008 г. с участием ОИЯИ изготовлены прецизионные пресс-формы, с помощью которых изготовлен технологический образец зеркала.

Целью проекта **NUCLEON** является прямое измерение атмосферных ливней в околоземном пространстве при энергии  $10^{11} - 10^{15}$  эВ в районе зарядов ядер до  $Z \approx 30$ . В проекте сотрудники ЛЯП ОИЯИ отвечают за разработку, изготовление и испытания сцинтилляционной системы быстрого триггера (ССБТ), в том числе триггерной электроники, для выработки триггера 1-го и 2-го уровней в условиях длительного (3–5 лет) полета на автоматическом космическом аппарате.

В 2008 г. на ускорителе SPS ЦЕРН был проведен тест технологического образца ССБТ в составе детектора **NUCLEON** на пучке  $\pi^-$ -мезонов с энергиями 350, 300, 250, 200 ГэВ, а также на частицах минимальной ионизации — мюонах из гало пучка. Набранная статистика была получена при различных ориентациях установки по отношению к пучку, чтобы проверить эффективность дискриминации внеапертурных частиц триггерной системой.

## ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В рамках эксперимента **CDF** главными результатами 2008 г. были прецизионное измерение массы топ-кварка и обеспечение эффективной работы установки **CDF**. Группа из ОИЯИ внесла существенный вклад в определение массы топ-кварка. В дилептон-

ной топологии распада пары топ–анти топ на статистике  $2,19 \text{ фб}^{-1}$  получено  $M_{\text{top}} = (165,5_{-3,3}^{+3,4}(\text{стат.}) \pm 3,1(\text{сист.})) \text{ ГэВ}/c^2$  [11, 12]. При этом для увеличения числа выбранных событий был использован так называемый отбор лептон + трек.

На статистике  $3,0 \text{ fb}^{-1}$  экспериментами CDF и D0 с 95 %-й вероятностью установлены верхние пределы на сечение рождения бозона Хиггса для масс 165, 170 и 175 ГэВ. Эти пределы в 1,2, 1,0 и 1,3 раза выше, чем сечение образования бозона Хиггса, предсказанное стандартной моделью. В результате с 95 %-й вероятностью исключено рождение бозона Хиггса из стандартной модели в области массы  $m_H = 170 \text{ ГэВ}$ . Эти результаты существенно увеличивают значимость индивидуальных пределов, полученных отдельно на CDF и D0, и обеспечивают новые данные для области допустимых масс бозона Хиггса в рамках стандартной модели за пределами прямых измерений LEP [13].

В рамках эксперимента D0 физики Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и университетов Мичигана и Оклахомы (США) выполнили первое наблюдение «прелестного» бариона  $\Omega_b$ . Американское физическое общество признало это открытие одним из 10 наиболее значимых в 2008 г.

В июле 2008 г. в Пекине (КНР) в новом детекторе BESS-III зарегистрированы первые столкновения пучков в модернизированном коллайдере ВЕРС-II. На сегодняшний день достигнута светимость ускорителя  $1,2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , что составляет 12 % от проектной величины. В 2008 г. основными задачами группы ОИЯИ в проекте BESS-III были участие в подготовке программы физических исследований эксперимента, разработка программного обеспечения и алгоритмов анализа данных, участие в сеансах. Одним из основных направлений работы группы ОИЯИ является исследование свойств тау-лептона. Было предложено измерить адронные спектральные функции в этом распаде. Потенциал BESS-III позволит провести независимое измерение данных функций и существенно дополнить имеющиеся данные. В 2008 г. завершена разработка предложений по изучению двухфотонных процессов на основе проведенного статистического моделирования. В ходе подготовки предложений проведен обзор экспериментальных данных по изучению двухфотонного образования адронов вблизи порога. Разработан новый генератор двухфотонных событий для моделирования образования адронов при низких энергиях. Продолжены исследования ряда распадов скалярных состояний чармония и нейтральных D-мезонов, включающих в себя далиц-анализ распада  $\eta_c$  на три псевдоскалярных мезона, и вероятностей каналов распада и поляризации в распадах  $\eta_{c^-}$ ,  $\chi_{c^-}$ ,  $D^0$ -мезонов на два векторных состояния. В 2008 г. был разработан метод измерения вероятностей канала распада  $D^0 \rightarrow K^* + \rho^0$ . Предварительные результаты статистического моделирования показали, что в начальный период работы установки (набор данных в течение 1–2 мес. работы ускорителя при светимости 10 % от проектной) может быть достигнута точность, сравнимая с текущим значением в PDG.

