

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ им. В. П. ДЖЕЛЕПОВА

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Целью эксперимента **DIRAC** является измерение времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома для проверки предсказаний КХД при малых энергиях. В 2004 г. было подготовлено дополнение к проекту **DIRAC**: «Измерение времени жизни $\pi^+\pi^-$ - и $\pi^\pm K^\mp$ -атомов для проверки низкоэнергетических предсказаний КХД». Основные задачи проекта: измерение времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома и определение $|a_0 - a_2|$ с точностью лучше 3%; наблюдение $\pi^\pm K^\mp$ -атомов и измерение $|a_{1/2} - a_{3/2}|$ с точностью около 10%; наблюдение долгоживущих состояний $\pi^+\pi^-$ -атома, что открывает возможность измерения разности уровней энергии ΔE_{2s-2p} и измерения новой комбинации длин $\pi\pi$ -рассеяния: $|2a_0 + a_2|$ [1–3].

Проведен 20-дневный сеанс на ускорителе PS в ЦЕРН по испытанию нового волоконного детектора — диаметр волокон 0,27 мм, чувствительная область 50×50 мм. Новая электроника считывания, разработанная и изготовленная в ЛЯП ОИЯИ, позволяет одновременно получать временную и амплитудную информацию с каждого канала. Результаты сеанса полностью подтвердили преимущества нового детектора и электроники. Система микродрейфовых камер с модифицированной системой считывания была испытана в составе установки **DIRAC** в течение 14 дней. Набрано около 100 млн событий с микродрейфовыми камерами для определения эффективности детектора к двухтрековым событиям.

В 2005 г. коллаборация планирует провести окончательную обработку данных, полученных в 2001–2003 гг. на никелевой мишени, для определения времени жизни со статистической ошибкой 10% и оценки систематических ошибок во времени

жизни. Планируется разработка системы идентификации π^- , K^- -мезонов и протонов, модификация системы идентификации, системы считывания данных и управления установкой.

Целью проекта **NOMAD** (Neutrino Oscillation MAgnetic Detector) является поиск нейтринных осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ и $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и изучение взаимодействий нейтрино [4–7]. В научную программу также входит определение поляризации Λ и $\bar{\Lambda}$ во взаимодействии ν_μ и $\bar{\nu}_\mu$ по каналу нейтральных токов и изучение странных нейтральных частиц и странных тяжелых гиперонов во взаимодействиях ν_μ .

В 2004 г. были получены окончательные результаты поиска осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ [4]. Доказательств существования осцилляций не найдено и на 90%-м уровне вероятности определено, что $\Delta m^2 < 0,4 \text{ эВ}^2$ для максимального смешивания нейтрино и $\sin^2 2\theta_{\nu_\mu \nu_e} < 1,4 \cdot 10^{-3}$ для большого Δm^2 . Этот результат исключает область параметров LSND с $\Delta m^2 > 10 \text{ эВ}^2$.

Были проведены первые измерения рождения $K^*(892)^\pm$ -мезона и выстроенности спинов в CC - и NC -взаимодействиях ν_μ [5]. Для $K^{*\pm}$ -мезонов, рожденных в $\nu_\mu CC$ -взаимодействиях и распадающихся в $K^0 \pi^\pm$, наибольшая точность составила $2,7 \pm 0,2$ (стат.) $\pm 0,1$ (сист.) и $1,5 \pm 0,1$ (стат.) $\pm 0,1$ (сист.) соответственно, а для $K^{*\pm}$ -мезонов, рожденных в $\nu_\mu NC$ -взаимодействиях, — $2,3 \pm 0,3$ (стат.) $\pm 0,2$ (сист.) и $1,0 \pm 0,3$ (стат.) $\pm 0,2$ (сист.) соответственно.

Были получены первые приблизительные результаты для сечения взаимодействия QEL реакции

$\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$ и проведены измерения значения аксиальной массы M_A (рис. 1, 2). Наибольшая набранная статистика подтверждает большую точность этих измерений. Полученные данные очень важны для интерпретации результатов экспериментов с атмосферными нейтрино [6].

С целью проверки шкалы электромагнитной энергии тайл-калориметра ATLAS и для понимания его отклика 12% модулей были облучены электронными пучками с различной энергией и под различными углами (сканирование по ячейкам под углом $\theta = 20^\circ$ в центре, η -сканирование

и сканирование по тайлам под углом $\theta = 90^\circ$ для боковых ячеек модуля) [8]. Средние значения калибровочных констант следующие: $\langle R_e \rangle = (1,157 \pm 0,002)$ пКл/ГэВ для «cell»-сканирования, $\langle R_e \rangle = (1,143 \pm 0,005)$ пКл/ГэВ для η -сканирования и $\langle R_e \rangle = (1,196 \pm 0,005)$ пКл/ГэВ для тайл-сканирования. Среднеквадратичные значения для сканирования по ячейкам ($2,6 \pm 0,1$ %), для η -сканирования ($4,2 \pm 0,3$ %) и для сканирования по тайлам ($5,7 \pm 0,3$ %) . Энергетическая линейность модулей — в пределах 1% для $\theta = 20^\circ$ и 2% для $\theta = 90^\circ$. Однородность для электронного отклика —

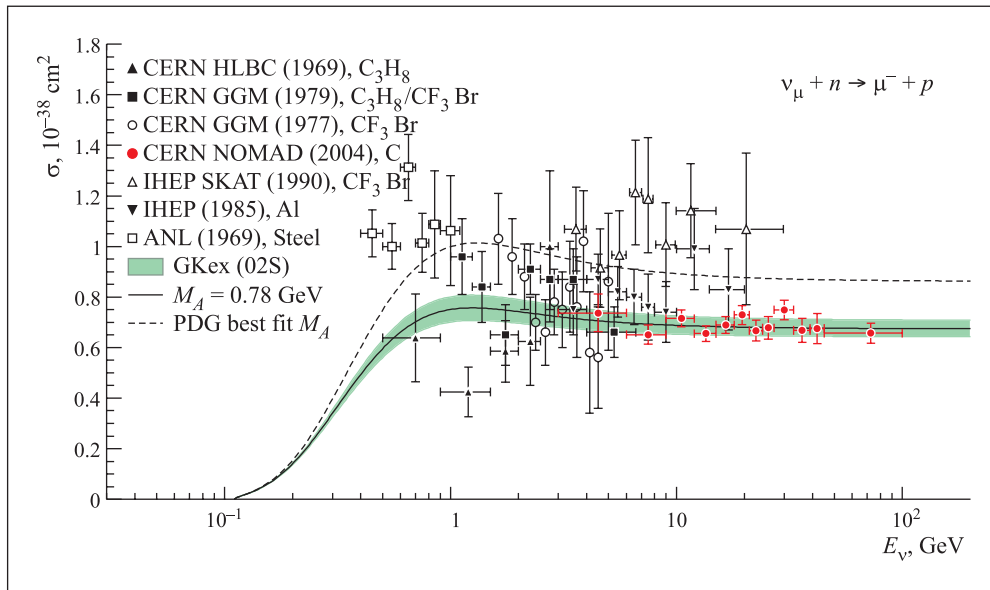


Рис. 1. Величина измеренного сечения взаимодействия NOMAD QEL в сравнении с предыдущими экспериментальными данными, полученными в тяжелых жидкостных пузырьковых камерах и в спарк-камерах. Сплошная линия с полосой ошибок соответствует экспериментальному значению M_A эксперимента NOMAD

