

# ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ им. В. П. ДЖЕЛЕПОВА

## ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В рамках проекта ATLAS в 2006 г. продолжались работы по сборке в установке мюонных камер, изготовленных ранее в ОИЯИ, по подготовке к их запуску на пучке ЛНС. Также велись работы по подготовке к физическим исследованиям на ЛНС, по освоению и поддержке программных продуктов ATLAS, по освоению методики и программного обеспечения распределенной обработки данных с использованием технологий Grid.

В течение 2006 г. продолжалось подключение к рабочим коммуникациям ATLAS мюонных камер типа BMS/BMF, установленных в установке в 2005 г. Подключение и тестирование камер ведется по общему плану-графику с учетом возможности доступа и очередности подвода кабелей. В октябре 2006 г. начались испытания камер 13 сектора на космических мюонах.

В среде SANC были рассчитаны процессы, важные для физики ATLAS. Был создан новый генератор для распадов хиггс-бозонов по каналу  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$  [1] с учетом электрослабых радиационных поправок и квантовых эффектов, связанных с присутствием тождественных фермионов в конечном состоянии. Другой канал распадов хиггс-бозона,  $H \rightarrow \mu\mu\gamma$ , был также исследован в среде SANC. Его ширина равна  $1,3 \cdot 10^{-6}$  ГэВ ( $M_H = 130$  ГэВ/ $c^2$ ) по сравнению с  $2,4 \cdot 10^{-7}$  ГэВ для распада  $H \rightarrow 4\mu$  [2].

Проведено тщательное исследование процессов Дрелла-Яна  $qq' \rightarrow W \rightarrow \mu\nu$  и  $qq' \rightarrow Z \rightarrow \mu\mu$ . В рамках кварк-партонной модели был выполнен полный расчет электрослабых поправок  $O(\alpha)$  для этих процессов [3, 4]. Вклад поправок составил 10% по сравнению с вычислениями в низшем порядке.

В широком диапазоне возможных значений масс хиггс-бозона (120–180 ГэВ/ $c^2$ ) была исследована возможность обнаружения и изучения хиггс-бозона в канале распада  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ . Была разработана процедура подавления (в 2–3 раза) основного фонового процесса  $pp \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ . Фон от событий  $pp \rightarrow tt$  и  $pp \rightarrow Zbb$  подавляется в несколько сотен раз и потому мало влияет на возможность выделения сигнала. Был обнаружен ранее не учитывавшийся фон — случайное совпадение во времени двух независимых реакций рождения одиночных  $Z$ -бозонов ( $pp \rightarrow ZZ \rightarrow 2\mu$ ). Вклад этого фона составляет около 10% от основного фона.

Было проведено сравнение генератора событий PYTHIA с разработанным группой SANC генератором, учитывающим радиационные поправки, а также квантовые эффекты, возникающие из-за наличия в конечном состоянии тождественных частиц (мюонов). Обнаружено, что эффекты тождественности частиц позволяют несколько более эффективно разделять события фона и сигнала (соотношение сигнал/фон улучшается на 5–10%) (рис. 1).

Проведена оценка уровня достоверности обнаружения хиггс-бозона для различных значений его массы, с учетом квантовых эффектов тождественности. На рис. 2 показано распределение по реконструированным инвариантным массам событий сигнала ( $M_H = 130$  ГэВ/ $c^2$ ) и фона (в основном  $pp \rightarrow ZZ$ ). Уровень выделения сигнала из фона составит 12–15 стандартных отклонений после трех лет работы ускорителя.

Разработана процедура калибровки мюонного спектрометра ATLAS при помощи событий Дрелла-

Яна  $pp \rightarrow Z \rightarrow 2\mu$ . Показано, что эти события могут быть использованы для определения эффективности спектрометра и для калибровки измерения импульсов мюонов. Кроме того, показано, что высокая эффективность отбора и низкий уровень фона позволяют использовать события Дрелла–Яна для точного определения светимости ЛНС.

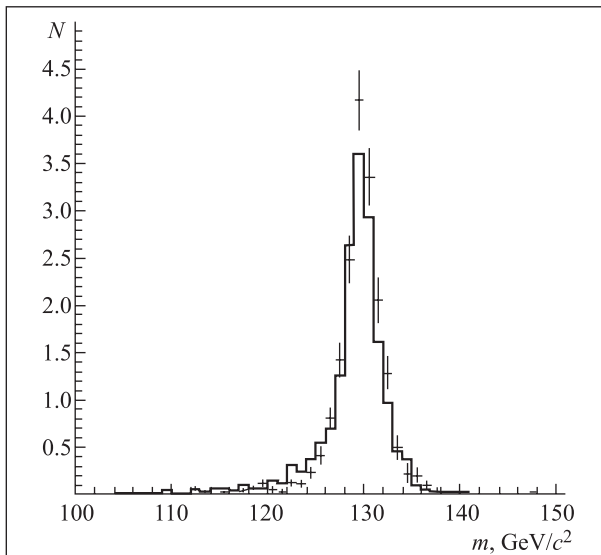


Рис. 1. Сравнение результатов моделирования с использованием «стандартного» генератора PYTHIA и данных группы SANC, учитывающих эффекты тождественности частиц в конечном состоянии, для распределения реконструированной массы хиггс-бозона (после применения процедуры отбора событий)

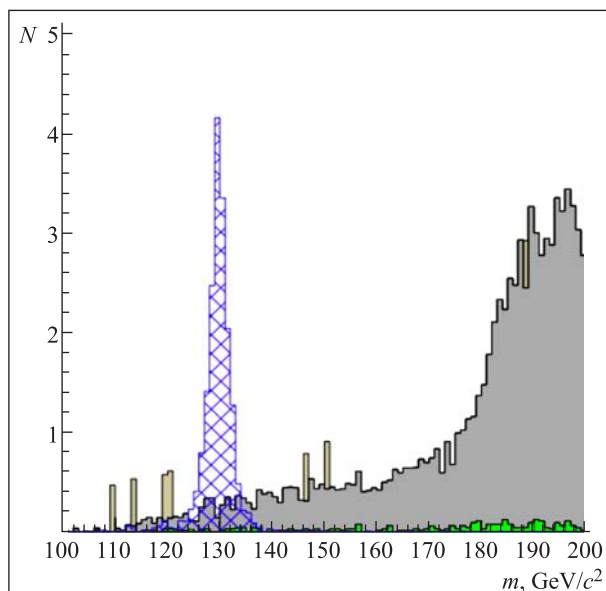


Рис. 2. Распределение по реконструированным инвариантным массам событий сигнала (заштрихованная область,  $M_H = 130 \text{ GeV}/c^2$ ) и фона (в основном  $pp \rightarrow ZZ$ ). Уровень выделения сигнала из фона составит 12–15 стандартных отклонений после трех лет работы ускорителя

Текущая версия программного обеспечения ATLAS установлена и поддерживается на компьютерах фермы общего пользования центрального вычислительного комплекса ОИЯИ. Данное программное обеспечение и вычислительные мощности фермы в 2006 г. активно использовались при проведении работ по подготовке к физическим исследованиям. Пользовательские программы физического анализа адаптированы для работы с данными в форматах ESD и AOD, в программной среде Athena.

