

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ им. В. П. ДЖЕЛЕПОВА

ФИЗИКА НЕЙТРИНО И РЕДКИХ ПРОЦЕССОВ

В 2011 г. в эксперименте **OPERA** продолжался набор данных на нейтринном пучке CNGS, к концу сеанса в детекторе было зарегистрировано около 4500 новых нейтринных взаимодействий, работа по анализу этих событий и событий 2010 г. идет в 10 институтах Японии и Европы, оснащенных автоматическими сканирующими станциями. В этой работе принимает участие и ОИЯИ. Анализ данных, полученных в сеансах 2008–2009 гг., закончен [1].

В 2011 г. в эксперименте **OPERA** были проанализированы данные 2009–2011 гг. и измерена скорость мюонных нейтрино в пучке CNGS по времени их пролета от момента взаимодействия протонов SPS с мишенью в ЦЕРН до регистрации родившихся нейтрино в детекторе **OPERA** в Гран-Сассо. Получившийся неожиданный результат привлек всеобщее внимание и интерес. Оказалось, что измеренная скорость превышает скорость света. В настоящее время коллаборация **OPERA** проводит тщательные проверки полученного результата и готовится к новым измерениям в 2012 г. [2].

Продолжалась работа по развитию программного обеспечения, связанного с решением задач целеуказания, т.е. поиска вершин нейтринных взаимодействий по данным электронных детекторов. Разработанный в ОИЯИ пакет **BrickFinder** используется в качестве основного инструмента для локализации вершины нейтринных событий и определения эмульсионного блока, который нужно извлечь из детектора для анализа вершины события. Группа ОИЯИ, являясь ответственной за эту часть анализа данных, провела обработку всех событий в 2011 г.

В 2011 г. группа из ЛЯП в составе коллаборации **BOREXINO** активно участвовала в измерениях и в физическом анализе накопленных данных. В начале года коллаборация опубликовала работу о пределах

на потоки антинейтрино от Солнца и/или других возможных неидентифицированных источников [3] в энергетическом диапазоне до 8 МэВ, существующие пределы были улучшены на несколько порядков величины. Эта работа была скоординирована группой из Дубны.

Основным научным результатом, полученным на **BOREXINO** в 2011 г., является измерение потока солнечных бериллиевых нейтрино с точностью 5% [4] — проектной точностью эксперимента. Тем не менее в случае успешной доочистки сцинтиллятора (работы велись в течение года и продолжаются в настоящее время) возможно улучшение точности измерения до 3%. Эксперимент **BOREXINO** подтвердил отсутствие суточных вариаций потока бериллиевых нейтрино на уровне 1% [5].

Важным достижением группы является первое измерение потока солнечных *per*-нейтрино и ограничение потока нейтрино из углеродно-азотного цикла [6]. Опубликована первая статья из планируемого цикла работ по регистрации космических мюонов в Гран-Сассо [7].

Эксперимент **EDELWEISS-II** (*Expérience pour DEtecter Les Wimps En Site Souterrain*) направлен на прямое детектирование слабовзаимодействующих массивных частиц (**WIMP**) из галактического гало, считающихся основными кандидатами на роль темной материи. Для устранения космогенного фона эксперимент проводится в подземной лаборатории Фрежюс, расположенной на глубине, соответствующей 4700 м водного эквивалента. Для поиска рассеяния **WIMP**-нуклон **EDELWEISS-II** использует сверхчистые германиевые детекторы при температуре ниже 20 мК, с одновременным измерением ионизационных и фоновых сигналов, что позволяет проводить высокоэффективный отбор фоновых событий.

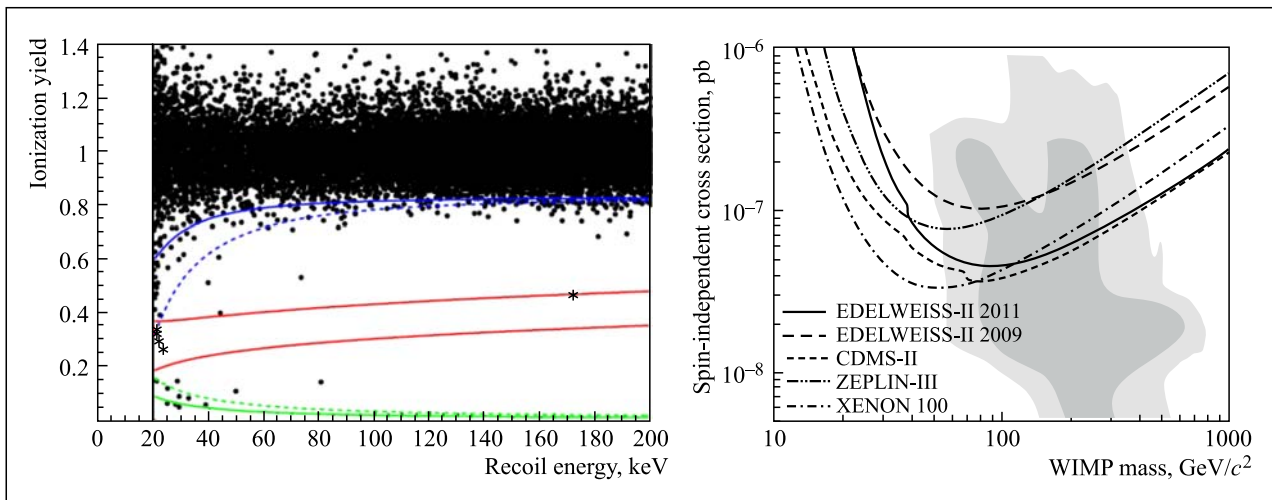


Рис. 1. Слева: ионизационный выход для событий, зарегистрированных в EDELWEISS-II при поиске WIMP. Кандидаты WIMP отмечены звездочками. Справа: результат EDELWEISS-II по поиску упругого рассеяния WIMP–нуклон

Коллаборация EDELWEISS-II использовала 10 детекторов с копланарными кольцевыми электродами, массой 400 г каждый, для прямого детектирования WIMP. Полученный предел на сечение спин-независимого взаимодействия WIMP–нуклон, в предположении, что зарегистрированные события в области поиска WIMP являются фоном, составляет $4,4 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$ (для 90%-го уровня достоверности и для WIMP с массой 85 ГэВ/c²) (рис. 1).