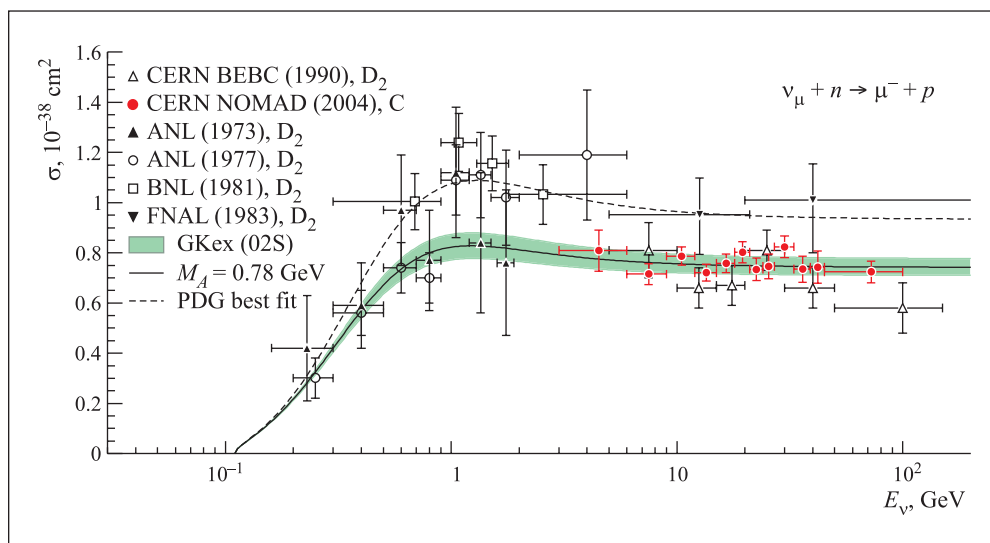


Рис. 2. Величина измеренного сечения взаимодействия NOMAD QEL в сравнении с предыдущими экспериментальными данными, полученными в пузырьковых камерах, чувствительных к дейтерию. Сплошная линия с полосой ошибок соответствует экспериментальному значению M_A эксперимента NOMAD

в пределах 1–2% для ячеек и 4% для рядов. Калибровочные константы на 4% больше при $\theta = 90^\circ$, чем при $\theta = 20^\circ$, что говорит об эффекте перехода. Определены статистические и постоянные члены для электронного энергетического разрешения (рис. 3). Наблюдается хорошее согласие для параметризации, полученной линейной подгонкой по методу Монте-Карло.

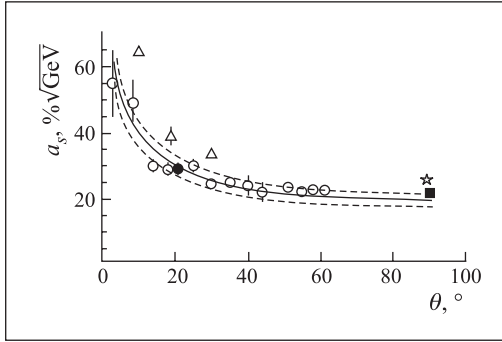


Рис. 3. Параметры a для квадратичного фита разрешения энергии $\sigma/E = a/\sqrt{E} \oplus b$ как функция угла θ : \circ — для данных η -сканирования; \bullet — для $\theta = 20^\circ$; \blacksquare — для $\theta = 90^\circ$; \triangle — данные прототипа; \star — для $\theta = 90^\circ$ модуля 0. Сплошная кривая — параметризация из [9]; штриховые — 10%-й коридор для ошибок

Были проведены измерения отношения e/h для пяти значений псевдоскорости η в диапазоне $-0,55 \leq \eta \leq -0,15$ для пучка с энергиями от 10 до 300 ГэВ. Основное значение $e/h = 1,36 \pm 0,01$ согласуется в пределах ошибок со значением $e/h = 1,36 \pm 0,01$, полученным с помощью моделирования по методу Монте-Карло. Был предложен и применен метод пионной калибровки отдельного модуля. Энергия пиона, высвобожденная в отдельном модуле, составляет $0,89 \pm 0,01$ для η -сканирования. Утечка энергии из одного модуля около 10%. Наблюдалась хорошая энергетическая однородность ($\pm 1\%$). Разрешение энергии пиона для одного модуля составляет $(6,0 \pm 0,3) \% \sqrt{\text{ГэВ}}$ для 180 ГэВ и сравнимо с величиной $4,8 \% \sqrt{\text{ГэВ}}$, ожидаемого из общих физических характеристик $\sigma\sqrt{E} = 50 \% \sqrt{\text{ГэВ}}/\sqrt{E} \oplus 3\%$.

В рамках проекта OPERA начато производство компонентов детектора и его систем. Группа из ОИЯИ привлечена к техническому и качественному контролю дорожек сцинтиллятора (Харьков), производству мишеней для модулей трекера (Страсбург), сборке модулей в Гран-Сассо (Италия), разработке программного обеспечения и созданию станции ядерного эмульсионного сканирования.

В Харькове уже произведено и доставлено в Страсбург более 70% от общего количества дорожек. Дорожки имеют высокий уровень светового выхода, их качество превышает качество аналогичной продукции, используемой в детекторе. В Страсбурге в рамках протокола JINR–IN2P3–OPERA

русско-французская команда собирает модули трекера. Группой из ОИЯИ проводятся все тесты и калибровки собранных модулей. К настоящему времени произведено более 50% из 520 модулей. Первые 12 модулей собраны в Гран-Сассо, началась их установка в детектор. Физики из ОИЯИ принимают в этом активное участие согласно договору между ОИЯИ и INFN (FAI).

Разрабатывается программное обеспечение, которое позволяет определять эффективность эмульсионных дорожек. В этом принимают участие физики из ОИЯИ (ЛЯП и ЛИТ) и из IgeS (Страсбург). Создается автоматическая сканирующая станция. В 2004 г. создана движущаяся платформа, которая позволяет производить точную установку дорожки сцинтиллятора по осям X - Y и микроскопическую установку по оси Z . Идут работы по созданию высокоскоростной CCD-камеры. Физики из ОИЯИ принимают также участие в разработке контроллера для прототипа робота, который будет автоматически перемещать эмульсионные дорожки в сканирующей станции.

В 2004 г. группа CDF/ОИЯИ продолжала измерения массы топ-кварка, набор данных для поиска процессов термализации и обеспечивала эффективное функционирование созданного в Дубне программного обеспечения CDF во время работы тэватрона.

Группа из ОИЯИ внесла существенный вклад в измерения массы топ-кварка в двухлептонной моде его распада на основе $193,5 \text{ пб}^{-1}$ интегральной светимости для $\sqrt{s} = 1,96 \text{ ТэВ}$ для $p\bar{p}$ -взаимодействия. Разработанный метод для измерения массы топ-кварка был успешно применен в топологии лептон + струи ($p\bar{p} \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbW\bar{b} \rightarrow l + \text{струи}$). В образце лептон + 4 струи были реконструированы и отфитированы 39 $t\bar{t}$ -событий как суперпозиция топ (сигнал) и W +струи (фон). При фитировании с ограниченным и неограниченным сигналом получены следующие данные для массы топ-кварка: $M_{\text{top}} = (179,1 \pm 9,5^{10,5} (\text{стат.}) \pm 8,5 (\text{сист.})) \text{ ГэВ}/c^2$ (рис. 4, а) и $M_{\text{top}} = (177,5 \pm 7,7^{9,1} (\text{стат.}) \pm 8,5 (\text{сист.})) \text{ ГэВ}/c^2$ соответственно.

Разработан и успешно применен новый метод для измерения массы топ-кварка в дилептонной топологии ($p\bar{p} \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbW\bar{b} \rightarrow l + l + \text{струи}$). Согласно $t\bar{t}$ -гипотезе были реконструированы и отфитированы 13 событий. С помощью ограниченного фитирования фона ($2,7 \pm 0,7$) событий интерпретированы как фон: была получена масса топ-кварка $M_{\text{top}} = (170,0 \pm 16,6 (\text{стат.})) \text{ ГэВ}/c^2$. Ожидаемое значение систематической ошибки составляет $\pm 7,4 \text{ ГэВ}/c^2$ (рис. 4, б) [10–12].