В рамках участия в консорциуме EGEE–RDIG — российском узле сети Grid — ОИЯИ выполняет в эксперименте ATLAS роль одного из центров моделирования и анализа данных (Tier-2). В течение 2006 г. ОИЯИ участвовал в проведении комплексных испытаний системы распределенной обработки данных и массового моделирования событий ATLAS (Computing System Commissioning и Service Challenge). Ведется адаптация пользовательских программ физического анализа для работы с широким использованием возможностей Grid.

С целью проверки шкалы электромагнитной энергии **тайл-калориметра ATLAS** и для понимания его отклика 11 % модулей были облучены электронными пучками с различной энергией и под различными углами (сканирование по ячейкам под углом  $\theta = 20^\circ$  в центре,  $\eta$ -сканирование и сканирование по тайлам под углом  $\theta = 90^\circ$  для боковых ячеек модуля). Работы группы из ОИЯИ направлены на определение калибровочных констант электромагнитной энергии EBM- (ANL-44), EBM+ (IFA-42), BM- (JINR-55) модулей калориметра при энергиях 10, 20, 50, 100 и 180 ГэВ для различного сканирования на основе данных, полученных в июле 2002 г., с использованием метода подгоночного фильтра [5] реконструкции PMT-сигнала. Статистический и постоянный члены для выражения разрешения электронной энергии были получены из экспериментальных данных с помощью фитирования их квадратичным и линейным выражениями. Наблюдается хорошее согласие с линейной подгонкой для параметризации, рассчитанной по методу Монте-Карло. Показано совпадение (в области ошибок) соответствующих значений разрешения электронной энергии, полученных методами плоского фильтра и подгоночного.

На основе данных, набранных при экспозиции тайл-калориметра в электронный пучок, при различных энергиях получено значение  $e/mip$  как фактор толщины поглотителя [6]. Впервые обнаружена зависимость эффекта перехода ( $e/mip < 1$ ) от толщины поглотителя (рис. 3). Отношение  $e/mip$  уменьшается логарифмически с ростом толщины поглотителя, что совпадает с моделированием по методу Монте-Карло в пакете GEANT4 (версия 6.2). Был выполнен детальный расчет характеристик тайл-калориметра (TSF) в пакете GEANT4 (составной части пакета ATHENA) [7]. Также была

изучена чувствительность отношения  $e/h$  адронного тайл-калориметра к протонному загрязнению в положительно заряженных пионных пучках [8]. Оказалось, что внесение поправок в протонное загрязнение и поправок в выбранный критерий отбора в отношение  $e/\pi$  ведет к неизменяемому значению  $e/h$ -отношения:  $e/h = 1,36 \pm 0,01$ .

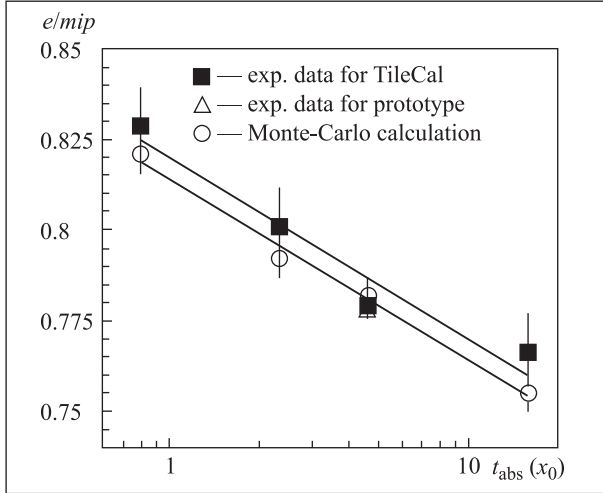


Рис. 3. Отношение  $e/mip$  как функция толщины поглотителя  $t_{abs}$  периода тайл-калориметра (в радиационных длинах): черные квадраты — экспериментальные данные; треугольники — результаты, полученные на прототипе; кружки — результаты моделирования по методу Монте-Карло для пробного пучка

В рамках проекта **SANC** разрабатывается новое программное обеспечение для расчетов практически всех  $1 \rightarrow 2$  и  $1 \rightarrow 3$  распадов, а также многих  $2 \rightarrow 2$  процессов на однопетлевом уровне. В 2006 г. в программу **SANC** были включены фермион-бозонные процессы  $f_1 \bar{f}_1 ZZ \rightarrow 0$  и  $f_1 \bar{f}_1 HZ \rightarrow 0$  [1], происходило дальнейшее изучение процессов Дрелла-Яна [3, 9]. В систему **SANC** были включены простейшие КХД-процессы, были продолжены расчеты ширины полуплептонных распадов [10, 11]. Продолжаются работы по приложению **SANC**-системы к физике на LHC. **SANC**-версия v1.00 доступна на серверах в Дубне и ЦЕРНе: <http://sanc.jinr.ru/> (159.93.75.10), <http://pcphsanc.cern.ch/> (137.138.180.42). Система начинает широко использоваться для физических приложений.

В рамках проекта **CDF** главными результатами 2006 г. стали лучшие в мире измерения массы топ-кварка и обеспечение эффективной работы установки **CDF**. Группа **CDF** внесла существенный вклад в определение массы топ-кварка в топологии «лептон + струи»:  $M_{top} = 173,4 \pm 2,5(\text{стат.}) \pm 1,3(\text{сист.}) \text{ ГэВ}/c^2$  [12]. В дилептонной топологии был улучшен метод измерений массы топ-кварка. Работы по измерениям продолжаются на компьютерном комплексе ОИЯИ в ЛИТ.

Усилия группы были также направлены на обеспечение эффективной и стабильной работы детектора **CDF** для физики  $c$ -,  $b$ -,  $t$ -кварков при самых высоких из достигнутых ранее энергий. Были улучшены системы мюонного контроля.