В эксперименте EDELWEISS в 2011 г. было начато тестирование абсолютно новых детекторов со значительно увеличенной массой (800 г каждый) и с боковыми кольцевыми электродами (детекторы FID800), что потенциально позволит уменьшить фон еще в несколько раз. Сорок детекторов FID800 будут произведены и установлены в EDELWEISS, что даст кумулятивную массу чувствительного объема всех детекторов примерно 24 кг. Кроме того, значительным улучшениям подвергнутся криогенная система, защита установки, будет использоваться новая быстрая электроника для набора данных. Целью проекта на следующие несколько лет станет набор более 3000 кг·сут статистики для достижения чувствительности на сечение рассеяния WIMP–нуклон лучше $5 \cdot 10^{-45} \text{ см}^2$.

В 2011 г. коллаборация EDELWEISS решила расширить зону поиска WIMP на область WIMP с малой массой. Для этих исследований будут использоваться низкороговые сверхчистые германиевые детекторы с точечным контактом, созданные в ОИЯИ. Началом этих исследований стали тесты с одним из таких детекторов (массой 200 г) в июне 2011 г. В 2012 г. один из детекторов (массой 400 г) будет подготовлен для EDELWEISS. Предполагается не только проверить результат CoGeNT, но и установить новый уровень чувствительности для области малых масс WIMP [8, 9].

Эксперимент GERDA (GERmanium Detector Array) является экспериментом нового поколения, нацеленным на поиск безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$) ⁷⁶Ge. $0\nu\beta\beta$ -распад является уникальным процессом, открытие и изучение которого даст сведения о таких пока неизвестных параметрах, как тип и массовая шкала нейтрино.

Значительный прогресс в разработке и вводе в строй установки эксперимента был достигнут в течение нескольких последних лет [10]. Сборка комплексной установки GERDA была закончена, и начались работы по ее физическому пуску и тестовым измерениям с первым стрингом, состоящим из трех «раздетых» детекторов из натурального германия, которые были помещены внутри криостата, заполненного 90 т жидкого аргона (LAr).

На 1-й фазе эксперимента GERDA жидкий аргон используется только в качестве пассивной защиты. Для дальнейшего снижения фона на следующих фазах эксперимента необходимо разработать дополнительные методы активного подавления фоновых событий. Установка-прототип GERDA-LArGe, рассчитанная на работу с HPGe-детекторами, погруженными в криостат с 1,4 т жидкого аргона, работающего как сцинтилятор, предназначена в первую очередь для отработки методов подавления внутреннего фона Ge-детекторов за счет антисовпадений с LAr-сцинтилляционными сигналами [11]. Однако в 2011 г. для LArGe была поставлена еще одна задача, связанная с детальным исследованием пространственного распределения ⁴²Ar и подвижности ионов дочернего изотопа ⁴²K в жидком аргоне.

Результаты тестовых измерений с тремя детекторами из необогащенного германия показали, что скорость счета детекторов обусловлена в основном присутствием в жидком аргоне радиоактивного изотопа ⁴²Ar, концентрация которого оказалась намного

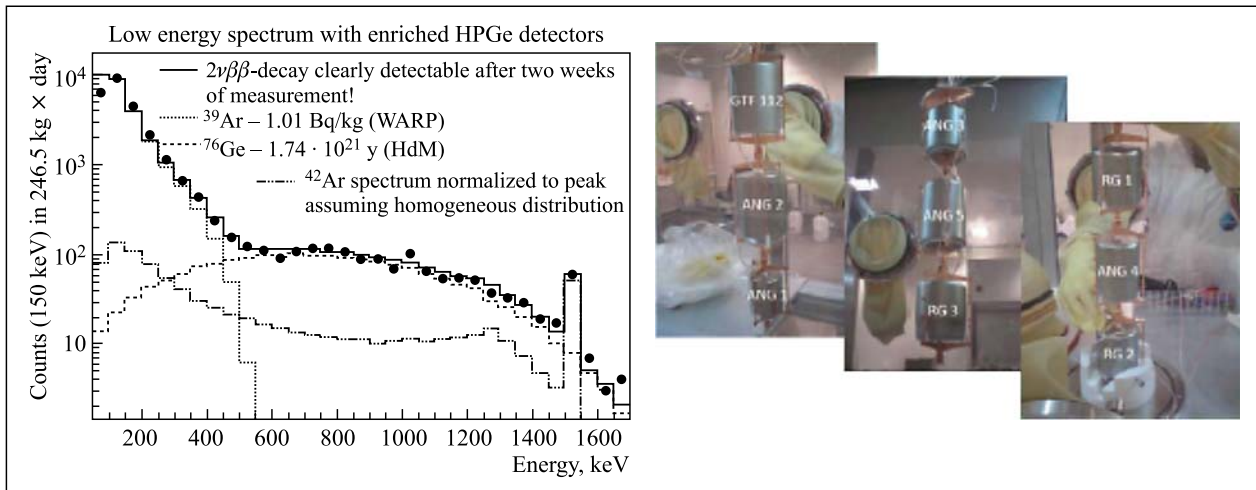


Рис. 2. Слева: первые результаты, полученные во время тестовых измерений с тремя детекторами из обогащенного ^{76}Ge . Показан спектр двухнейтринного $2\nu\beta\beta$ -распада ^{76}Ge , основанный на данных, набранных за первые две недели тестовых измерений. Справа: перед началом первой фазы эксперимента GERDA. 8 HPGe-детекторов из обогащенного ^{76}Ge общей массой около 18 кг и контрольный детектор из ^{76}Ge собираются в 3 стринга перед тем, как будут опущены в LAr криостата установки GERDA