В 2004 г. группа из ОИЯИ принимала участие в сборке чувствительного элемента для Central Calorimeter Preshower, который сейчас полностью собран и готов к измерениям. Высокая точность

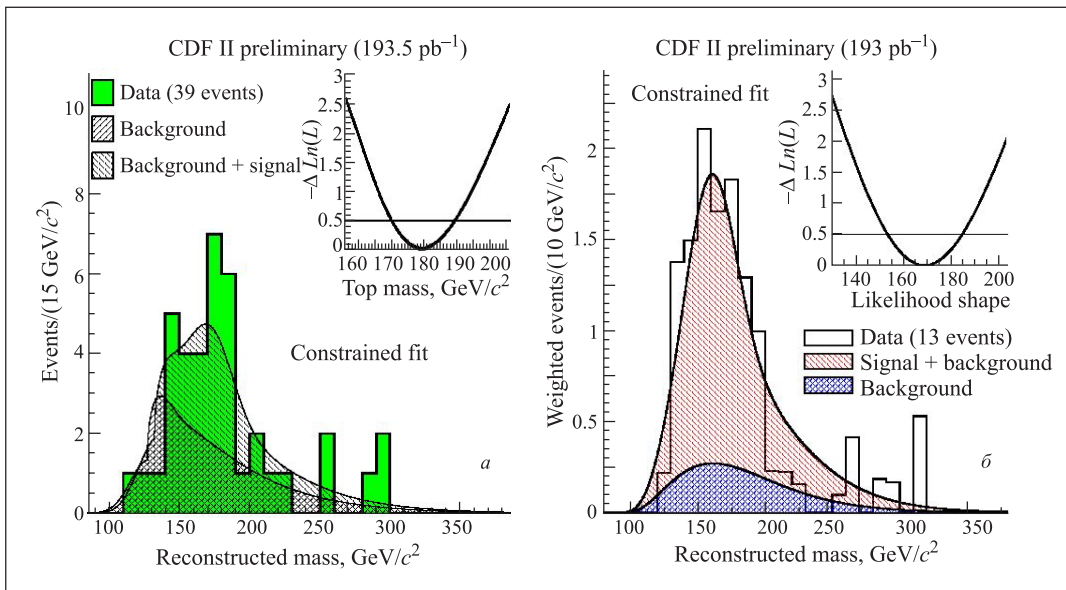


Рис. 4. а) Мода лептон + струи; б) двухлептонная мода

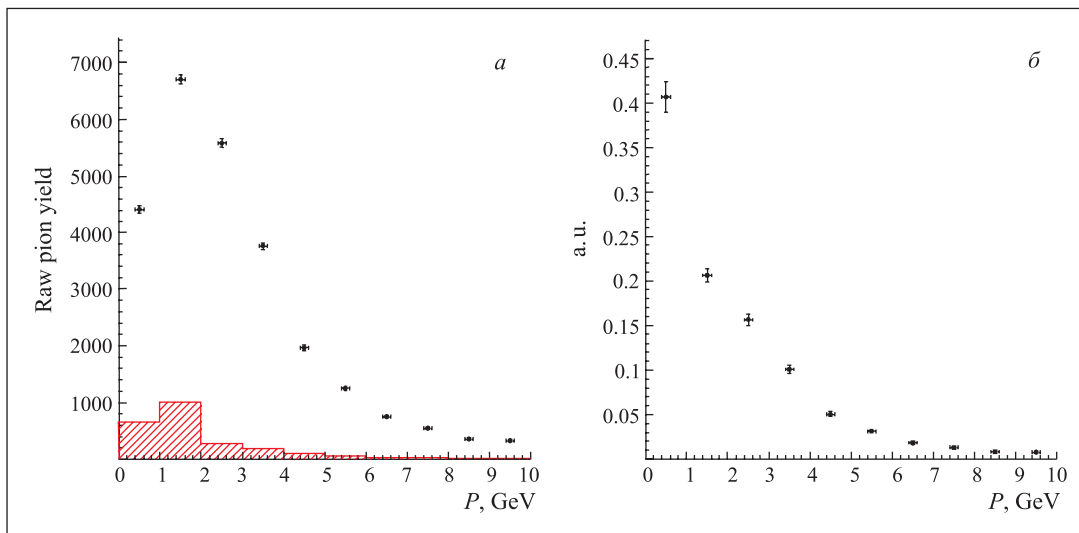


Рис. 5. а) Выход пионов при взаимодействии протонов с энергией 12,9 ГэВ в прототипе мишени К2К. Заштрихованная площадь соответствует фону от протонов и электронов. б) Тот же пионный выход с поправкой на чистоту идентификации пионов, акцептанс и интенсивность

определения точки взаимодействия и реконструкции энергии (что существенно для c -, b -, t -физики) гарантируется световыходом (до 36 ph.e.).

Мюонная группа поддерживала успешное функционирование всех сцинтилляционных детекторов (1200 каналов) и контрольной системы CDF [13–15]. Группа обнаружила 25 %-е уменьшение световыхода сцинтилляционных счетчиков и предложила способы улучшения качества измерений.

В 2005 г. группа CDF/ОИЯИ планирует получить новые пределы для массы бозона Хиггса на основе дальнейшего накопления и обработки измерений массы топ-кварка.

Эксперимент **HARP** нацелен на систематическое изучение рождения адронов при столкновении протонного пучка с импульсом от 1,5 до 15 ГэВ/с с

ядрами мишени от кислорода до свинца. Задачей эксперимента **HARP** является измерение выходов пионов, что позволяет количественно оценить характеристики протонного усилителя нейтринных фабрик и более точно рассчитать поток атмосферных нейтрино. Диапазон энергий подходит для измерений выходов частиц, которые важны для предсказаний потоков нейтрино в экспериментах К2К и Mini-BooNe.

Отслеживание частиц проходит в NDC (NOMAD drift chambers), установленных до и после поворотного магнита. В 2004 г. был проведен анализ взаимодействия протонов с энергией 12,9 ГэВ в прототипе мишени К2К. Полученные импульсное и угловое распределения вторичных пионов (рис. 5) весьма существенны для лучшего предсказания нейтринных

спектров в эксперименте K2K и для минимизации систематических ошибок в параметрах осцилляций нейтрино [16–18].

Целью проводимого анализа данных, полученных в работе с двумя водяными мишенями в TPC (Time Projection Chamber), является выяснение природы наибольшей неопределенности в фоне аномального сигнала от $\bar{\nu}_e$, наблюдаемом в LSND-эксперименте. Измерения отношения π^-/π^+ во взаимодействии протонов с энергией 1,5 ГэВ с водой и измерения отношения e^-/e^+ из распада мюонов, остановившихся в водяной мишени, могут прояснить этот вопрос.

В 2005 г. коллаборация планирует разработать программное обеспечение для NDC и TPC, объединить программы реконструкции для анализа данных при больших и малых углах, измерить сечение рождения адронов при импульсе протонов 12,9 ГэВ для анализа данных эксперимента K2K и закончить анализ данных в эксперименте с водой.

Основной задачей эксперимента «Гиперон» в 2004 г. было окончание работ по созданию и тестированию установки для исследования мезон-ядерных реакций на различных ядрах с образованием нейтральных мезонов в конечном состоянии и начало набора данных. Система мечения изготовлена и доставлена в Протвино, начата работа по монтажу сцинтилляционных счетчиков. Была проделана большая работа по приведению в рабочее состояние всех систем пучковых пропорциональных камер установки. Закончены установка пучковых камер с новой быстрой накамерной электроникой, ремонт и монтаж коммуникаций, проведена продувка камер газовой смесью. Мониторная система на светодиодах изготовлена еще не полностью — на 50 %, но готовая часть позволит откалибровать наиболее загруженные элементы калориметра.

В 2005 г. коллаборация планирует закончить монтаж системы мечения, изготовление мониторной системы, в декабре 2004 г. и апреле 2005 г. осуществить окончательную отладку аппаратуры и провести набор данных, а к концу года получить предварительные результаты по изучению A -зависимости в мезон-ядерных реакциях с образованием нейтральных мезонов в конечном состоянии.

В рамках проекта TUC совместно с НПО «Энергия» изготовлен прототип модуля зеркала Френеля

для детектора TUC на основе углепластика, позволяющего его эксплуатацию в условиях открытого космоса при изменении температуры от -150 до $+150$ °С. Изготовлено несколько аналогичных модулей на основе эпоксидной смолы с целью подготовки производства составного зеркала для наземного прототипа установки TUC. Для измерения с помощью лазера параметров зеркал на базе диграфа создан стенд на линии с CCD-камерой и персональным компьютером. В рамках подготовки экспериментов TUC и NUCLEON проведены два тестовых сеанса на ускорителе SPS ЦЕРН. Для правильной интерпретации данных измерения широких атмосферных ливней в атмосфере Земли в области 10^{20} эВ в эксперименте MACFLY измерялся выход флуоресцентного излучения при прохождении пучка заряженных частиц (электроны, пионы и мюоны с энергией от 20 до 80 ГэВ) через воздух или азот при разных давлениях. Эти исследования были продолжены на пучке электронов 8–25 МэВ микротрона ЛЯР. Эксперимент NUCLEON переведен в 2004 г. из стадии НИР в стадию ОКР, предполагающую запуск детектора на орбиту в 2008 г. В тестовом сеансе NUCLEON изучался отклик прототипов кремниевого и сцинтилляционного детекторов на пучке пионов и электронов от 150 до 350 ГэВ [19, 20].