Группой из Дубны и Афинского университета предложен новый метод по извлечению массы топ-кварка: поперечные моменты электронов и мюонов, получаемых в каналах  $t\bar{t} \rightarrow$  дилептон и  $t\bar{t} \rightarrow$  лептон + струи, чувствительны к массе топ-кварка и могут быть точно измерены с малой систематической ошибкой, а при достаточной интегральной светимости — с очень малой общей ошибкой. На этот метод не влияют неопределенности шкалы энергий струй, он приемлем и для экспериментов, проводимых на тэватроне, и для будущих экспериментов на LHC.

Изучение на партонном уровне корреляций измерений в **VHM**-событиях показал, что несмотря на ослабление чувствительности разрешения **CDF** к корреляции при реконструкции параметров частиц она все еще видна и может быть измерена в двухчастичных корреляциях [13].

Основные усилия коллаборации **ДИРАК** были направлены на модернизацию установки. Был изготовлен и установлен в ЦЕРН вместе с новой радиационной защитой новый вакуумный канал. Также в ОИЯИ были изготовлены и установлены в ЦЕРН два новых черенковских счетчика. Была изготовлена новая электроника для сцинтилляционных детекторов и системы считывания. На пучке совместно с новой электроникой были испытаны две плоскости нового волоконного детектора, состоящего из волокон диаметром 0,27 мм и площадью  $(100 \times 100)$  мм. Система микродрейфовых камер была модернизирована в ОИЯИ и доставлена с ЦЕРН с новой входной электроникой. Была проведена обработка данных для получения времени жизни  $\pi^+ \pi^-$ -атома с систематической и теоретической ошибкой и генерации нового набора монте-карловских событий.

Редкий распад каона  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  рассматривается как идеальный процесс для понимания источника  $CP$ -нарушения и как тест Стандартной модели. Теоретическая неопределенность при определении относительной вероятности данной моды распада  $((3 \pm 0,6) \cdot 10^{-11}$  в Стандартной модели) составляет только 1–2% от экспериментальной неопределенности. Этот редкий распад рассматривался как идеальный процесс в кварковой физике для тестирования Стандартной модели и поисков новой физики за ее пределами. Современный экспериментальный предел для времени полураспада составляет  $5,9 \cdot 10^{-7}$ .

Эксперимент **E391a** в КЕК (Япония) — первый специализированный эксперимент по поиску распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ . Он основан на тонком пучке и герметичной вето-системе для фотонов в распадном объеме с высоким вакуумом. Эксперимент начался в феврале 2004 г. с целью улучшения существующего экс-

периментального предела на время полураспада на несколько порядков. В результате чувствительность к отдельным событиям распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  была рассчитана как произведение средних значений количества событий  $K_L^0$ -распадов, определенных на основе  $K_{2\pi}$  и  $K_{3\pi}$  с рассчитанным акцептансом для распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ , равным  $1,17 \cdot 10^{-7}$ . Сигнал зарегистрирован не был; ожидаемый уровень фона был пренебрежимо мал: с 90%-ной вероятностью верхний предел для распада, умноженный на фактор 2,3 до чувствительности к отдельному событию [14], равен  $2,9 \cdot 10^{-7}$ , это является основным результатом 2006 г.

В январе 2005 г. был проведен второй набор данных в эксперименте. Анализ и сравнение с результатами первого набора показали, что фоновые события ослаблены на 1 порядок. Акцептанс был посчитан на основе расчетов по методу Монте-Карло и данных эксперимента, он улучшился в 4 раза по сравнению с первым набором данных. После этого, в декабре 2005 г., был осуществлен третий набор. Эксперимент E391a был последним на протонном синхротроне с энергией пучка 12 ГэВ, который был закрыт в декабре 2005 г.

2006 г. был очень важным для эксперимента **ОПЕРА**: был запущен нейтринный пучок из ЦЕРН в Гран Сассо (Италия), а также электронные детекторы установки ОПЕРА, состоялись первые два сеанса набора событий на пучке. В результате в детекторах были зарегистрированы первые нейтрино из SPS CERN (рис. 4). Основным детектором для поиска осцилляций является ядерная фотоэмульсия, из тонких пластин которой, а также тонких слоев свинца, собираются блоки мишенной части установки ОПЕРА. Массовое изготовление таких блоков и заполнение ими детектора также начато в 2006 г. [15, 16].

Группа из ОИЯИ принимала активное участие как в запуске детекторов трековой системы целеуказания (так называемой Target Tracker), так и в разработке программного обеспечения для анализа данных с Target Tracker, что является одной из важнейших задач в эксперименте.

Космический эксперимент **TUS** нацелен на измерения энергетического спектра, состава и углового распределения космических лучей сверхвысоких энергий при  $E \approx 10^{19} - 10^{20}$  эВ. Флуоресцентный детектор будет запущен в 2009 г. как отдельная платформа «Фотон-4», изготовленная Са-

марским производственным предприятием. Спроектирована и находится на стадии изготовления новая платформа для TUS. Запущен прибор для трехмерных измерений поверхности (с точностью 5 мкм) и оптических свойств — прототип зеркала Френеля. Энергетическое разрешение флуоресцентных детекторов связано с неопределенностями в точности его обработки. В данный момент коллаборация выполняет измерения излучаемого флуоресцентного света.