В 2008 г. начаты работы в новом направлении исследований, а именно участие в спектроскопии легких адронов. Наиболее подходящим методом анализа данных в этой области является парциально-волновой анализ, позволяющий исследовать свойства промежуточных резонансов в сложных распадах. Существующая на BESS-III методика и программное обеспечение разработаны в ходе анализа данных предыдущего эксперимента BESS-II. Применение их для анализа данных BESS-III сопряжено с рядом трудностей, связанных с многократно возросшей статистикой. Группой из ОИЯИ и ПИАФ были разработаны алгоритмы и создано программное обеспечение для парциально-волнового анализа событий распада  $J/\psi$  на три псевдоскалярных мезона и на два псевдоскалярных мезона с излучением гамма-кванта [14].

В рамках работ по проекту ATLAS TileCal с помощью нового метода адронной калибровки была выполнена реконструкция энергии пионов на основе данных, полученных в 2004 г. во время тестового пуска (энергия 10–350 ГэВ, псевдобыстрота  $\eta = 0,25$ ) [15, 16]. Энергетическое разрешение, полученное традиционным методом через определение энергии, поглощенной в материале между аргонным и тайл-калориметром, составило  $(67 \pm 2) \%/ \sqrt{E} + (3,9 \pm 0,2) \% + (95 \pm 22) \%$  при линейности  $\pm 1 \%$ . Разработан и применен нейросетевой алгоритм расчета энергетических потерь адронного ливня в мертвом веществе калориметрического комплекса, достигнуто проектное значение энергетического разрешения для адронов в детекторе ATLAS:  $50 \%/ \sqrt{E} + 3 \%$ . Предложен и реализован не имеющий аналогов метод измерения нескомпенсированности электромагнитного калориметра. Измерена нескомпенсированность центрального жидкоаргонного электромагнитного калориметра эксперимента ATLAS,  $e/h = 1,74 \pm 0,04 \pm 0,04$ . На основе созданного и примененного метода измерения энергии электронов в адронном тайл-калориметре с лучшей точностью определена его нескомпенсированность  $e/h = 1,36 \pm 0,01 \pm 0,01$ . Проведена детальная электромагнитная калибровка 12 % модулей адронного тайл-калориметра, что позволило ввести его энергетическую шкалу. Разработан и применен метод локальной адронной калибровки калориметрического комплекса эксперимента ATLAS, который дает возможность определять энергию одиночных адронов с проектной точностью [17, 18].

В 2008 г. велась настройка вычислительного центра ОИЯИ для приема и обработки данных, начата работа по подготовке к анализу данных с использованием грид, а также практически завершено создание пункта мониторинга установки ATLAS в ОИЯИ. В рамках участия в консорциуме EGEE–RDIG — российском узле сети грид, ОИЯИ выполняет в эксперименте ATLAS роль одного из центров моделирования и анализа данных (Tier-2). С конца 2005 г. на компьютерах фермы общего пользования цен-

трального вычислительного комплекса ОИЯИ было установлено и постоянно поддерживается и обновляется программное обеспечение эксперимента ATLAS. Элемент хранения данных центрального вычислительного комплекса был интегрирован в систему управления данными ATLAS (ATLAS DDM). ОИЯИ принял участие в проведении комплексных испытаний данной системы, которые показали надежную работу вычислительного центра и, в первую очередь, элемента хранения ОИЯИ в составе системы управления данными ATLAS. Была продемонстрирована готовность ОИЯИ к приему первых данных с установки.