выше по сравнению с ранее опубликованными данными. Несмотря на это, уже в первых тестовых измерениях с тремя детекторами из обогащенного ^{76}Ge был получен уровень фона в области энергий $0\nu\beta\beta$ -распада ^{76}Ge в несколько раз ниже по сравнению с окончательным фоном, достигнутым в эксперименте Гейдельберг–Москва, и уже за первые две недели измерений стал явно виден спектр двухнейтринного $2\nu\beta\beta$ -распада ^{76}Ge (рис. 2, слева). Коллаборация GERDA провела интенсивные исследования по изучению содержания и пространственного распределения ^{42}Ar в LAr установки, проверяя влияние различных потенциалов электрического поля в жидком аргоне вблизи детекторов и исследуя форму импульсов фоновых событий. В результате была определена оптимальная конфигурация электрических полей вокруг Ge-детекторов, что позволило значительно снизить скорость счета от ^{42}Ar и начать первую фазу эксперимента. Таким образом, тестовые измерения были закончены, и в ноябре 2011 г. начался набор физических данных со всеми имеющимися детекторами из ^{76}Ge (8 детекторов с общей массой около 18 кг ^{76}Ge — см. рис. 2, справа).

В 2011 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 2009–2010 гг., получена статистика распадов J/ψ , ψ' , $\psi(3770)$, $\psi(4040)$, в несколько раз превышающая мировую.

В 2010 г. при анализе реакции $J/\psi \rightarrow \gamma p\bar{p}$ в эксперименте BES-III было подтверждено наличие порогового усиления сигнала в спектре инвариантных масс $p\bar{p}$. Предварительные результаты парциально-волнового анализа, выполненного в 2011 г., позволя-

ют ассоциировать данное усиление с узким резонансом, имеющим квантовые числа 0^{-+} . Было подтверждено существование резонанса $X(1835)$, а также обнаружены два новых состояния — $X(2120)$ и $X(2370)$ [12].

Были проведены измерения свойств наименее изученного состояния со скрытым чармом h_c . Была измерена его масса, а также впервые в мире определена ширина этого резонанса. Также впервые были измерены относительные вероятности переходов $\psi' \rightarrow \gamma\pi^0$ и $h_c \rightarrow \gamma\eta$.

В ходе эксперимента были также проведены исследования распадов чармония. Измерены относительные ширины распадов $\chi_{cJ} \rightarrow \gamma V(\rho, \phi, \omega)$ и $\chi_{cJ} \rightarrow VV(\phi, \omega)$. Впервые наблюдался дважды подавленный по правилу ОЦИ распад $\chi_{cJ} \rightarrow \phi\omega$ [13].

Основная работа группы ОИЯИ, связанная с анализом экспериментальных данных, проводилась в области спектроскопии легких адронов на BES-III. В сотрудничестве с группой ПИЯФ был завершен парциально-волновой анализ реакции $J/\psi \rightarrow K^+K^-\pi^0$. Разработанная в ходе анализа процедура учета экспериментального разрешения позволила провести точное измерение параметров резонанса $K^*(892)$. Для независимой проверки результатов целесообразно провести анализ реакции $J/\psi \rightarrow K_s K \pi$. Для этой реакции был разработан алгоритм отбора событий, в настоящее время ведется парциально-волновой анализ отобранных данных [14, 15].

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

топриемника в его фокальной плоскости. С высоты 400–500 км предполагается измерять флюоресцентное излучение широких атмосферных ливней, 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.

Главной задачей ОИЯИ на 2011 г. являлось участие в производстве зеркала Френеля, а также измерение его оптических параметров. Была разработана специальная методика измерения оптических параметров отдельных модулей зеркала. Для этой цели была использована прецизионная 3D-координатная измерительная машина Eclipse 700/1000, дополненная лазерной головкой и web-камерой, с помощью которых были измерены функции рассеяния точки (PSF-function) для центрального и боковых модулей зеркала [16]. Полетная модель изготовленного зеркала Френеля смонтирована на платформе спутника. Проведенные измерения показали, что оптические параметры зеркала находятся в удовлетворительном согласии с требуемым полем зрения детектора TUS и размером пикселя фотодетектора. Запуск детектора на орбиту планируется в 2012 г. на спутнике «Ми-

хаил Ломоносов». Срок набора данных — не менее трех лет.

Главной задачей в эксперименте NUCLEON является измерение потока космических лучей в области $10^{11} - 5 \cdot 10^{14}$ эВ, а также изучение 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. ОИЯИ несет ответственность за разработку, изготовление и испытания триггерной системы, в том числе FE и DAQ электроники для выработки триггерных сигналов 1-го и 2-го уровней. Комплексные испытания технологического образца детектора NUCLEON в соответствии с требованиями к космической аппаратуре были успешно выполнены в космическом центре «Арсенал» в С.-Петербурге в 2010 г. Технологическая и полетная модели триггерной системы были изготовлены и протестированы в 2011 г. в ЦЕРН на пучке H2 SPS с пионами, электронами и мюонами при энергиях 200–350 ГэВ. В настоящее время ведется обработка полученных данных. Кроме того, завершается изготовление летных вариантов остальных детекторов NUCLEON, чтобы обеспечить возможность начала набора данных на орбите с конца 2013 г.