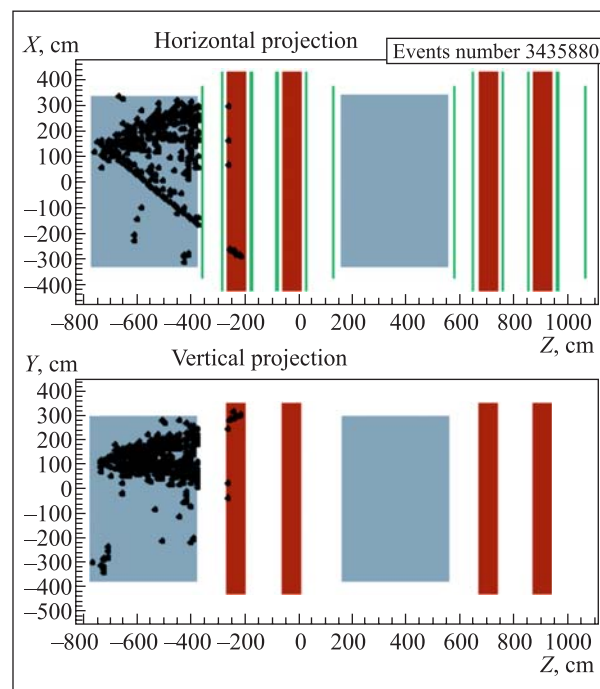


Рис. 4. Первые нейтринные события, зарегистрированные на установке ОПЕРА

Целью проекта **NUCLEON** являются прямые измерения атмосферных ливней в районе энергий  $10^{11} - 10^{15}$  эВ и ядер с зарядом до  $Z \approx 40$  в околосреднем пространстве для решения важных проблем регистрации спектра атмосферных ливней. Закончена разработка и изготовление первого полномасштабного двухстороннего триггерного модуля для триггерной системы **NUCLEON**. Тестирование этой системы велось на предприятии «Радуга» (Дубна). На SPS в ЦЕРНе было проведено тестирование детекторов на пучке. Сейчас идет анализ полученных данных.

## ФИЗИКА НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

Детектор **НЕМО-3**, расположенный в подземной лаборатории Modane (LSM, Франция), создан для поиска двойного безнейтринного  $\beta$ -распада ( $0\nu\beta\beta$ ), который является одним из свидетельств наличия

новой физики за пределами Стандартной модели. Обнаружение и изучение  $0\nu\beta\beta$ -распада — уникальный путь решения фундаментальных проблем определения шкалы абсолютных нейтринных масс, при-

роды нейтрино (или дираковское описание, или майорановское) и иерархии нейтрино. Главная особенность проекта NEMO — чувствительность на уровне (0,2–1,0) эВ к эффективной массе нейтрино ( $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}({}^{100}\text{Mo}) \sim 4 \cdot 10^{24}$  лет). Для проекта SuperNEMO чувствительность оценивается на уровне (0,04–0,1) эВ к эффективной массе нейтрино ( $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}({}^{82}\text{Se}) \sim 2 \cdot 10^{26}$  лет).

Детектор NEMO-3 работает в «безрадоновом» режиме при стабильных условиях с декабря 2005 г. Полное время экспозиции составило 800 дней для

фазы-1 и 572 дня для фазы-2. Был проведен анализ  $2\nu\beta\beta$ -моды двойного  $\beta$ -распада (рис. 5), была изучена возможность существования  $2\nu\beta\beta$ -моды двойного  $\beta$ -распада с излучением майорона для изотопов  ${}^{100}\text{Mo}$  и  ${}^{82}\text{Se}$  (рис. 6).

Были получены новые пределы для двойного  $\beta$ -распада с излучением майорона: для  ${}^{100}\text{Mo}$  ( $T_{1/2} > 2,7 \cdot 10^{22}$  лет) и для  ${}^{82}\text{Se}$  ( $T_{1/2} > 1,5 \cdot 10^{22}$  лет). Соответствующая константа связи майорон-нейтрино составляет  $\langle g_{ee} \rangle < (0,4-1,8) \cdot 10^{-4}$  и  $< (0,66-1,9) \times 10^{-4}$  [17].

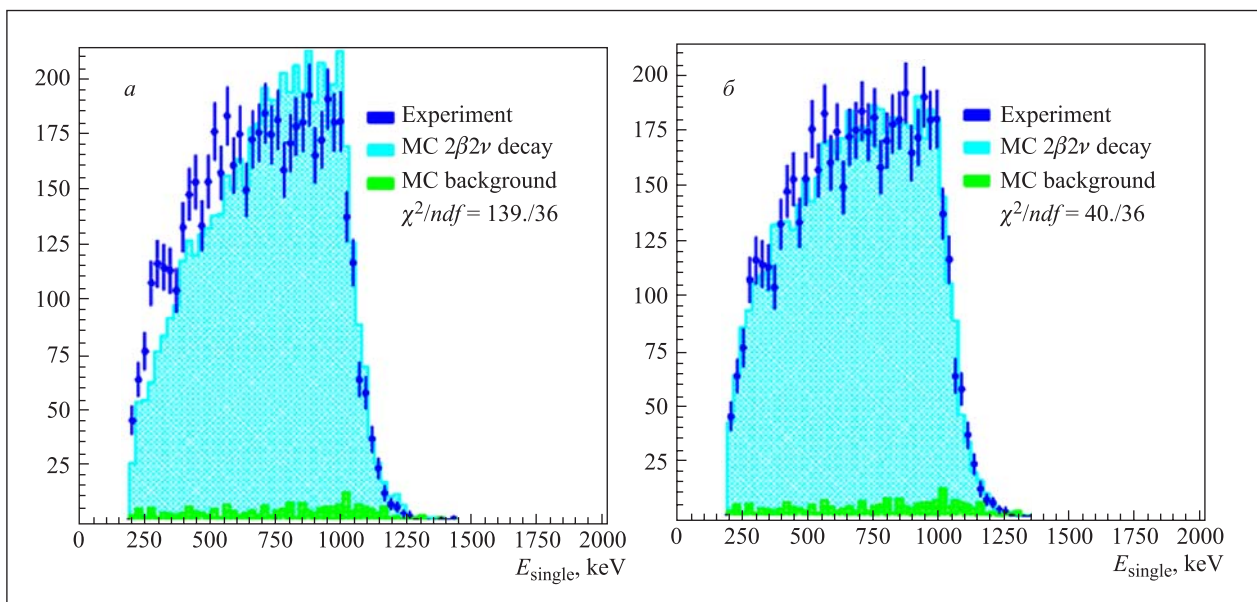


Рис. 5. Спектр суммарной энергии отдельного электрона в  $\beta\beta$ -распаде  ${}^{100}\text{Mo}$  по сравнению с теоретически рассчитанными спектрами, полученными согласно моделям с доминирующими высшими состояниями (а) и с доминирующими единичными состояниями (б). Расчетный сигнал — светлая гистограмма, ожидаемый фон — темная гистограмма. С целью подавления фона были выбраны события с суммарной энергией двух электронов более 2 МэВ (экспозиция 4,57 кг · год)