Большой объем данных ATLAS делает невозможным применение традиционных способов анализа и требует использования специализированного программного обеспечения для обработки географически распределенных данных. Эта особенность усложняет подготовку к физическому анализу и требует соответствующей переподготовки специалистов. Начиная с 2006 г. в ОИЯИ ведутся работы по освоению программ распределенного анализа данных эксперимента ATLAS (GANGA и PANDA). Пользовательские программы физического анализа адаптируются для работы с широким использованием возможностей грид. Проводится обучение специалистов особенностям анализа данных с применением грид. В рамках данной деятельности в течение 2007–2008 г. в ОИЯИ были проведены четыре учебно-практических курса по использованию инструментов грид в распределенном анализе данных ATLAS, в которых приняли участие сотрудники как ОИЯИ, так и других российских научных центров (ИТЭФ, МИФИ, ПИЯФ, ИФВЭ, НИИЯФ МГУ).

Современные информационные технологии позволяют упростить контроль и мониторинг установки ATLAS и делают возможным получение необходимых данных о состоянии детектора практически из любой точки мира. Для реализации этой возможности было решено создать пункт дистанционного мониторинга установки ATLAS в ОИЯИ. Наличие такого пункта даст возможность любому желающему, включая экспертов подсистем, в любое время получать сведения о состоянии установки ATLAS и контролировать качество данных непосредственно из ОИЯИ. В настоящее время рассматривается возможность дистанционного участия в сменах. Пункт мониторинга ATLAS позволит также проводить ознакомление сотрудников с организацией мониторинга и контроля качества данных установки ATLAS и обучение пользованию специализированным программным обеспечением перед участием в сеансах набора статистики в ЦЕРН. Работы по созданию пункта мониторинга установки ATLAS в ОИЯИ были начаты в 2007 г. При активном участии специалистов Лаборатории информационных технологий (руководитель В. М. Котов)

и Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (руководитель А. С. Жемчугов) были разработаны программы удаленного мониторинга и контроля качества данных ATLAS. Запуск пункта удаленного мониторинга установки ATLAS в ОИЯИ состоялся в октябре 2008 г.

В 2008 г. группой SANC проводились исследования по применению системы SANC к физике на ЛНС и на  $e^+e^-$ -коллайдерах. Современное состояние системы включает в себя теоретические предсказания практически всех трехчастичных и многих четырехчастичных процессов стандартной модели на однопетлевом уровне точности. SANC версия v1.10 доступна на сервере в ЦЕРН <http://pcphsanc.cern.ch> и в Дубне <http://sanc.jinr.ru>. В 2008 г. группа продолжила прецизионный анализ процессов типа Дрелла-Яна, чем практически завершила эту часть исследований [19–21]. Были продолжены прецизионные расчеты вероятностей полупетонных и кварковых каналов распадов топ-кварка и процессов его одиночного рождения. Продолжаются расчеты фермион-бозонных ( $f\bar{f}bb$ ) процессов на партонном уровне [22]. После свертки с партоном распределением процессы  $pp \rightarrow HZ, H, Z, ZZ$  представляют большой интерес для физики ЛНС, а в  $e^+e^-$ -аннигиляции — для линейных коллайдеров.

Основной целью проекта DIRAC является измерение времени жизни  $\pi^+\pi^-$ ,  $\pi^+K^-$  и  $\pi^-K^+$ -атомов для проверки предсказаний низкоэнергетической КХД. В 2008 г. была произведена окончательная настройка всей установки после модернизации, включая детекторы и электронику. В течение шести месяцев проходил сеанс по настройке установки и по набору данных на никелевой мишени для наблюдения  $\pi^+K^-$  и  $\pi^-K^+$ -атомов; время жизни  $\pi^+\pi^-$ -атома измерено с точностью лучше 6%. Была завершена обработка и анализ данных, полученных в 2001–2003 гг., время жизни  $\pi^+\pi^-$ -атома получено с точностью 10%. Была модернизирована программа анализа данных для обработки данных с новых детекторов и электроники. Данные, полученные в 2007 г., полностью обработаны и на их основании готовится статья о поиске  $\pi^+K^-$  и  $\pi^-K^+$ -атомов.