В 2005 г. предполагается осуществить запуск прототипа детектора TUC в составе спутника МГУ «Татьяна», а также изготовить полномасштабный наземный прототип. В проекте NUCLEON планируется изготовить и испытать рабочий образец двухсторонней триггерной плоскости в основном и резервном варианте. Кроме того, будут проведены работы с целью изучения возможности использования силиконовых фотоумножителей вместо стандартных ФЭУ.

Эксперимент E391a направлен на поиск редкого распада каона $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ с помощью тонкого пучка и детектора, имеющего очень хорошие характеристики для подавления фона γ -квантов. В июне 2004 г. успешно проведен набор и анализ данных. Грубая оценка чувствительности, основанная на одностороннем анализе, дала уровень 10^{-10} без подавления фона. Детальный анализ специально для оптимизации подавления и определения акцептанса сигнала будет продолжаться в 2005 г. [21].

ФИЗИКА НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

Детектор NEMO-3, расположенный в подземной лаборатории Modane (LSM, Франция, 4800 м), создан для поиска двойного безнейтринного β -распада ($0\nu\beta\beta$), который является одним из показателей на-

личия новой физики за пределами стандартной модели. Изучение $0\nu\beta\beta$ -распада — уникальный путь решения фундаментальных проблем шкалы абсолютных нейтринных масс, природы нейтрино (или дира-

ковское описание, или майорановское) и иерархии нейтрино. Главная особенность проекта NEMO — чувствительность на уровне 0,1–0,3 эВ к эффективной массе нейтрино $\langle m_\nu \rangle$ ($T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}$ (^{100}Mo) $\sim 10^{25}$ лет). NEMO-3 регистрирует треки (в 20 м³, 6180 счетчиков Гейгера) и энергии (1940 сцинтилляторов/РМТ-каналов) двух электронов, испускаемых из тонкой фольги (30–60 г/см²) $\beta\beta$ -источников (^{100}Mo , ^{82}Se , ^{150}Nd , ^{96}Zr , ^{116}Cd , ^{130}Te , ^{48}Ca). Этот метод дает уникальную информацию (спектр отдельного электрона, угловое распределение между электронами и т.д.), которая не может быть получена с помощью других геохимических и калориметрических методов измерений $\beta\beta$ -распада.

В 2004 г. детектор NEMO-3 работал в регулярном режиме при стабильных условиях 75 % времени. Было проведено всестороннее изучение фона. Полное время экспозиции составило 450 дней (февраль 2003 г. — ноябрь 2004 г.). Из анализа различных каналов данных NEMO-3 были оценены компоненты фона. Ожидаемое количество событий в диапазоне энергии 2,8–3,2 МэВ в $0\nu\beta\beta$ (^{100}Mo) для $2\nu\beta\beta$ -хвоста (e, e -канал) — 0,3 1/кг/год (рис. 6) — и 0,1 1/кг/год для примесей ^{208}Tl (e, γ - и $e, \gamma\gamma$ -каналы). Вклады от нейтронов и высокоэнергетических γ -лучей (e, e -события ниже 4 МэВ), а также

от примесей ^{208}Tl (в основном внутри РМТ, e, γ -события) незначительны. Полученные данные находятся в соответствии с предыдущими измерениями HPGe.

Обнаружено, что радон, который попадает внутрь детектора из воздуха лаборатории (≈ 15 Бк/м³), является основным компонентом фона при $0\nu\beta\beta$ -распаде. Уровень радона внутри трекового объема ≈ 20 –30 Бк/м³ вносит ~ 1 1/кг/год событие типа $0\nu\beta\beta$ в диапазоне энергий 2,8–3,2 МэВ, что велико для чувствительности NEMO-3. По этой причине в 2003–2004 гг. была разработана, построена и установлена антирадонная фабрика. С 4 октября 2004 г. она подает очищенный воздух (125 м³/ч, $A(^{222}\text{Rn}) < 1$ Бк/м³) в антирадонный тент, которым накрыт детектор. Благодаря этой фабрике уровень радона был понижен в 25 раз (с 16 Бк/м³ в августе до 0,6 Бк/м³ в конце октября); если потребуется, уровень радона может быть еще понижен. Ожидается исключение влияния радона при следующих измерениях.

Выполнен анализ $2\nu\beta\beta$ -моды. Из-за огромной статистики тщательно изучены систематические ошибки для фона, трекинга и моделирования. Результаты, полученные для различных изотопов, приведены в табл. 1.

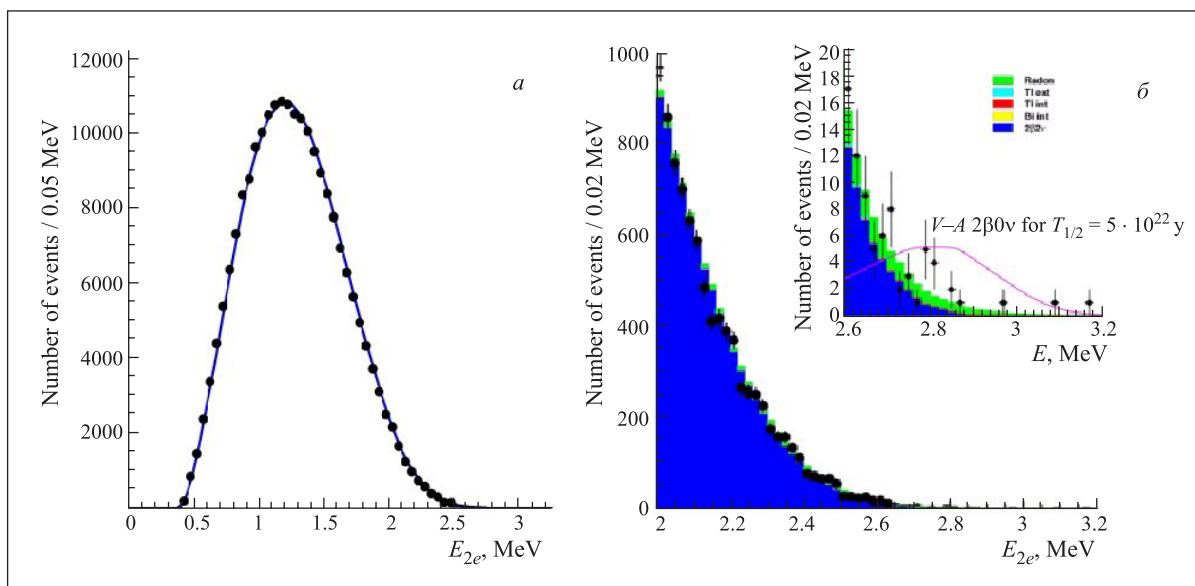


Рис. 6. Полный спектр (а) и хвостовая часть (б) спектра суммарной энергии двух электронов в ^{100}Mo после 9496 ч измерений (228640 событий наблюдалось по сравнению с ожидаемыми 5565 событиями фона). ● — экспериментальные данные; линии и закрашенная область — данные моделирования

Таблица 1

Изотоп	Масса, г	Время экспозиции, сут	Количество событий	Сигнал/фон	$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta}$, год
^{82}Se	932	241,5	2385	3,3	$(10,3 \pm 0,2 \text{ (стат.)} \pm 1,0 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{19}$
^{96}Zr	9,4	168,4	72	0,9	$(2,0 \pm 0,3 \text{ (стат.)} \pm 0,2 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{19}$
^{100}Mo	6914	241,5	145245	45,8	$(7,72 \pm 0,02 \text{ (стат.)} \pm 0,54 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{18}$
^{116}Cd	405	168,4	1371	7,5	$(2,8 \pm 0,1 \text{ (стат.)} \pm 0,3 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{19}$
^{150}Nd	37	168,4	449	2,8	$(9,7 \pm 0,7 \text{ (стат.)} \pm 1,0 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{18}$

После анализа набранных за 265 дней данных не было обнаружено следов двойного безнейтринного β -распада ни для ^{100}Mo , ни для ^{82}Se в следующих пределах:

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}(^{100}\text{Mo}) \geq 3,5 \cdot 10^{23} \text{ лет} \Rightarrow \langle m_\nu \rangle \leq 0,7-1,2 \text{ эВ},$$

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}(^{82}\text{Se}) \geq 1,9 \cdot 10^{23} \text{ лет} \Rightarrow \langle m_\nu \rangle \leq 1,3-3,2 \text{ эВ}.$$

NEMO-3 является лучшим экспериментом по поиску двойного β -распада с эмиссией майорона ($\beta\beta\chi$). Современный предел для $T_{1/2}^{\beta\beta\chi}(^{100}\text{Mo}) \geq 1,5 \cdot 10^{22}$ лет. (90 % CL), что соответствует $\chi < (5-8) \cdot 10^{-5}$ и является лучшим результатом в мире на данный момент. Идет анализ $2\nu\beta\beta$ -распада на возбужденные состояния ^{100}Mo и $2\nu\beta\beta$ -распада в ^{48}Ca .