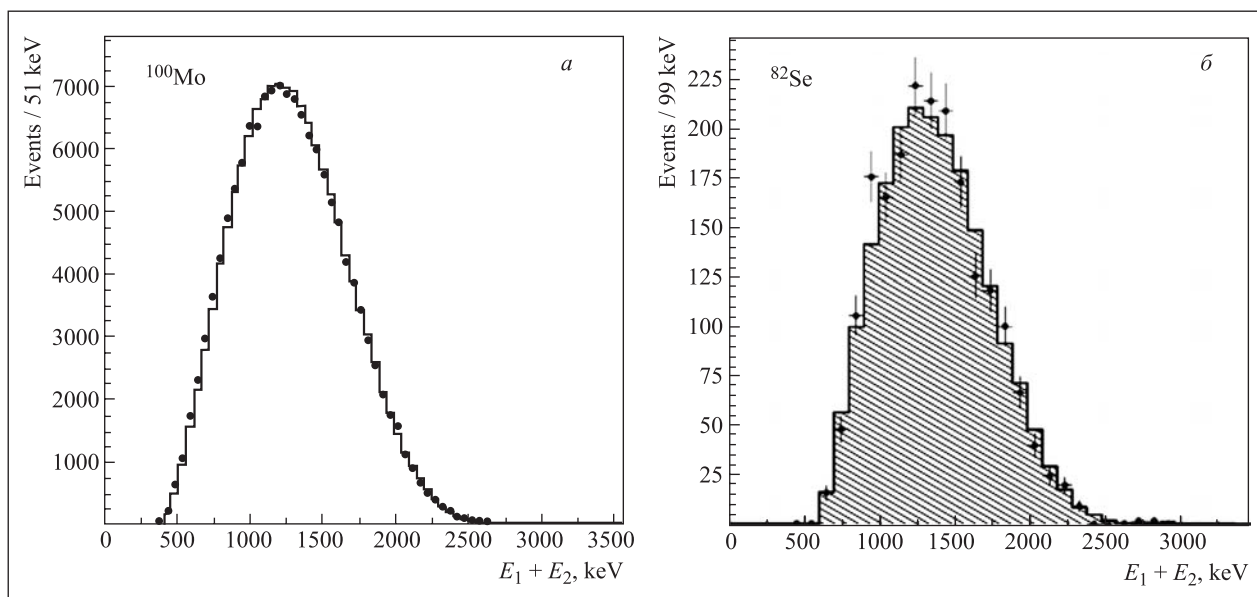


Рис. 6. Экспериментальный суммарный спектр двух электронов в  $\beta\beta$ -распаде  ${}^{100}\text{Mo}$  (а) и  ${}^{82}\text{Se}$  (б), которые были использованы в [17] для поиска распада с излучением майорона

Одинокое рождение пионов в  $pp$ -соударениях является первоочередным процессом для проверки понимания мезон-барионной динамики  $NN$ -взаимодействий. Наиболее подходящей для этого является реакция  $pp \rightarrow d\pi^+$ , которая была объектом интенсивных исследований в течение длительного времени. Однако очень мало известно об изоспиновом партнере этой реакции — процессе  $pp \rightarrow (pp)_s\pi^0$ , где  $(pp)_s$  есть протонная пара в  $^1S_0$ -состоянии. Несмотря на кинематическую близость этот процесс включает переходы в  $NN$ -системе, отличающиеся от переходов в реакции  $pp \rightarrow d\pi^+$ , в частности, роль  $\Delta$ -изобары, доминирующей там, ожидается сильно подавленной из-за запрета  $S$ -волнового  $\Delta N$ -взаимодействия в промежуточном состоянии. Активное изучение процесса началось лишь в последнем десятилетии и ограничивалось областью околороговых энергий.

С целью расширения энергетической области исследований коллаборацией ANKE на ускорителе COSY (Юлих, Германия) принята соответствующая программа экспериментов, первым из которых является измерение дифференциальных сечений процесса  $pp \rightarrow (pp)_s\pi^0$  при энергии 0,8 ГэВ [18]. Несмотря на то что дифференциальное сечение этого процесса более чем на два порядка величины меньше, чем для  $pp \rightarrow d\pi^+$ , процесс хорошо идентифицируется (рис. 7).

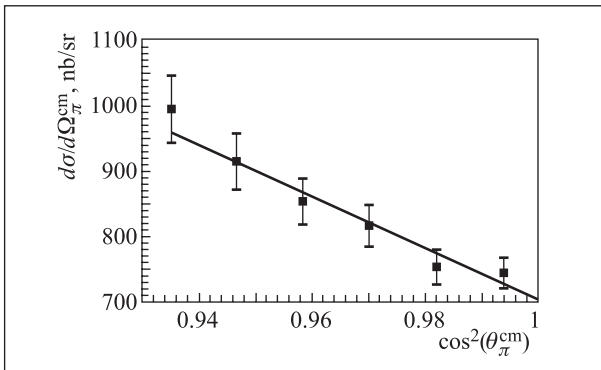


Рис. 7. Реакции, наблюдаемые на плоскости корреляции импульсов в эксперименте ANKE при 0,8 ГэВ

Угловое распределение сечения (рис. 8) обнаруживает провал под углами, близкими к нулю, даже более сильный, чем это наблюдалось при более низких энергиях: 0,310–0,425 ГэВ. Эти результаты могут служить критическим дополнительным тестом для применяемых моделей  $NN$ -соударений при промежуточных энергиях.

Интерес коллаборации LESI к исследованию ядерных реакций между легкими ядрами ( $pd$ ,  $dd$ ,  $d^3\text{He}$ ) в области энергий 2–12 кэВ [19] обусловлен возможностью:

— проверки симметрий в сильных взаимодействиях;

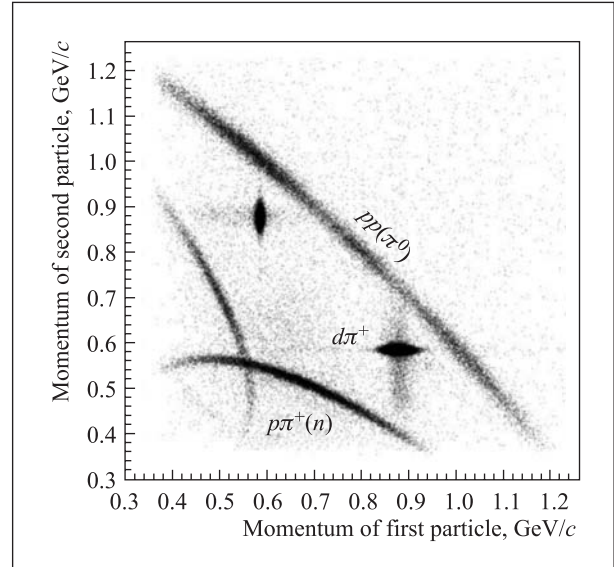


Рис. 8. Угловая зависимость дифференциального сечения  $pp \rightarrow (pp)_s\pi^0$  при относительной энергии в протонной паре  $E_{pp} < 3$  МэВ

— определения вклада во взаимодействие обменных токов;

— проверки Стандартной солнечной модели.