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В рамках проекта CDF основными результатами 2011 г. были получение средней массы топ-кварка, соответствующей неопределенности $1,09 \text{ ГэВ}/c^2$, поиски бозона Хиггса и обеспечение эффективной работы CDF II. Полная статистика, включающая данные 1992–1996 гг. (Run-I) и данные, набираемые с 2001 г. (Run-II), составила $5,8 \text{ фб}^{-1}$. С учетом корреляции неопределенностей была получена средняя масса топ-кварка $M_{\text{top}} = 172,70 \pm 0,63(\text{стат.}) \pm 0,89(\text{сист.}) \text{ ГэВ}/c^2$, что соответствует $1,09 \text{ ГэВ}/c^2$ полной неопределенности, или $0,63\%$ от точности [17, 18].

На основе сгруппированных данных CDF и D0 при $\sqrt{s} = 1,96 \text{ ТэВ}$ был выполнен прямой поиск бозона Хиггса при протон-антипротонных столкновениях на тэватроне [19]. На статистике $8,2 \text{ фб}^{-1}$ CDF и $8,6 \text{ фб}^{-1}$ D0 на 95 %-м уровне достоверности установлены верхние пределы на сечение рождения бозона Хиггса для масс $m_H = 115, 140$ и $165 \text{ ГэВ}/c^2$. Эти пределы в 1,17, 1,71 и 0,48 раз выше, чем сечение образования бозона Хиггса, предсказанное Стандартной моделью. Получено небольшое (примерно 1 стандартное отклонение) превышение событий над ожидаемой величиной фона при поиске бозона Хиггса в области масс $125 < m_H < 155 \text{ ГэВ}/c^2$. На 95 %-м уровне достоверности исключено рожде-

ние бозона Хиггса из Стандартной модели в области масс $156 < m_H < 177 \text{ ГэВ}/c^2$ (рис. 3).

Группа CDF/ОИЯИ обеспечивает эффективную и стабильную работу детектора CDF II для успешного изучения физики c -, b -, t -кварков при максимально высоких доступных энергиях. В течение года была обеспечена бесперебойная работа сцинтилляционных детекторов мюонного триггера CDF II.

В 2011 г. работы дубненской группы в рамках эксперимента ATLAS на большом адронном коллай-

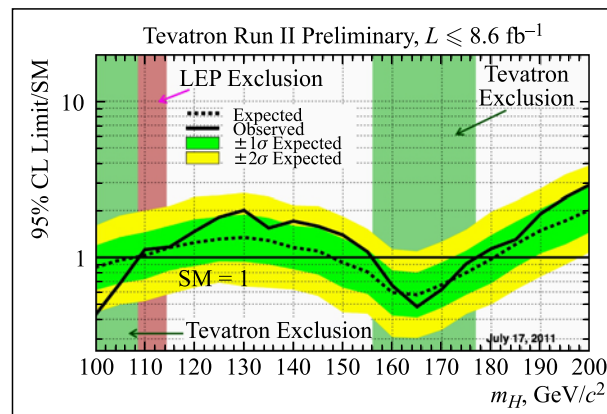


Рис. 3. Новая область для массы бозона Хиггса

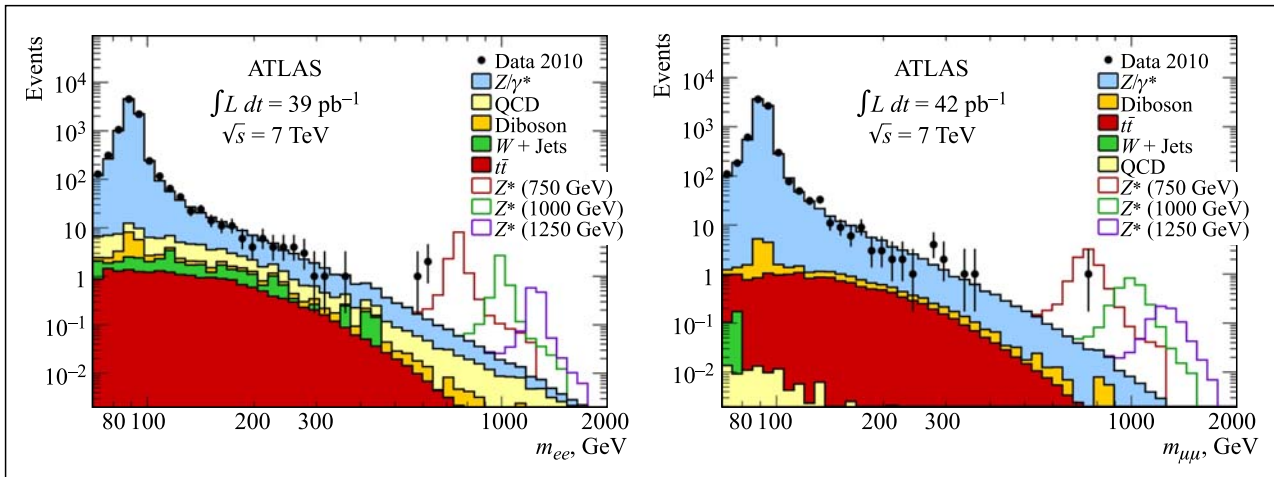


Рис. 4. Распределения инвариантных масс двух электронов (слева) и двух мюонов (справа) в сравнении со всеми ожидаемыми фонами и тремя возможными сигнальными распределениями Z^* -бозонов

дере ЛНС проводились в трех направлениях, главное из которых — это физический анализ данных. Кроме того, сотрудники ОИЯИ обеспечивали устойчивую эксплуатацию ряда систем установки ATLAS, а также участвовали в программе ее модернизации.

Сотрудниками ЛЯП была предложена новая форма глюонных функций распределения в протоне, которая учитывает зависимость от поперечного импульса партонов и применима для описания как полужестких, так и мягких адронных процессов на ЛНС [20]. На основе данных 2010 г. был выполнен поиск заряженных θ -барионов, состоящих из пяти кварков (пентакварков). В моде распада на протон и нейтральный каон таких состояний обнаружено не было.