В рамках проекта SPRING проведено исследование реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s + \pi^0$  в широкой области промежуточных энергий от 0,5 до 2,0 ГэВ с регистрацией в конечном состоянии  $pp$ -пары в  $^1S_0$ -состоянии. Эта реакция является кинематическим аналогом хорошо изученного процесса  $pp \rightarrow d + \pi^+$ , однако из-за ограничений по спину и четности в ней подавлен доминирующий вклад от  $\Delta$ -изобары в промежуточном состоянии, поэтому могут проявляться другие механизмы. Измерены энергетическая (рис. 1) и угловая зависимости дифференциального сечения, из сравнения с данными  $pp \rightarrow d + \pi^+$  получено отношение синглетного и триплетного матричных элементов.

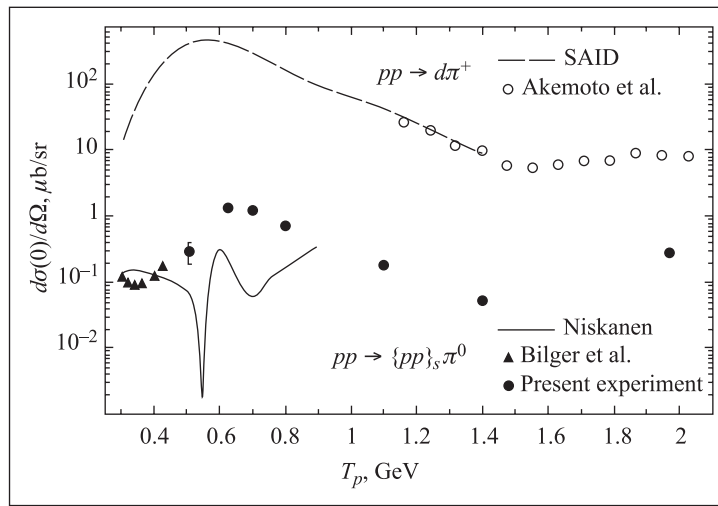


Рис. 1. Дифференциальное сечение  $pp \rightarrow \{pp\}_s + \pi^0$  (темные кружки), предсказания модели (J. Niskanen, сплошная линия), сравнение с данными по  $pp \rightarrow d + \pi^+$  (штриховая линия и светлые кружки)

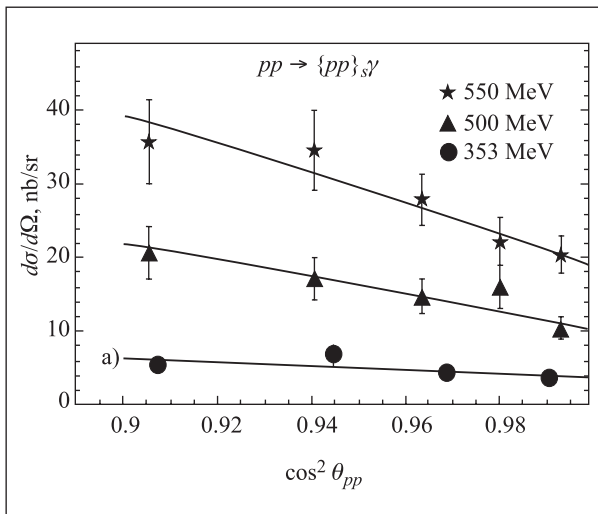


Рис. 2. Угловая зависимость дифференциального сечения  $pp \rightarrow \{pp\}_s + \gamma$

Впервые при промежуточных энергиях наблюдался процесс  $pp \rightarrow \{pp\}_s + \gamma$ , обратный по отношению к фоторасщеплению дипротона. Подобно фоторасщеплению дейтрона, интенсивно исследованному ранее, он дает информацию о нуклон-нуклонных взаимодействиях на коротких расстояниях. Препятствия эксперименты по фоторасщеплению дипронов были выполнены с использованием дипротонных конфигураций, содержащихся внутри легких ядер, и поэтому показывали значительный фон, связанный с трехнуклонным поглощением. В отличие от этого процесс  $pp \rightarrow \{pp\}_s + \gamma$  с участием свободных дипронов в  $^1S_0$ -состоянии не содержит таких затруднений. Измерена угловая зависимость дифференциального сечения реакции при энергии пучка 0,35, 0,5 и 0,55 ГэВ (рис. 2). Несмотря на подавленность  $S$ -волнового вклада  $\Delta N$ -взаимодействий в промежуточном состоянии, наблюдаемый рост сечения с увеличением энергии может свидетельствовать о возбуждении  $\Delta$ -изобары в волнах более высокого порядка [23–26].

## ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пучки ионов углерода с энергией до 400 МэВ/нуклон успешно применяются для лечения радиорезистентных опухолей. Разработка сверхпроводящего компактного изохронного циклотрона С400 осуществляется специалистами фирмы ИВА (Бельгия) в сотрудничестве с ЛЯП ОИЯИ. Циклотрон будет ускорять ионы с отношением заряда к массе 0,5. Ионы  $^{12}\text{C}^{6+}$  и  $^4\text{He}^{2+}$  будут ускорены до

энергии 400 МэВ/нуклон и выведены электростатическим дефлектором, ионы молекулярного водорода  $\text{H}_2^+$  будут ускорены до энергии 270 МэВ и выведены перезарядкой. За 2008 г. были проведены расчеты магнитного поля по трехмерной программе TOSCA, что позволило добиться требуемой изохронности, достаточной фокусировки пучка на протяжении всего цикла ускорения и требуемых параметров в зоне

вывода. Проведены расчеты динамики пучка в зоне ускорения и вывода, закончены расчеты линии аксиальной инъекции, центральной области циклотрона и инфлектора. Рассчитаны потери ускоряемых ионов на остаточном газе. Качество выполненных в ОИЯИ работ высоко оценено экспертной комиссией, состоящей из ведущих физиков-ускорительщиков, давших рекомендацию на изготовление ускорителя.

Основной целью исследований по теме «Развитие методов и средств лучевой терапии и сопутствующей диагностики на адронных пучках ОИЯИ» является проведение 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.

В течение 2008 г. в рамках темы 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 шесть лечебных циклов суммарной продолжительностью 26 недель. На медицинском протонном пучке курс фракционированного лучевого лечения прошли 87 пациентов, при этом общее количество протонных терапевтических облучений (полей) составило около 4500. Кроме того, на гамма-аппарате «Рокус-М» были пролечены еще 27 пациентов. Проведена плановая замена радиоактивного источника в гамма-терапевтическом аппарате «Рокус-М», что позволит использовать аппарат для клинических и радиобиологических исследований до 2018 г.

Были также продолжены радиобиологические исследования закономерностей проявления адаптивного ответа и эффекта «свидетеля» при комбинированном облучении клеток фибробластов разными видами ионизирующих излучений.

По результатам работ последних нескольких лет получен патент на изобретение RU 2 330 695 C2 «Способ защиты в эксперименте от повреждающего действия ионизирующего излучения» (авторы: К. Ш. Восканян, Г. В. Мицын, В. Н. Гаевский).

Совместно с Лабораторией радиационной биологии были продолжены эксперименты по исследованию хромосомных нарушений в клетках лимфоцитов крови человека на различной фазе клеточного цикла при воздействии на них протонного излучения различной энергии.

В рамках научного направления «Радиационная биология гена животных и человека» подготовлены и проведены первые эксперименты по сравнительному изучению молекулярных изменений структуры ДНК мини-гена black D. melanogaster у точковых му-