Исследование данных процессов в указанной области энергий проблематично, так как интенсивность пучков ускоренных частиц, производимых классическими ускорителями, недостаточна, а сечения ядерных реакций крайне малы. Применение плазменных ускорителей с формированием лайнерной плазмы в конфигурации прямого и инверсного  $Z$ -пинча позволило получить количественную информацию об астрофизических  $S$ -факторах и эффективных сечениях  $dd$ -реакций (рис. 9). Однако измерение  $S$ -факторов и сечений  $pd$ -,  $dd$ - и  $d^3\text{He}$ -реакций с высокой точностью при использовании плазмы в конфигурации  $Z$ -пинча весьма проблематично из-за отсутствия воспроизводимости экспериментальных условий от «выстрела» (акт срабатывания ускорителя) к «выстрелу», обусловленному спецификой работы такого класса ускорителей, что накладывает определенные ограничения на точность измерений. Это послужило стимулом для разработки альтернативных методов формирования интенсивных пучков заряженных частиц в области ультранизких энергий.

Для проведения дальнейших исследований специалистами коллаборации был разработан и создан импульсный источник ионов с замкнутым холловским током, позволяющий ускорять ионы плазмы  $\text{H}^+$ ,  $\text{D}^+$ ,  $^3\text{He}^+$  в диапазоне энергий столкновения  $E_{\text{coll}} = 2\text{--}12$  кэВ. Предварительные экспериментальные результаты измерений  $S$ -факторов и эффективных сечений  $dd$ -реакции на мишени из дейтерированного полиэтилена ( $\text{CD}_2$ ), полученные на со-

зданном холловском ускорителе Федерального государственного научного учреждения «НИИ ядерной физики» (Томск, Россия), следующие:

$$S(4,7 \text{ кэВ}) = (31,9 \pm 16,9 \text{ (стат.)} \pm 3,2 \text{ (сист.)}) \text{ кэВ} \cdot \text{б},$$

$$\tilde{\sigma}_{dd}(4,3 < E_{\text{coll}} < 5,1 \text{ кэВ}) = (3,2 \pm 1,7 \text{ (стат.)} \pm 0,3 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{-31} \text{ см}^2,$$

$$S(5,1 \text{ кэВ}) = (38,9 \pm 11,7 \text{ (стат.)} \pm 3,1 \text{ (сист.)}) \text{ кэВ} \cdot \text{б},$$

$$\tilde{\sigma}_{dd}(4,7 < E_{\text{coll}} < 5,5 \text{ кэВ}) = 6,6 \pm 2,0 \text{ (стат.)} \pm 0,5 \text{ (сист.)} \cdot 10^{-31} \text{ см}^2.$$

Наблюдаемые величины  $S$ -фактора и эффективные сечения  $\tilde{\sigma}_{dd}$   $dd$ -реакции согласуются с результатами, полученными ранее в экспериментах на ускорителях лайнерной плазмы (для обеих конфигураций: прямого и инверсного  $Z$ -пинча). Как можно видеть из рис. 9, наблюдается разница между результатами  $dd$ -экспериментов, выполненных на  $\text{CD}_2$ - и  $\text{TaD}$  (TiD)-мишенях, которая должна быть прояснена. Предварительные результаты подтверждают факт того, что разработанная методика с использованием холловского ускорителя может быть эффективной при исследовании ядерных реакций между легкими ядрами в области ультранизких энергий.

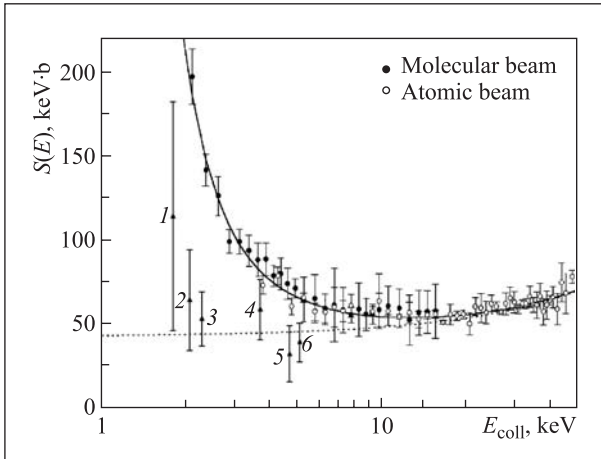


Рис. 9. Астрофизические  $S$ -факторы для  $dd$ -реакции как функция энергии столкновения дейтронов. Темные кружки, треугольники и квадраты — данные из других публикаций с использованием  $\text{TaD}$ -мишеней ( $\text{CD}_2$ -мишеней). Точки 1–4 — результаты, полученные на ускорителе с лайнерной плазмой, 5–6 (мишень  $\text{CD}_2$ ) — с использованием холловского ускорителя

**DUBTO** — совместный проект ОИЯИ и INFN по изучению пион-ядерных взаимодействий при энергиях ниже  $\Delta$ -резонанса с использованием самошунтирующейся стримерной камеры, разработанной в

Объединенном институте, и ядерной фотоэмульсионной техники. Стримерная камера наполнена смесью газов (в основном  $^4\text{He}$ ) при атмосферном давлении  $\rho(^4\text{He}) = 0,000178 \text{ г/см}^{-3}$ .

Главные физические результаты, полученные коллаборацией, состоят в первом наблюдении явления тормозного излучения положительных пионов на ядрах гелия:  $\pi^{\pm} ^4\text{He} \rightarrow \pi^{\pm} ^4\text{He}\gamma$  (рис. 10), измерении распределения инвариантной массы  $M_{\pi^{\pm}mn}$  и  $M_{\pi^-mn}$  в реакции распада  $\pi^{\pm} ^4\text{He} \rightarrow \pi^{\pm} ppnn$ , наблюдении резонансного поведения в реакции двойного заряженного обмена  $\pi^+$ -мезонов в ядерной фотоэмульсии [20]. Было выполнено определение верхнего предела массы мюонного нейтрино  $m_{\nu} < 2,2 \text{ МэВ}$  [21]. В настоящий момент получено 25000 событий  $\pi^{\pm} ^4\text{He}$ -взаимодействий.