Впервые проведен поиск заряженных и нейтральных киральных векторных W^* - и Z^* -бозонов и получены ограничения на их массы и вероятности образования. Сотрудниками ОИЯИ совместно с коллегами из ПИЯФ (с помощью установки ATLAS) изучен процесс инклюзивного рождения лептонных пар с большой инвариантной массой, которые могут образовываться в результате реакции $pp \rightarrow W^*/Z^*X \rightarrow \ell\ell'X$ (рис. 4). На этой основе впервые получены пределы на массы этих экзотических бозонов: 1,15 ТэВ для W^* - и 1,35 ТэВ для Z^* -бозона [21].

В 2011 г. группа ОИЯИ приняла участие в проведении сеансов набора данных и их анализе с целью исследования так называемых ультрапериферических взаимодействий (УПВ) тяжелых ионов на установке ATLAS. В результате обработки Pb–Pb данных, полученных на ATLAS в 2010 г., впервые были наблюдаемы и изучены выходы как прямых димюонных пар, так и димюонных пар от распада J/ψ -частиц, образованных в УПВ при энергиях ЛНС [22]. Анализ новых данных 2011 г. (на значительно большей статистике) проводится в настоящее время.

В рамках эксперимента DIRAC проведен шестимесячный сеанс по набору данных для наблюдения метастабильных долгоживущих состояний $\pi^+\pi^-$ -атома. Набрано $5,4 \cdot 10^9$ первичных событий. До начала набора данных были внесены изменения в конструкцию мишенной станции установки DIRAC, необходимые для наблюдения метастабильных состояний $\pi^+\pi^-$ -атома. Была установлена новая бериллиевая мишень (100 мкм), а также дистанционно управляемые механизмы для перемещения постоянного магнита и дополнительной тонкой платиновой фольги (2 мкм). В 2011 г. опубликованы результаты анализа данных по наблюдению атомов, состоящих из π^+ - и π^- -мезонов. Идентифицировано около 21200 событий развала атомов. Получено наиболее точное значение времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома, которое составляет $\tau = \left(3,15_{-0,19}^{+0,20} \Big|_{\text{stat}} \right) \cdot 10^{-15}$ с. Из этих данных получено значение разности S -волновых длин $\pi\pi$ -рассеяния с изотопспинами 0 и 2:

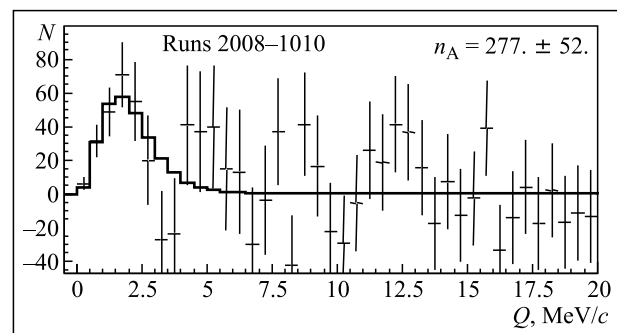


Рис. 5. Распределение по относительному импульсу в с. ц. м. для суммарных экспериментальных данных $K^+\pi^-$ - и π^+K^- -пар после вычитания всех пар, образованных в свободном состоянии, и моделированное распределение пар от развала πK -атомов (сплошная линия)

$$|a_0 - a_2| = \left(0,2533_{-0,0078}^{+0,0080} \Big|_{\text{stat}} \Big|_{-0,0073}^{+0,0078} \Big|_{\text{syst}} \right) M_{\pi^+}^{-1} [23].$$

Получены предварительные данные по наблюдению атомов, состоящих из $\pi^+ K^-$ - и $\pi^- K^+$ -мезонов. В настоящее время число идентифицированных событий составляет 277 ± 52 (рис. 5). В конце 2011 г. было подготовлено и представлено в SPSC новое дополнение к проекту DIRAC по продолжению эксперимента по наблюдению долгоживущих (метастабильных) состояний $\pi^+ \pi^-$ -атома в 2012 г.

Работы по приложению результатов проекта SANC к физике на LHC ведутся с 2004 г. В современном состоянии SANC включает в себя теоретические предсказания для многих трех- и четырехчастичных процессов Стандартной модели на однопетлевом уровне точности. В 2011 г. продолжалась разработка системы SANC2. В рамках проведенной работы на базе созданной ранее символьной среды вычислений осуществлялась реализация алгоритмов

однопетлевых вычислений редукции и скаляризации функций Пассарино–Вельтмана. Основными результатами 2011 г. являются оценка так называемых «неучтенных поправок высших порядков» для процессов одиночного рождения W^- - и Z -бозонов, т. е. тех, которые не учитываются в стандартных программах ATLAS (PYTHIA + PHOTOS, HERWIG); участие в анализе данных ATLAS за 2010 г. ($33\text{--}36 \text{ фб}^{-1}$) по измерениям инклюзивных сечений рождения W^- - и Z -бозонов в контексте КХД [24]. Была проведена работа по составлению теоретических предсказаний дифференциальных сечений процессов Дрелла–Яна в NNLO-приближении пертурбативной КХД. Оценены сами предсказания и их погрешности для ряда партоновых распределений, а также их корреляция. Проведена работа по сравнению и подтверждению правильности теоретических инструментов, использовавшихся в измерении плотности странного морского кварка на новых данных ATLAS [25].

ФИЗИКА НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

В соответствии с научной программой проекта SPRING на установке ANKE на ускорителе COSY в Юлихе выполняется цикл экспериментов по пионному рождению вблизи порога на поляризованных пучках для установления связи между рождением пионов в нуклон-нуклонных столкновениях и низкоэнергетичным трехнуклонным рассеянием. Извлечение амплитуд пионного рождения позволит провести анализ с применением киральной теории возмущений, что явится важным шагом к пониманию пионной динамики при низких энергиях.