тантов, индуцированных разными дозами  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$ . Получены первые результаты, свидетельствующие о микроделеционной природе регистрируемых структурных изменений ДНК гена после действия фотонов [27, 28].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nasteva I. et al.* Neutrinoless Double Beta Decay Search with NEMO 3 Experiment. MAN-HEP-2008-24; arXiv: 0810.0637.
2. *Rukhadze N. I. et al.* // *Izv. RAN. Ser. Phys.* 2008. V. 72, No. 6. P. 777.
3. *Любашевский А.* Высокочувствительный детектор радона и исследование содержания  $^{222}\text{Rn}$  в эксперименте по поиску темной материи EDELWEISS-II // 58-е Совещ. по ядерной спектроскопии и структуре ядра, Москва, июнь 2008 г.
4. *Rozov S.* Measurements of Variations with Time (Seasonal and Day/Night) of Neutron Flux at Underground Laboratory LSM // 58th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure, Moscow, June 2008.
5. *Yakushev E.* Neutron Background Measurements // First ULISSE@LSM Workshop, Aussois, France, June 2008.
6. *Ahn J. K. et al.* Search for the Decay  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \nu$  // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. P. 201802; hep-ex/0712.4164.
7. *Tajima Y. et al.* Barrel Photon Detector of the KEK  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \nu$  Experiment // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2008. V. 592. P. 261–272.
8. *Tung Y. C. et al.* Search for a Light Pseudoscalar Particle in the Decay  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 + X$ ; hep-ex/0810.4222.
9. *Frlez E. et al.* Precise Measurement of the  $\pi^+ \rightarrow e + \nu$  Branching Ratio; hep-ex/0812.2829v1.
10. *Arpesella C. et al.* Direct Measurement of the  $^7\text{Be}$  Solar Neutrino Flux with 192 Days of Borexino Data; astro-ph/0805.3843.
11. *Suslov I. et al.* Top Quark Mass Measurement in the  $2.8 \text{ fb}^{-1}$  Tight Lepton and Isolated Track Sample. CDF/PHYS/TOP/PUBLIC/9456. 2008.
12. *Suslov I. et al.* Top Quark Mass Measurement in the  $2.9 \text{ fb}^{-1}$  Tight Lepton and Isolated Track Sample using Neutrino  $\phi$  Weighting Method. JINR Commun. E1-2008-173. Dubna, 2008.
13. *The CDF Collab.* Combined Upper Limit on Standard Model Higgs Boson Production for Summer 2008. CDF Note 9502.
14. *Asner D. M. et al.* Physics at BES-III. IHEP Phys. Rep. BES-III-2008-001. arXiv: 0809.1869.
15. *Budagov J. et al.* Study of the Selection Criteria Impact on the  $e/h$  Ratio Measurement in Tile Calorimeter. ATL-INT-TILECAL-2008-001. 2008.
16. *Budagov J. et al.* Artificial Neural Networks for Reconstruction of Energy Losses in Dead Materials Between Barrel LAr and Tile Calorimeters: Exploration and Results. ATL-TILECAL-PUB-2008-006. Geneva: CERN, 2008. 24 p.
17. *Kulchitsky Y. et al.* Pion Energy Reconstruction by the Local Hadronic Calibration Method with ATLAS Combined Test Beam 2004 data. ATL-TILECAL-PUB-2008-009. Geneva: CERN, 2008. 34 p.

18. *ATLAS Collaboration*. Study of the Response of the ATLAS Central Calorimeter to Pions of Energies from 3 to 9 GeV. ATLAS Publication. Geneva: CERN, 2008 (in press).
19. *Arbuzov A. et al.* // *Eur. Phys. J. C*. 2008. V. 54. P. 451–460.
20. *Arbuzov A., Sadykov R.* // *J. Exp. Theor. Phys.* 2008. V. 106. P. 488–494.
21. *Buttar C. et al.* Standard Model Handles and Candles Working Group: Tools and Jets. Summary Report. 2008. 94 p.; hep-ph/0803.0678.
22. *Bardin D. et al.* // *Eur. Phys. J. C*. 2008. V. 54. P. 187–197.
23. *Kurbatov V. et al.* // *Phys. Lett. B*. 2008. V. 661. P. 22.
24. *Komarov V. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. P. 102501.
25. *Stein J. et al.* // *Phys. Rev.* 2008. V. 11. P. 052801.
26. *Uzikov Yu.* // *Nucl. Phys. A*. 2008. V. 801. P. 114.
27. *Molokanov A. G.* Forming of the Therapeutic Proton Beam of the DLNP JINR Phasotron // *Questions of the Atomic Sci. and Techn.* 2008. No. 5.
28. *Alexandrov I. D. et al.* Spatial Arrangement of the Animal Male Germ Cell Genome: III. A New Experimental Evidences in Support of the Megarosette-loop Model of Spatial Organization of Chromosome in *Drosophila* Sperm Genome // *Adv. Mol. Biol.* 2008. V. 2, No. 1. P. 23–30.