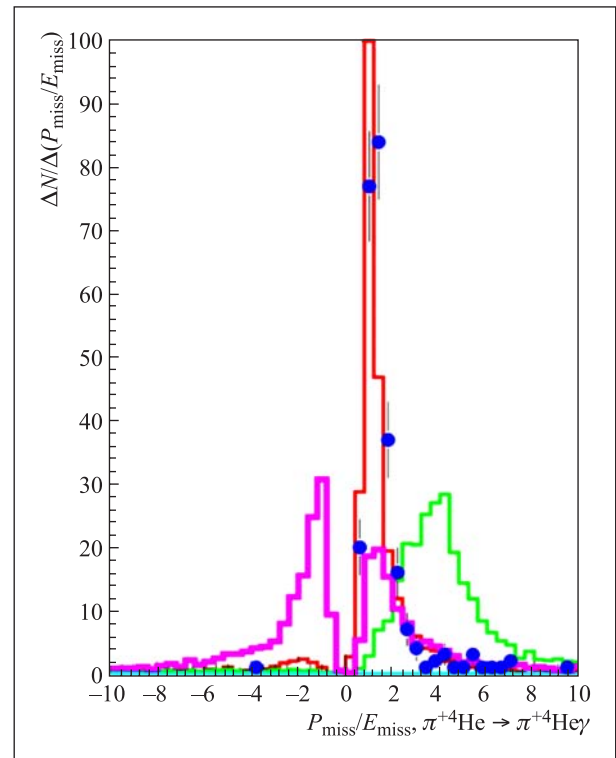


Рис. 10. Распределение отношения между потерянным моментом и потерянной энергией для событий  $\pi^{\pm} ^4\text{He} \rightarrow \pi^{\pm} ^4\text{He}\gamma$  (точки), смоделированная фазовая гистограмма соответствует упругому рассеянию (два похожих симметричных пика), излучению фотона (высокий пик) и нейтронному окну  $\pi^{\pm} ^4\text{He} \rightarrow \pi^{\pm} n^3\text{He}$

В 2006 г. коллаборацией **PIBETA** закончен анализ экспериментальных данных по радиационному распаду пиона (РРП), полученных в 2004 г. в специальном эксперименте. Необходимость этого эксперимента возникла в связи с тем, что при обработке данных эксперимента PIBETA за 1999–2000 гг. был обнаружен дефицит экспериментальных событий РРП в кинематической области, определяемой углами разлета между  $\gamma$ -квантом и позитроном  $\theta_{\gamma,e} > 40^\circ$ ,

энергиями  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma > 55,6$  МэВ и энергиями позитронов  $E_e > 20$  МэВ (область В). Такой дефицит экспериментальных событий нельзя было описать в рамках Стандартной модели (СМ).

Данные нового эксперимента были получены на пучке пионов PSI при интенсивности остановок 50–100 кГц. Такая интенсивность обеспечила уменьшение фона случайных совпадений на порядок по сравнению с экспериментом PIBETA в 1999–2001 гг. Обработка и анализ данных проводились независимо двумя группами физиков (Вирджиния (США) и Дубна (ОИЯИ)). Необходимость независимой обработки новых экспериментальных данных была вызвана требованием провести более надежный анализ полученных результатов, решить проблему наблюдаемого отклонения от расчетов, сделанных на основе СМ. Ранее такая сложная и трудоемкая работа в Дубне не проводилась.

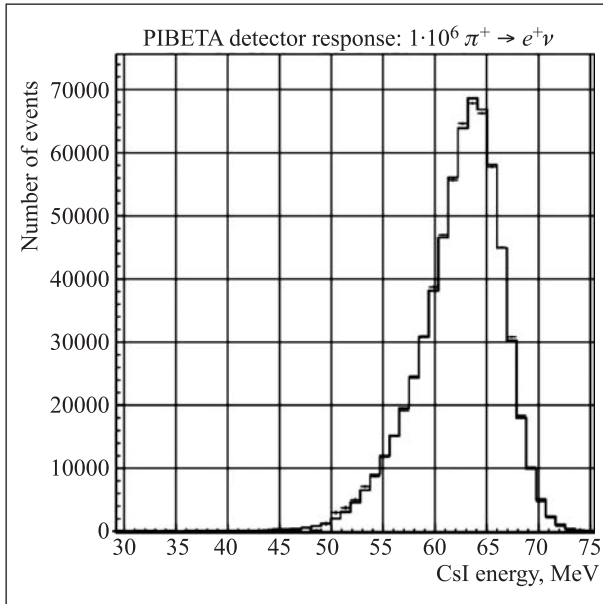


Рис. 11. Спектр позитронов от распада  $\pi^+ \rightarrow e^+\nu$ . Сплошная кривая — расчет по методу Монте-Карло

За 2006 г. была проведена обработка и анализ всей экспериментальной статистики по РРП, соответствующей  $\sim 6,12 \cdot 10^{11}$  остановок пионов. Изучены процессы  $\pi^+ \rightarrow e^+\nu$  и  $\mu^+ \rightarrow e^+\nu\nu$ , являющиеся калибровочными для распада  $\pi^+ \rightarrow e^+\nu\gamma$ . Проанализировано  $\sim 240000$  распадов  $\pi^+ \rightarrow e^+\nu$ . Энергетический спектр позитронов для этого распада приведен на рис. 11. На рис. 12 представлен энергетический спектр позитронов для распада  $\mu^+ \rightarrow e^+\nu\bar{\nu}$ . Из данных рисунков видно, что в изучаемой области энергий измеренные спектры хорошо совпадают с расчетными. По результатам этих исследований готовятся публикации.

Группой из ЛЯП было найдено 17085 РРП, из них 7261 событие в кинематической области В, где

ранее наблюдался дефицит экспериментальных событий. На рис. 13 приведено распределение в этой области событий  $\pi^+ \rightarrow e^+\nu\gamma$  по параметру  $\lambda = (2E_e/m_\pi) \cdot \sin^2(\theta_{\gamma,e}/2)$ . Полученная относительная вероятность распада  $\pi^+ \rightarrow e^+\nu\gamma$  в области В составила  $(14,59 \pm 0,26) \cdot 10^{-8}$ . Соответствующая теоретическая оценка в рамках Стандартной модели составляет  $(14,490 \pm 0,005) \cdot 10^{-8}$ . Результаты минимизации экспериментальных данных по РРП и сравнение их с расчетами приводят к выводу, что полученные данные в пределах точности эксперимента полностью описываются в рамках Стандартной модели.