В 2011 г. при энергии поляризованного протонного пучка 353 МэВ с использованием струйных кластерных мишеней проведено исследование [26, 27] рождения π^0 - и π^- -мезонов в реакции $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ на водородной мишени и квазисвободной реакции $\vec{p}n \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ на дейтериевой мишени. Отбирались конечные протонные пары с очень малой энергией возбуждения, что ведет к 1S_0 -состоянию такого дипротона $\{pp\}_s$. Измерены дифференциальные сечения в полном угловом диапазоне и векторные анализирующие способности этих реакций. Обе наблюдаемые могут быть описаны в терминах s - и d - (для конечного π^0) или s -, p - и d -волнового (для конечного π^-) пионного рождения.

Нарушающий лептонное число (LFV) распад $\mu \rightarrow e\gamma$ запрещен в Стандартной модели элементарных частиц (СМ). Даже с введением масс нейтрино и смешивания СМ предсказывает неизмеримо малую вероятность ($B < 10^{-51}$) для этого распада. С другой стороны, новые сценарии физики вне СМ, такие как суперсимметричные теории Великого объединения или теории с дополнительными размерностями, предсказывают вероятность распада от 10^{-12} до

10^{-14} . Это близко к существующему пределу, установленному в эксперименте MEGA: $BR < 1,2 \cdot 10^{-11}$, который накладывает одно из самых строгих ограничений на формулировку таких теорий. Наблюдение $\mu \rightarrow e\gamma$ поэтому было бы однозначным указанием на новую физику, в то время как ограничение существующего предела ограничит многие из новых сценариев физики вне СМ.

В 2011 г. получены результаты поиска распада $\mu \rightarrow e\gamma$ на установке MEG, данные для которого были собраны в 2009 и 2010 гг. Этот спектрометр работает на 590-МэВ протонном циклотроне в Институте Пауля Шеррера (PSI) в Швейцарии. Анализ данных, которые соответствуют в общей сложности $1,8 \cdot 10^{14}$ распадам мюонов, дает 90%-й верхний предел уровня достоверности $2,4 \cdot 10^{-12}$ на распад $\mu \rightarrow e\gamma$, являющийся самым строгим пределом на существование этого процесса в настоящее время [28].

Международная коллаборация PEN закончила набор статистики для прецизионного измерения вероятности распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu(\gamma)$ в PSI. Значение этого редкого распада — классическое проявление $V - A$ характера слабых взаимодействий. С хорошим теоретическим пониманием распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu(\gamma)$ его наблюдение становится самым точно выполняемым тестом лептонной универсальности. Прецизионные измерения могут также быть очень чувствительной проверкой всех расширений Стандартной модели с псевдоскалярными токами и для возможных суперсимметричных поправок в лептонных взаимодействиях. К настоящему времени $3,75 \cdot 10^{11}$ пионов были остановлены в эксперименте и $2,28 \cdot 10^7$ распадов $\pi \rightarrow e\nu$ были зарегистрированы, что соответствует статистической ошибке вероятности распада

$\delta B/B < 5 \cdot 10^{-4}$. Это значение близко к теоретическим оценкам, находящимся на уровне меньше чем одна часть в единицах 10^{-4} . Измерения с такой точностью позволяют получать при определенных предположениях ограничения на массы: заряженного бозона Хиггса $m_{H^+} > 6,9$ ТэВ, векторных лептокварков $m_p > 3,8$ ТэВ, псевдоскалярных лептокварков $M_G > 630$ ТэВ. Статистические данные, собранные в эксперименте PEN, удваивают статистику для радиационного пиона и мюонных распадов, улучшая точность их измерений в наших предыдущих экспериментах.

В 2011 г. в совместном (ОИЯИ–INFN (Италия)) эксперименте PAINUC продолжалась работа по обработке и анализу имеющихся данных по $\pi^{\pm 4}\text{He}$ -взаимодействию. Изучались трехлучевые события для определения относительных вероятностей различных каналов, в частности разделение канала с протоном и тритием в конечном состоянии и канала полного развала ядра гелия, при котором в конечном состоянии наблюдаются два протона и два нейтрона. При этом выяснилось, что идентификация сильно ионизирующих частиц (протонов, тритонов) наиболее надежно проводится по следующему параметру: произведению относительной яркости следа и квадрата импульса частицы.

В 2011 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.

Можно отметить подтверждение рождения одиночных γ -квантов при «упругом» рассеянии отрицательных пионов с энергиями 68 и 106 МэВ [29]. Если рассматривать ядро как черное тело, то планковские температуры, соответствующие энергиям 106 и 68 МэВ, оказываются $14,4 \pm 1,6$ и $14,6 \pm 1,1$ МэВ соответственно.

Проводимые в 2011 г. эксперименты в рамках проекта MUON были нацелены на изучение акцепторных центров в германии и алмазе с помощью поляризованных мюонов. Температурная зависимость скорости релаксации спина отрицательных мюонов была измерена в образце германия n -типа (концентрация доноров $\lesssim 3,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) и в трех образцах p -типа с концентрацией Ga $1,0 \cdot 10^{14}$, $3,0 \cdot 10^{14}$ и $5,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Было установлено, что в образце n -типа мюонный атом образуется только в диамагнитном состоянии. В то же время в образцах p -типа наблюдался парамагнитный мюонный атом при низких температурах. Скорость релаксации спина мюона в мюоном атоме зависит от температуры и концентрации акцепторной примеси Ga.

Изучались вероятности нахождения мюона в различных состояниях в синтетических моно- и поликристаллах алмазов. В монокристаллическом образце типа IIa при 150 К вклады диамагнитного

мюона, нормального и аномального мюония были обнаружены равными 1,5, 57 и 8,1 % соответственно. Потерянная фракция мюонной поляризации равна 33,4 %, что примерно в 2 раза меньше, чем в естественном алмазе типа Ia, и в 2–3 раза больше, чем в натуральных алмазах типа IIa и IIb. Скорость релаксации спина мюона в нормальном и аномальном мюонии в синтетических и натуральных алмазах типа IIa и IIb примерно одинаковая.