В конце 2003 г. были начаты научно-исследовательские работы над модулями детектора следующего поколения SuperNEMO. Основная задача для SuperNEMO — достичь чувствительности 0,03 эВ $\langle m_\nu \rangle$ с $\beta\beta$ -источником массой 100 кг, что мало по сравнению с другими проектами, требующими тонн $\beta\beta$ -источника. Успешный опыт с NEMO1/2/3 и практически нулевой фон при регистрации «золотого события» дает SuperNEMO серьезное преимущество в соревновании с другими подобными проектами (CUORE, MAJORANA, GERDA, EXO, MOON и т. д.).

Основными направлениями научно-исследовательских работ для SuperNEMO являются улучшение энергетического разрешения калориметра до 5–7 % на 1 МэВ (против 15–17 % для NEMO-3), выбор, производство и очистка $\beta\beta$ -источника, дизайн модулей.

Группа из Дубны внесла существенный вклад в обеспечение работы детектора NEMO-3, калибровку, тест SuperNEMO и во все стадии анализа данных от поддержки и разработки программного обеспечения до получения окончательных результатов [22–24].

В 2005 г. NEMO-3 продолжит набор данных в отсутствие радона. Усилия группы будут сосредоточены на улучшении анализа данных с целью уменьшения систематических ошибок при расчетах фона, трекинге и моделировании. Будут продолжены перекрестные тесты и анализ данных разными группами, входящими в проект NEMO, для проверки полученных результатов. Параллельно с оптимизацией конструкции модуля и выбором лучшего сцинтиллятора для калориметра, будет выполняться научно-исследовательская программа SuperNEMO.

В рамках проекта LESI впервые проведены исследования реакции $p+d \rightarrow ^3\text{He}+\gamma$ (5,5 МэВ) столкновения протонов с дейтронами в области ультранизких энергий $2,7 \leq E_{pd} \leq 16,7$ кэВ с использованием

сильноточного импульсного ускорителя МИГ ИСЭ СО РАН, Томск ($\tau \approx 100$ нс, $I \approx 2,5$ МА). Найдены верхние граничные оценки астрофизического фактора $S_{pd}(E_{pd})$ и эффективного сечения pd -реакции для интервала энергий столкновения протонов с дейтронами $2,7 \leq E_{pd} \leq 16,7$ кэВ, которые согласуются с результатами расчетов $\tilde{\sigma}_{pd}$ ($2,7 \leq E_{pd} \leq 16,7$ кэВ) $\leq 4 \cdot 10^{-33}$ см².

Параллельно проводились исследования возможности использования альтернативного метода изучения реакций между легкими ядрами — метода, основанного на использовании высокоинтенсивных встречных потоков плазмы, формируемых в разряде в скрещенных $E \times H$ -полях.

В 2004 г. начаты работы по созданию ускорителя с использованием холловского ионного источника. Применение такого типа источника позволит формировать сильноточные (~ 100 А), баллистически сходящиеся ионные пучки H^+ , D^+ с энергией 1–12 кэВ и с разбросом меньше 5 %. Безусловно, использование данного ускорителя весьма перспективно для исследования pd -, dd -, $d^3\text{He}$ -реакций в области ультранизких энергий [25–27].

Совместно РФЯЦ и ВНИИЭФ в рамках проекта « μ -катализ» на фазотроне ЛЯП ОИЯИ с применением новых методов выполнены уникальные исследования процесса μ -катализа в смеси D/T. Измерения проведены в широком диапазоне параметров смеси: плотности ($\varphi = 0,2-1,2$ от плотности жидкого водорода), температуры ($T = 20-800$ К) и концентрации трития ($C_t = 15-85$ %). Разнообразие экспериментальных условий можно видеть на рис. 7, где показаны зависимости скорости цикла от параметров смеси.

Обобщенный анализ всех данных позволил определить основные параметры μ -катализа (зависимость $\lambda_{dt\mu-d}$ и $\lambda_{dt\mu-t}$ от φ и T). В целом они согласуются с результатами других групп в тех областях, где условия одинаковы (рис. 8). Сравнение экспериментальных данных с теорией подтверждает эффективность главных механизмов, рассматриваемых теорией μ -катализа, но полного количественного описания процесса еще не достигнуто. Было бы очень важно провести измерения со смесью D/T при высоких температурах $T = 1000-2000$ К, где основные резонансы проявляются наиболее эффективно.

На фазотроне ОИЯИ завершены измерения процессов μ -катализа в жидком тритии с целью определения скорости образования мюонных молекул $tt\mu$, скорости ядерной реакции, вероятности прилипания мюона к ядру He и оценки вклада α - n -корреляций в конечном состоянии. Ведется обработка полученных результатов.

В рамках проекта в 2005 г. планируется завершение обработки полученных результатов по определению основных параметров μ -катализа в жидком тритии, изготовление, монтаж и запуск установок

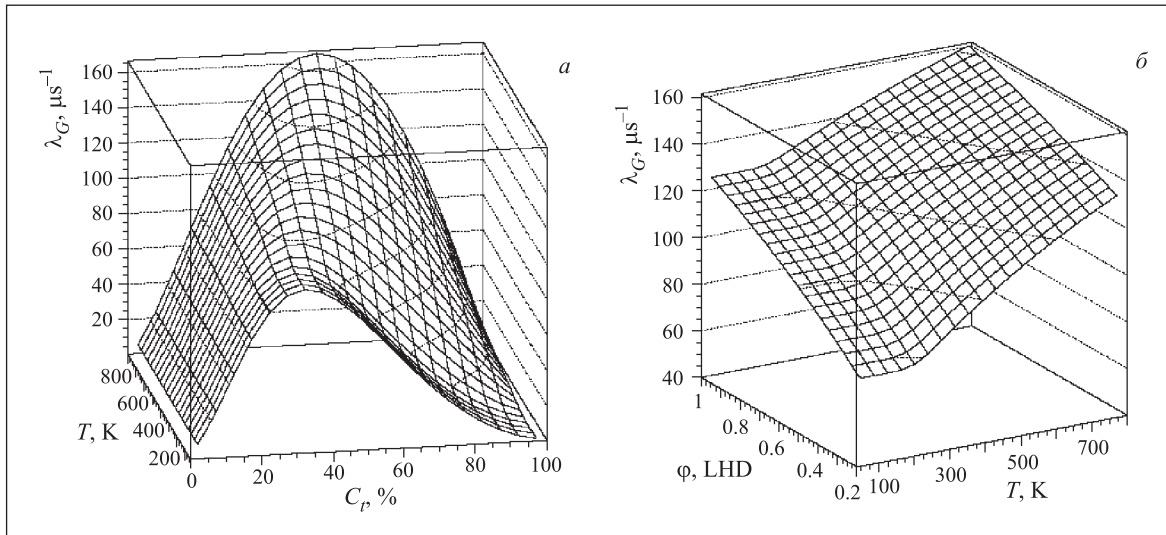


Рис. 7. Зависимости приведенной скорости цикла от условий смеси D/T, построенные с использованием оптимальных параметров, полученных из фита: а) приведенная скорость цикла как функция концентрации трития и температуры для $\varphi = 0,4$ от плотности жидкого водорода; б) приведенная скорость цикла как функция температуры и плотности для $C_t = 0,35$

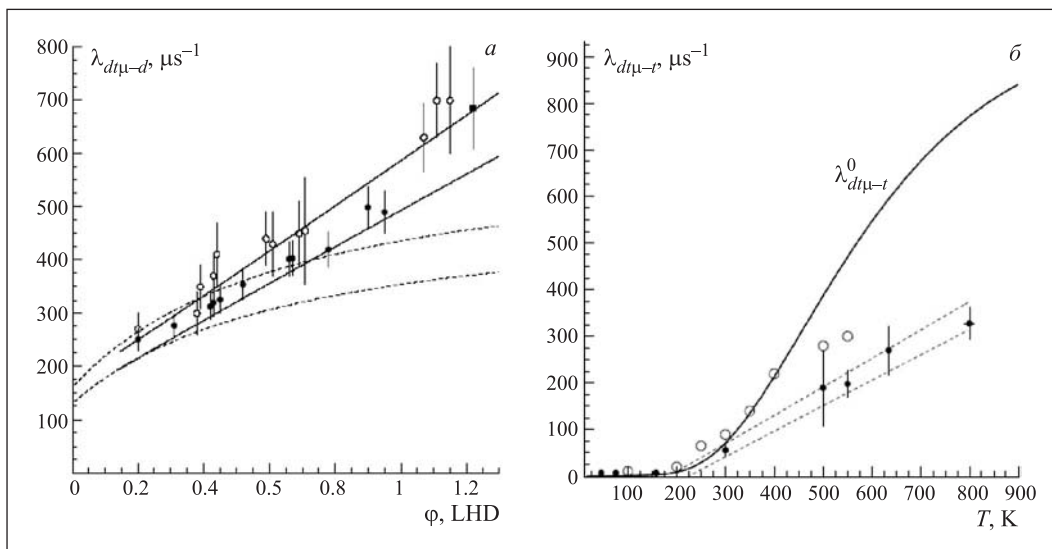


Рис. 8. а) $\lambda_{dt\mu-d}$ как функция плотности. ● — наши точки для газа; ○ — результат LAMPF; ■ — результат для жидкости, полученный группой В.Г. Зинова; сплошные линии — границы допустимых значений, найденные из общего фита; пунктирные — границы области $\lambda_{dt\mu-d}$, полученные в PSI. б) $\lambda_{dt\mu-t}$ как функция температуры. ● — наши точки; ○ — результат LAMPF; сплошная линия — теоретические расчеты $\lambda_{dt\mu-t}$; пунктирные линии — границы нашей параметризации для $\lambda_{dt\mu-t}$

для измерения выхода реакции радиационного захвата в дейтерии из состояния мюонной молекулы $dd\mu$.

Основываясь на экспериментальных данных, полученных в 1999–2001 гг. с помощью широкоапертурного детектора **PIBETA** на пучке остановленных пионов, провели прецизионное измерение относительной вероятности редкого распада пиона

$\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu(\pi_\beta)$. Относительная вероятность этого распада была вычислена при помощи нормализации количества зарегистрированных распадов π_β на количество зарегистрированных распадов $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu(\pi_{e2})$. Найдена величина

$$\Gamma(\pi^+ \rightarrow (\pi^0 e^+ \nu)) / \Gamma(\text{tot.}) = 1,036 \pm 0,004(\text{стат.}) \pm 0,004(\text{сист.}) \pm 0,003(\pi_{e2}) \cdot 10^{-8}.$$

Полученный результат хорошо согласуется с предсказанием стандартной модели.

Также было проведено изучение радиационного распада пиона $\pi^+ \rightarrow e^+\nu\gamma$ в трех кинематических областях: 1) $E_{e^+}, E_\gamma > 51,7$ МэВ; 2) $E_{e^+} > 20,0$ МэВ, $E_\gamma > 55,6$ МэВ; 3) $E_{e^+} > 55,6$ МэВ, $E_\gamma > 20,0$ МэВ (во всех трех областях угол между позитроном и γ -квантом $\theta_{e^+, \gamma} > 40^\circ$) с помощью установки RIBETA и пучка остановленных пионов. На основании распределения Далица для 41601 события были оценены вероятности распада $\pi^+ \rightarrow e^+\nu\gamma$ для каждой из трех областей. Фитирование интегральных и дифференциальных распределений дало величину отношения формфакторов слабого взаимодействия (аксиального к векторному) $\gamma \equiv F_A/F_V = 0,443(15)$, или $F_A = 0,0115(4)$ при $F_V = 0,0259$. Однако отклонение от предсказаний стандартной модели в кинематической области (2) (высокая E_γ , малая E_{e^+}) указывает на необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований [28, 29].

В 2004 г. на установке RIBETA проведен специальный сеанс для изучения распада $\pi^+ \rightarrow e^+\nu\gamma$. Записано около 450 Гбайт экспериментальных данных, которые будут обработаны в течение 2005 г. В 2005 г. также планируется ревизия установки RIBETA для подготовки эксперимента по прецизионному исследованию распада $\pi^+ \rightarrow e^+\nu$.

DUBTO — совместный проект ОИЯИ и INFN по изучению пион-ядерных взаимодействий при энергиях ниже Δ -резонанса. Используемая экспериментальная установка «Стример» является самошунтирующейся стримерной камерой, наполненной гелием, находящейся в магнитном поле и оснащенной двумя видеокамерами с ПЗС-матрицами для видеорегистрации ядерных событий, происходящих в объеме камеры. Эта техника была создана в 70-е годы в ЛЯП ОИЯИ совместно с туринской секцией INFN.

В эксперименте DUBTO стримерная камера была размещена на пионном пучке фазотрона ЛЯП ОИЯИ, интенсивность пучка была $(1-5) \cdot 10^4$ с $^{-1}$ при импульсе пионов 218 МэВ/с.

Одна из задач эксперимента — извлечение информации об инвариантной массе πNN при низких энергиях, где влияние Δ -резонанса мало, что можно выполнить, определяя инвариантную массу рассеянного пиона и двух вторичных нейтронов в трехлучевой реакции развала $\pi^{\pm 4}\text{He} \rightarrow \pi^+ 2p 2n$. Для идентификации этой реакции была применена искусственная нейронная сеть (ANN).

Полное количество событий $\pi^{\pm 4}\text{He}$, полученное во время работы, представлено в табл. 2.

Некоторые проблемы взаимодействия пионов с ядрами при низкой энергии могут быть решены

Таблица 2

Реакция	Энергия пионов, МэВ	Количество событий
$\pi^+{}^4\text{He}$	100	0,12346
$\pi^-{}^4\text{He}$	100	9211
$\pi^+{}^4\text{He}$	70	1930
$\pi^-{}^4\text{He}$	70	1430

только при измерении кинематики всех заряженных продуктов реакции.

Измерение событий реакции $\pi^{\pm 4}\text{He} \rightarrow \pi^+ 2p 2n$ позволило выделить свыше 200 событий, удовлетворяющих условию взаимодействия двух нейтронов в конечном состоянии, для которых распределение инвариантных масс πNN (рис. 9) проявляет резонансное поведение и имеет максимум в районе 2,07 ГэВ. Аналогичный результат был получен для протон-протонного взаимодействия при энергии 920 МэВ в ИТЭФ. Похожий результат получен с отрицательными пионами.

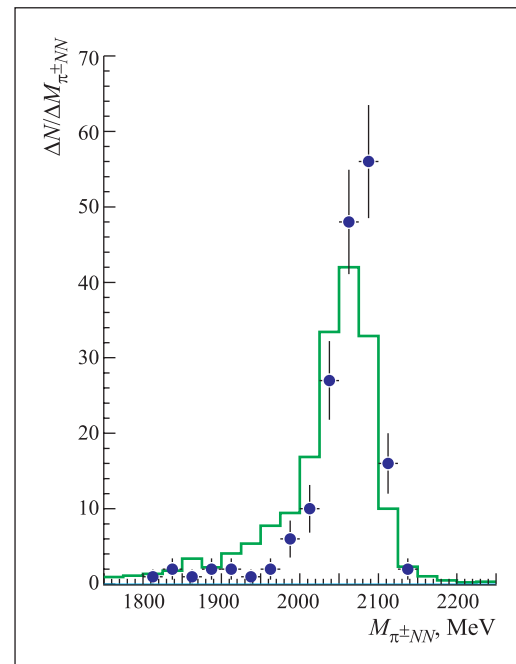


Рис. 9. Распределение масс $\pi^{\pm}NN$: гистограмма — моделирование; кружки — эксперимент

Еще один физический результат, полученный коллаборацией, состоит в первом наблюдении явления тормозного излучения положительных пионов на ядрах гелия. Измерение импульса ядер отдачи в двухлучевых событиях $\pi^{\pm 4}\text{He}$ -взаимодействия позволило разделить события чисто упругого рассеяния пионов и события тормозного излучения пионов на ядре ${}^4\text{He}$.