Согласно рекомендации 33-й сессии ПКК по ядерной физике ОИЯИ 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 водорода, катализируемых отрицательными мюонами, в той области, где данные отсутствуют или противоречат современной теории. С помощью методов, развитых при решении экспериментальных задач в мюонном катализе, будет изучено явление pt -синтеза в мюонной молекуле $pt\mu$. Это явление исследовалось ранее в единственном эксперименте и находится сейчас в центре внимания ядерной физики многих тел. Планируется обнаружить конверсию e^+e^- -пар в выходном канале реакции pt -синтеза, которая не наблюдалась «на лету» (beam-target) и в $pt\mu$ -молекулах. Также будет очень важно прояснить значительное расхождение теоретических ожиданий и эксперимента в $pt\mu$ -системе (каналы с выходом γ и μ : $pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma$, ${}^4\text{He} + \mu(\text{con}\nu)$, ${}^4\text{He}\mu + e^+e^- + 19$ МэВ [30]). Разработано техническое задание на криогенную жидкотритиевую мишень объемом 50 см^3 , заполняемую жидкой смесью pt (1 % T). Она будет экспонироваться на пучке отрицательных мюонов (10^4 с^{-1} , 100 МэВ/с) фазотрона ОИЯИ.

В рамках проекта NN-GDH была испытана и установлена на пучок новая поляризованная мишень с замороженным спином. Были разработаны внутренние сверхпроводящие катушки для удержания поперечной и продольной поляризаций нуклонов, которые использовались в режиме замороженной поляризации мишени в течение более чем 5000 ч в 2010 и 2011 гг. Были достигнуты протонная поляризация более 90 %, дейтронная поляризация до 75 % и время релаксации поляризации свыше 1000 ч. В криостате растворения при температуре 25 мК и магнитном поле 2,5 Тл были проведены испытания новой тонкой пленочной мишени из полистирола. Материал был поляризован до более чем 60 % после трех часов СВЧ-накачки поляризации и показал приемлемое время релаксации. Для исследования различных параметров, важных для эксперимента PANDA, планируются дальнейшие испытания.

Были проведены экспериментальные измерения поперечных асимметрий T и F в фоторождении π^0 и η , ведется обработка данных. Впервые в мире начаты измерения двухспинового комптоновского рассеяния для определения спиновой поляризуемости. В этом

эксперименте используется пучок циркулярно поляризованных фотонов, меченных по энергии (с энергиями до 1557 МэВ), в комбинации с поперечно по-

ляризованной мишенью из бутанола. Продукты реакции детектируются фотонным спектрометром Crystal Ball/TAPS 4л.

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И УСКОРИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

В последнее 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. В состав госпитального центра входит центр протонной терапии на базе циклотрона **C235-V3**, разработанного совместно ОИЯИ и компанией «Ion Beam Application» (IBA).

Циклотрон C235-V3 по своим характеристикам будет превосходить медицинские циклотроны IBA, установленные в ведущих онкологических клиниках мира. Это касается прежде всего эффективности ускорения и вывода протонов [31].

Согласно Соглашению о научном сотрудничестве между компанией IBA и ОИЯИ от 05.04.2011 г. с мая по июнь 2011 г. в корпусе №5 ЛЯП были завершены работы по подготовке стенда для сборки и наладки циклотрона C235 для центра протонной терапии в Димитровграде. В июне циклотрон C235 был доставлен в корпусе №5, а затем установлен в рабочее положение в каземате. Сборка циклотрона велась по чертежам в соответствии с технологическими картами. Полностью подготовлена к работе и откалибрована система измерения магнитного поля. В КБ ЛЯП подготовлены чертежи, по которым в НПО «Атом» изготовлены приспособления для обработки боковых поверхностей съемных кромок секторов циклотрона. В процессе шиммирования магнитного поля C235 в «Атоме» измерено 5 карт магнитного поля и выполнено 4 цикла обработки боковых поверхностей кромок (включая тестовые обработки). В 2011 г. завершено шиммирование магнитного поля и проведены тестовые эксперименты с выведенными протонными пучками. В 2012 г. планируется установить циклотрон в центре протонной терапии в г. Димитровграде.

Основной целью исследований в рамках темы **«Проведение медико-биологических исследований на адронных пучках ОИЯИ»** является 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 онкологических больных и сопутствующей диагностики 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 109 пациентов, при этом общее количество протонных терапевтических облучений (полей) превысило 6500. Кроме того, на гамма-аппарате «Рокус-М» были пролечены еще 20 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.

Совместно с сотрудниками отдела радиационной дозиметрии Института ядерной физики (Прага) продолжались работы по измерению фоновых условий в кабине протонной терапии №1 с использованием термолюминесцентных и трековых детекторов. В дальнейшем измерения будут продолжены с использованием других типов детекторов [32].

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. В связи с этим были проведены эксперименты по изучению действия γ -лучей в дозе 5 Гр, а также комбинированного действия лазерного устройства для радиационной защиты с длиной волны 650 нм (патент на изобретение RU 2 428 228 C2) и γ -лучей на общий митотический индекс клеток костного мозга (митотический индекс всех ядросодержащих клеток костного мозга) экспериментальных мышей. Оказалось, что митотическая активность клеток костного мозга мышей, облученных только лазерным излу-

нием, а также мышей, облученных лазерным и γ -лучами, на 15-е сутки выше активности клеток интактных мышей. Через год после облучения митотический индекс клеток костного мозга комбинированно облученных мышей был выше, чем у мышей, облученных только гамма-излучением.