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Изучение распадов сильно возбужденных ядер является одним из наиболее перспективных направлений в ядерной физике, дающим доступ к ядерному уравнению состояний при температурах ниже критической (T_c) для фазового перехода жидкость–газ. Главная мода распада сильно возбужденных ядер эмитирует промежуточные массовые фрагменты, которые тяжелее α -частиц, но легче, чем продукты реакции. Большая активность в этой области вызвана ожиданием того, что этот процесс связан с фазовым переходом в ядерной среде. Эти надежды реализованы в проекте «Фаза», который нацелен на изучение тепловой мультифрагментации, индуцированной в тяжелых мишенях релятивистскими легкими ионами.

В экспериментах используется 4 π -установка «Фаза» на выведенном пучке нуклотрона ОИЯИ. Доказано [30, 31], что тепловая мультифрагментация должна рассматриваться как спиноподобный распад, являющийся фазовым переходом жидкость–туман. Найдено, что критическая температура для фазового перехода жидкость–газ равна (17 ± 2) МэВ, что значительно выше, чем температура фрагментации (5–6 МэВ).

В рамках статистической мультифрагментационной модели были проанализированы уникальные экспериментальные данные для распределения заряда фрагментов, $Y(Z)$ и спектра кинетической энергии мультифрагментации мишени в реакции $p(8,1 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$ (рис. 10). Из формы зависимости $Y(Z)$ найдено, что деление горячих ядер определяется точно после расширения спектра мишени до объема, равного $V_t = (2,9 \pm 0,2)V_0$, где V_0 — объем с нормальной плотностью (рис. 11). Однако вымороженный объем, найденный из спектра энергии, равен $V_f = (11 \pm 3)V_0$. При вымораживании все фрагменты хорошо разделены, во внимание должно приниматься только кулоновское взаимодействие, а ядерное взаимодействие все еще играет важную роль в стадии формирования префрагментации. Таким образом, термальная мультифрагментация характеризуется двумя размерными параметрами.

Существование двух различных размерных параметров для мультифрагментации вполне понятно. Первый объем соответствует стадии формирования фрагментов, когда по сути спектроп горячей мишени трансформируется в конфигурацию, состоящую из определенных префрагментов. Эти префрагменты еще не полностью развиты, между ними

еще идет ядерное взаимодействие. Распад по конечному каналу завершается в течение динамической эволюции системы вплоть до момента времени, когда

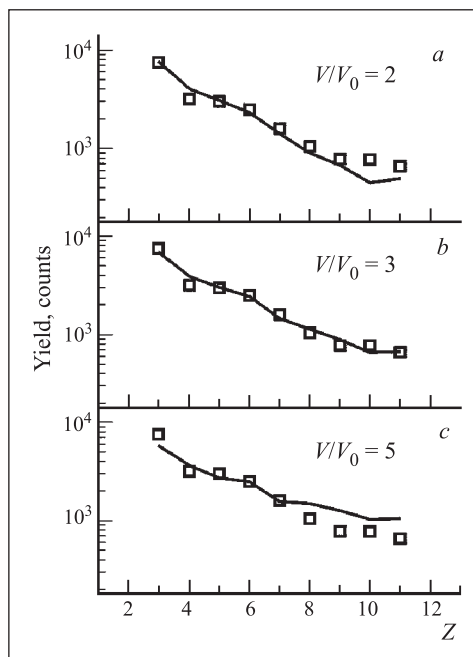


Рис. 10. Распределение заряда промежуточных массовых фрагментов для реакции $p(8,1 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$ (точки) и распределения, рассчитанные в описании INC + Exp. + SMM с использованием различных значений объема частей системы

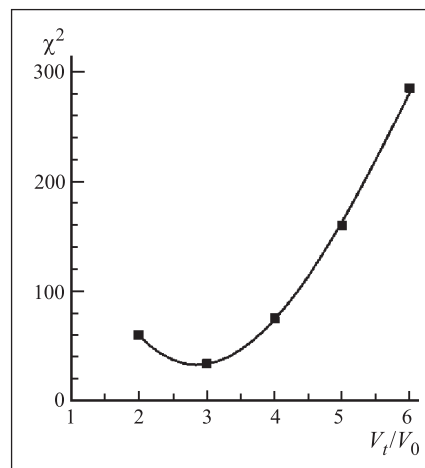


Рис. 11. Зависимость χ^2 от V_t/V_0 для сравнения измеренного и рассчитанного распределений заряда ФПМ. Лучшее отфитированное значение модели соответствует $V_t = (2,9 \pm 0,2)V_0$

удаляющиеся и взаимодействующие предфрагменты полностью разделены. Это обычное деление. Седловая точка напоминает конечный канал деления наличием довольно явной асимметрии масс. После спуска системы с вершины барьера распада до точки разрыва ядерное взаимодействие исчезает. Таким образом, первый объем V_t соответствует конфигурации системы на вершине энергетического барьера фрагментации, когда распределение заряда определено. Другой объем V_f соответствует точке множественного разрыва в терминах обычного деления. При традиционном применении статистических моделей

используется только один параметр, называемый незамороженным объемом.

В 2005 г. коллаборация планирует модернизацию установки «Фаза» с целью увеличения эффективности срабатывания, модернизацию защиты канала пучка, чтобы иметь возможность работы с пучками высокоинтенсивных протонов. Начнутся новые экспериментальные исследования пространственных свойств мультифрагментации, индуцированной релятивистскими пучками, и модельное изучение ФПМ–ФПМ-корреляций, запускаемых равновесными частицами.

НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проводились расчетные работы по оптимизации параметров разработанного и изготовленного в ОИЯИ циклотрона **СУТРАСК**, предназначенного для промышленного изготовления трековых мембран. Для этого была написана программа в системе MATLAB, интегрирующая дифференциальные уравнения движения, и создана компьютерная модель спирального электростатического инфлектора, служащего для поворота пучка из вертикального канала в медианную плоскость циклотрона. В программе предусмотрен учет эффектов пространственного заряда и потерь на перезарядку на остаточном газе. Были произведены расчеты движения пучка через банчер и инфлектор. Теоретический коэффициент прохождения пучка через банчер и инфлектор (до первого ускорительного промежутка) составляет 20 %, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Численные расчеты распределения пучка по облучаемой пленке показали, что можно, используя синусоидальное по форме напряжение на сканирующем магните, получить проектные значения равномерности облучения пленки, однако применение пилообразного напряжения позволит уменьшить потери при облучении с 30 до 20 %, равномерность облучения также улучшится. Рекомендован переход на пилообразное питание для сканирующего магнита. Результаты работ по проектированию, изготовлению и пуску циклотрона были опубликованы в ряде статей в реферируемых журналах [32, 33] и выдвинуты на соискание премии ОИЯИ 2004 г.

На фазотроне ЛЯП ОИЯИ осуществлена модернизация мезонных каналов № 1, 2, 3, направленная на расширение возможностей проведения физических исследований на мезонных пучках фазотрона путем улучшения параметров существующих и формирования новых мезонных пучков. В резуль-

тате проведенной модернизации интенсивность пучков положительных пионов на канале № 3 выросла в диапазоне энергий 100–400 МэВ от 3 до 40 раз и достигла $3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ на 1 мкА выведенного протонного пучка. Максимальная интенсивность пучка отрицательных пионов в этом диапазоне энергий приблизилась к значению $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ на 1 мкА выведенного протонного пучка (рис. 12).