Полученные результаты показывают, что лазерное излучение красной спектральной области не

только улучшает восстановление кроветворения после воздействия на биологические объекты ионизирующих излучений, как было показано ранее, но и повышает митотическую активность клеток костного мозга. Следовательно, лазерное облучение биологических объектов может найти применение как в радиационной защите, так и в терапии лучевой болезни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agafonova N. et al.* Search for $\nu - \mu$ to $\nu - \tau$ Oscillations in the OPERA Experiment in the CNGS Beam // *New J. Phys.* (submitted).
2. *Adam T. et al.* Measurement of the Neutrino Velocity with the OPERA Detector in the CNGS Beam // *JHEP* (submitted).
3. *Bellini G. et al. (Collab.)* Study of Solar and Other Unknown Anti-Neutrino Fluxes with Borexino at LNGS // *Phys. Lett. B.* 2011. V. 696. P. 191–196.
4. *Bellini G. et al. (Collab.)* Precision Measurement of the ^7Be Solar Neutrino Interaction Rate in Borexino // *PRL.* 2011. V. 107. P. 141302.
5. *Bellini G. et al. (Collab.)* Absence of Day/Night Asymmetry of 862 keV ^7Be Solar Neutrino Rate in Borexino and MSW Oscillation Parameters. 1104.2150v1 [hep-ex] 12 Apr. 2011; *Phys. Lett. B.* (accepted 13 Nov. 2011).
6. *Bellini G. et al. (Collab.)* First Evidence of pep Solar Neutrinos by Direct Detection in Borexino. arXiv:1110.3230 [hep-ex]; *Phys. Rev. Lett.* (submitted).
7. *Bellini G. et al. (Collab.)* Muon and Cosmogenic Neutron Detection in Borexino // *J. Instrumentation.* 2011. V. 6. P05005.
8. *Armengaud E. et al. (EDELWEISS Collab.)* Final Results of the EDELWEISS-II WIMP Search Using a 4-kg Array of Cryogenic Germanium Detectors with Interleaved Electrodes // *Phys. Lett. B.* 2011. V. 702, No. 5. P. 329–335.
9. *Ahmed Z. et al. (CDMS and EDELWEISS Collab.)* Combined Limits on WIMPs from the CDMS and EDELWEISS Experiments // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 84. 011102(R).
10. *Shevchik E. et al.* The Muon Panels I: Panel Tests and Efficiency Estimations, GERDA Scientific. Technical Report. 2011. GSTR-11-010; GSTR-11-011.
11. *Agostini M. et al.* LArGe-R&D for Active Background Suppression in GERDA // *Proc. of TAUP-2011 Conf. J. Phys.:* Conf. Ser. 2011 (in press).
12. *Ablikim M. et al. (BES-III Collab.)* // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 106. 072002.
13. *Ablikim M. et al. (BES-III Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 84. 091102.
14. *Ablikim M. et al. (BES-III Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 83. 112005.
15. *Ablikim M. et al. (BES-III Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 83. 012006.
16. *Tkachev L. et al.* The TUS Fresnel Mirror Production and Optical Parameters Measurement // 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., Aug. 11–18, Beijing, China. ID-0305, 0306.
17. Combination of CDF Top Quark Mass Measurements (Winter 2011). CDF Note 10444.
18. *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.* (submitted).
19. *CDF, D0 Collab.* Combined CDF and D0 Upper Limits on Standard Model Higgs-Boson Production with up to 8.6 fb^{-1} of Data. arXiv:1107.5518.
20. *Lykasov G. I. et al.* arXiv:1109.1469; presented at «Physics at LHC-2011», Perugia, Italy, June 2011, and at «Hadron Structure-2011», Strba, Slovakia, June 2011.
21. *ATLAS Collab.* // *Phys. Lett. B.* 2011. V. 700. P. 163; V. 701. P. 50; *Chizhov M. et al.* arXiv:1110.5533.
22. *Pozdniakov V. N., Vertogradova Y. L.* Direct Photon and Photon-Jet Measurement Capability of the ATLAS Experiment at the LHC // *Nucl. Phys. A.* 2011. V. 855. P. 343–346; *Pozdnyakov V. et al.* Measurement of the Muon Pair Production Cross Sections in Ultraperipheral Pb–Pb Collisions. ATL-COM-PHYS-2011-1361, ATLAS-COM-CONF-2011-182.
23. *Adeva B. et al.* Determination of $\pi\pi$ Scattering Lengths from Measurement of $\pi^+\pi^-$ Atom Lifetime // *Phys. Lett. B.* 2011. V. 704. P. 24–29
24. *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 $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector // *Phys. Rev. D.* 2011 (accepted).
25. *Bardin D. et al.* Standard SANC Modules for NLO QCD Radiative Corrections to Single-Top Production // *Part. Nucl., Lett.* 2011 (submitted).
26. *Tsirkov D. et al.* Differential Cross Section and Analysing Power of the $\bar{p}p \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ Reaction at 353 MeV // *Phys. Lett. B* (submitted).
27. *Dymov S. et al.* Differential Cross Section and Analysing Power of the Quasi-Free $\bar{p}n \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ Reaction at 353 MeV // *Phys. Lett. B* (submitted).
28. *Adam J. et al.* // *PRL.* 2011. V. 107. P. 171801,
29. *Angelov N. et al.* Pion Induced Reactions on ^4He in the Δ -Resonance Energy Region // *Intern. J. Modern Phys. A* (in press).
30. *Baluev V. V. et al.* Experimental Search for the Radiative Capture Reaction $d + d \rightarrow ^4\text{He} + \gamma$ from the $dd\mu$ Muonic Molecule State $J = 1$ // *JETP.* 2011. V. 113, No. 1. P. 68–74.
31. *Syresin E. V. et al.* Development of Radiation Medicine at DLNP // *Part. Nucl., Lett.* 2011. V. 8, No. 4. P. 635.
32. *Kubančák J., Molokanov A. G., Vlček B.* Out-of-Field Dosimetry of the JINR Radiotherapeutic Proton Beam Using Thermoluminescent Detectors. JINR Commun. E16-2011-80. Dubna, 2011.