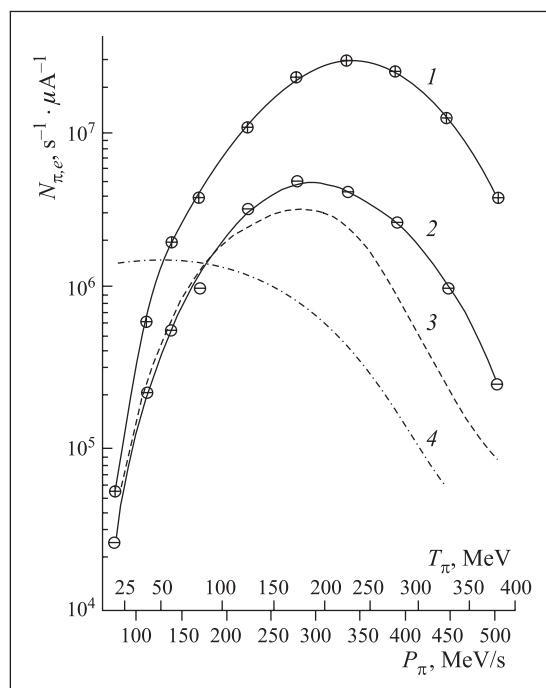


Рис. 12. Интенсивность пучков π^+ (1), π^- (2) в канале № 3 после модернизации фазотрона; интенсивность π^+ (3), π^- (4) до модернизации

В рамках темы «Физика и техника ускорителей заряженных частиц» в ЛЯП ОИЯИ завершено создание накопителя LEPTA. Получен циркулирующий

электронный пучок в интервале энергий 1,5–10 кэВ с током пучка до 10 мА, время жизни пучка было получено на уровне 2 мс. Продолжается сооружение позитронного инжектора. Изготовлены соленоиды и вакуумная система позитронной ловушки. Создан источник позитронов на базе радиоактивного изотопа ^{22}Na . Проведены первые измерения потока позитронов из радиоактивного источника и сделан анализ энергетического спектра позитронов. Разработана экспериментальная программа с направленным потоком позитрония. Пучок позитрония будет генерироваться на накопителе LEPТА в процессе охлаждения циркулирующего позитронного пучка электронным пучком. В качестве первых экспериментов планируется измерение времени жизни орто- и пара-позитрония, спектроскопия позитрония.

В 2005 г. в рамках проекта LEPТА предполагается разработка технического проекта генерации пучка атомов антиводорода на антипротонном накопителе.

Основной целью работ 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 2004 г. совместно с Медицинским радиологическим научным центром, Обнинск, радиологическим отделением МСЧ-9 и научными лечебными учреждениями Чехии и Болгарии были продолжены клинические исследования по протонной терапии онкологических больных на пучках фазотрона ОИЯИ в процедурной кабине №1 МТК. С 01.12.2003 по 30.11.2004 на медицинском протонном пучке курс фракционированного лучевого лечения прошли 95 пациентов (125 облученных мишеней), при этом общее количество протонных терапевтических облучений превысило 3000. Еще 55 пациентов прошли курс лечения на γ -аппарате «Рокус-М» (более 1500 лучевых сеансов).

В первую процедурную кабину был выведен терапевтический протонный пучок со средней энергией 225 МэВ для облучения пациентов с раком простаты. Для этого пучка были разработаны и изготовлены специальные формирующие устройства — гребенчатые фильтры. Фильтры позволяют получать пучок с плоским максимумом на глубинно-дозовом распределении около 70 и 85 мм воды в зависимости от протяженности конкретной мишени, подлежащей облучению (рис. 13). Все дозиметрические параметры сформированного пучка были измерены и введены в систему планирования трехмерной конформной протонной лучевой терапии.

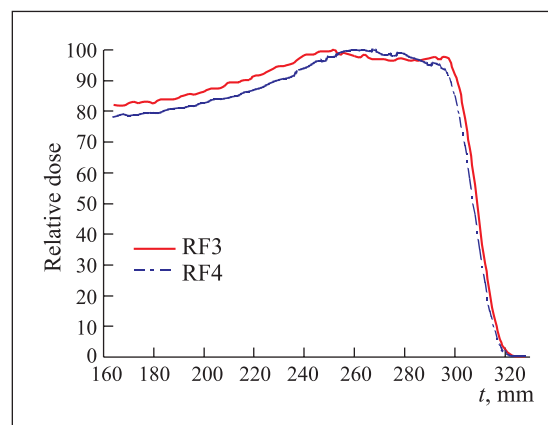


Рис. 13. Глубинные дозные распределения протонного пучка 225 МэВ с двумя различными гребенчатыми фильтрами

Завершено создание быстросъемной деки к терапевтическому креслу для фиксации пациентов в положении лежа в сеансах протонной терапии в кабине №1, что позволит проводить облучение ранее недоступных мишеней (рак простаты и др.). Для центрации пациентов в процедурной кабине установлены и введены в эксплуатацию два дополнительных рентгеновских аппарата. Были продолжены работы по молекулярному анализу радиационно-индуцированных мутационных повреждений в генах животных и человека [34].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adeva B. et al.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2004. V. 30. P. 1929–1946.
2. *Kulikov A., Zhabitsky M.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 527. P. 591.
3. *Afanasyev L. et al.* Dynamics of the Pionium with the Density Matrix Formalism // J. Phys. B (in press); physics/0407110.
4. *Popov B. A. et al.* // Yad. Fiz. 2004. V. 67, No. 11. P. 2004.
5. *Chukanov A. V. et al.* NOMAD memo 2004-03.
6. *Petti R. et al.* Precision Measurements from the NOMAD Experiment. Talk at ICHEP'04, Beijing, China, Aug. 16–22, 2004.
7. *Camilleri L. et al.* Precision Measurements in Neutrino Interactions (NuTeV, NOMAD, CHORUS). Talk at Neutrino'04, College de France, Paris, June 14–19, 2004.
8. *Kulchitsky Y. et al.* ATL-COM-TILECAL-2004-009. Geneva, 2004.
9. *Del Peso J., Ros E.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. V. 276. P. 456.
10. *Belletini G. et al.* CDF-7063. 2004.
11. *Arguin J.-F. et al.* CDF-7139. 2004.
12. *Belletini G. et al.* CDF-7093. 2004.
13. *Artikov A. et al.* CDF-6926. 2004.
14. *Artikov A. et al.* CDF-7033. 2004.

15. *Ashmanskas B. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 518. P. 532.
16. *Cervera-Villanueva A. et al.* First Physics Results from the HARP Experiment at CERN. hep-ex/0406053.
17. *Gomez-Cadenas J. J. et al.* HARP Measurement of Pion Yields in a Replica Target of the K2K Experiment. hep-ex/04100043.
18. *Gubin D. et al.* Secondary Hadron Production by Protons and Pions. Results from HARP Experiment. HARP internal memo. 2004.
19. *Abrashkin V. et al.* // Proc. of the 19th ECRS, Florence, Italy, 2004. Singapore, 2004.
20. *Abrashkin V. et al.* // COSPAR Conf. «Advances in Space Research», 2004. No. 2-0022-04.
21. *Artamonov A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 031801.
22. *Kochetov O. (for NEMO collab.)* // Phys. At. Nucl. 2004. V. 67. P. 1995.
23. *Shitov Yu. (for NEMO collab.)*. nucl-ex/0405030. 2004.
24. *Arnold R. et al.* // Pis'ma ZhETF. 2004. V. 80. P. 429.
25. *Bystritsky V. M. et al.* Dynamics of Hydrogen Liner Formation in the Inverse Z -Pinch Configuration at the MIG Generator. First Results on the Study of the pd Reaction // 15th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams, St. Petersburg, Russia, July 18–23, 2004.
26. *Bystritsky V. M. et al.* Hydrogen Inverse Z -Pinch on the High Current Generator MIG // 13th Intern. Symp. on High Current Electronics, Tomsk, Russia, July 25–30, 2004.
27. *Bystritsky V. M. et al.* Search of Interaction Processes of Plasma Opposing Fluxes // Ibid.
28. *Počanić D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 181803.
29. *Frlež E. et al.* // Ibid. P. 181804.
30. *Karnaikhov V. A. et al.* // Nucl. Phys. A. 2004. V. 734.
31. *Karnaikhov V. A. et al.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 66. P. 031601(R).
32. *Onischenko L. M. et al.* Cyclotron CYTRACK for Membrane Production // 17th Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Japan, 2004.
33. *Denisov Yu. N. et al.* // Rev. Sci. Instr. 2004. V. 75, No. 2. P. 367.
34. *Аганов А. В. и др.* Сообщение ОИЯИ Р13-2004-88. Дубна, 2004.