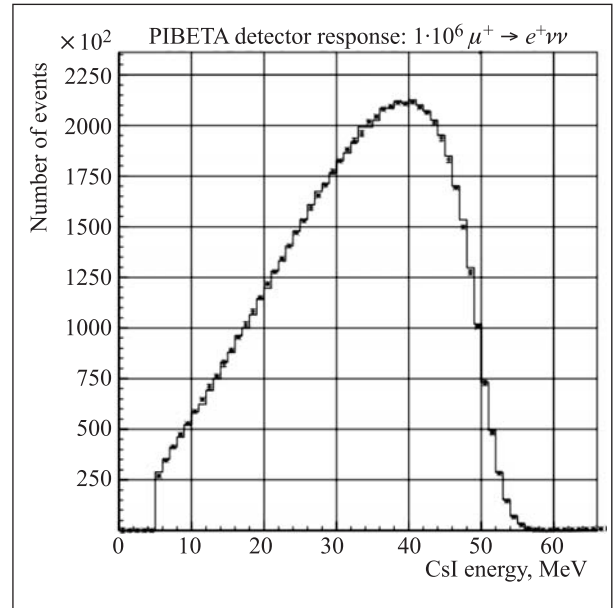


Рис. 12. Спектр позитронов от распада  $\mu^+ \rightarrow e^+\nu\bar{\nu}$ . Сплошная кривая — расчет по методу Монте-Карло

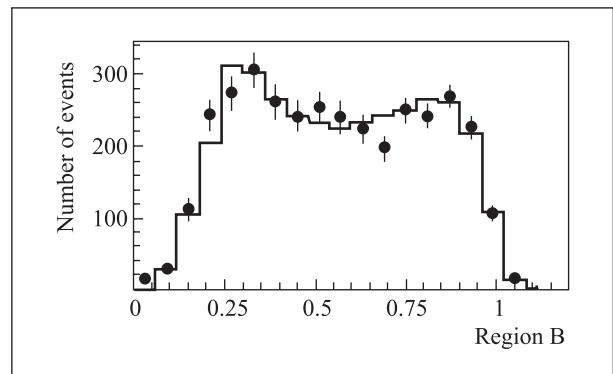


Рис. 13. Распределение событий  $\pi^+ \rightarrow e^+\nu\gamma$  по кинематической переменной  $\lambda = (2E_e/m_\pi) \cdot \sin^2(\theta_{\gamma,e}/2)$ , где  $E_e$  — энергия позитрона;  $E_\gamma$  — энергия  $\gamma$ -кванта;  $\theta_{\gamma,e}$  — угол разлета позитрона и  $\gamma$ -кванта;  $m_\pi$  — масса пиона. Сплошная кривая — расчет по методу Монте-Карло



## РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Существование спинопальной области для горячей ядерной материи было предсказано более 30 лет назад. При попадании в эту область ядерная жесткость становится равной нулю:  $\partial p/\partial V = 0$ . Экспериментальная информация о спинопальном состоянии ядерной материи продвинулась вперед при изучении процесса ядерной мультифрагментации. Коллаборация **ФАЗА** сделала заметный вклад в исследования, проводимые в этой области [22].

Спинопальный распад в ядерной системе связывается больше с фазовым переходом жидкость–туман, чем с переходом жидкость–газ. Этот сценарий подтверждается следующими наблюдениями, сделанными рядом коллабораций (в том числе и на установке **ФАЗА**).

- Плотность системы в момент развала в 2–3 раза меньше нормальной  $\rho$  [23].
- Время жизни фрагментирующей системы очень

мало,  $\sim 2 \cdot 10^{-22}$  с (или  $\approx 70$  фм/с). Впервые это время было измерено в Дубне (1994 г.) [24] путем анализа угловых корреляций фрагментов промежуточной массы (ФПМ).

- Температура в момент развала  $T = 4–6$  МэВ меньше критической температуры фазового перехода жидкость–газ, величина которой  $T_c = (17 \pm 2)$  МэВ найдена коллаборацией **ФАЗА**.

Величина критической температуры имеет решающее значение для утверждения о наблюдении спинопального состояния ядерной материи. Поэтому в прошлом году был сделан более тщательный анализ данных для получения более надежного значения критической температуры и объема системы в момент развала (рис. 14) [25]. Получены следующие значения этих величин:  $T_c \geq 18$  МэВ,  $V_t/V_0 = 3$  (или  $\rho_t = 1/3\rho_0$ ).

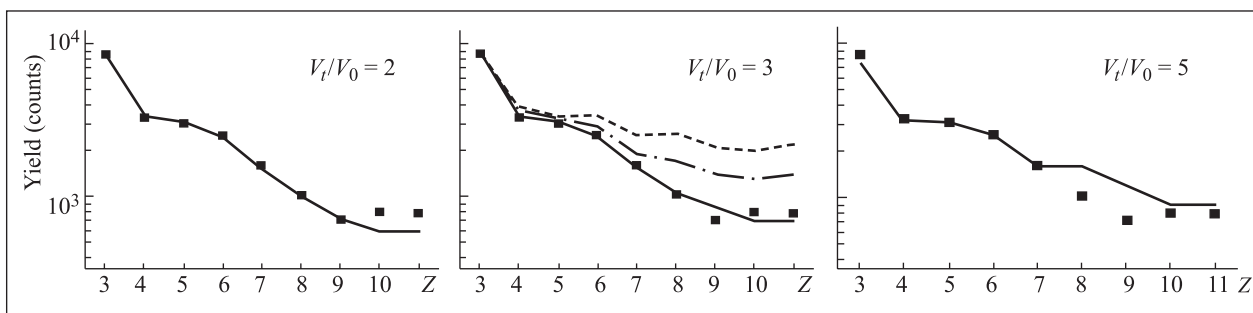


Рис. 14. Зарядовое распределение ФПМ для взаимодействия  $p(8,1 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$ . Символы — экспериментальные значения. Сплошная линия — расчет зарядовых распределений ФПМ, выполненный при  $T_c = 18$  МэВ. Пунктирная и штрих-пунктирная линии — расчет при  $T_c$ , равной 7 и 11 МэВ соответственно. На рисунке показан объем системы в момент развала

В 2006 г. закончена модернизация установки, которая заключалась в добавлении 25-ти компактно расположенных телескопов  $dE(\text{газ}) \times E(\text{Si})$ . Эти детекторы мы называем польским модулем, поскольку он был изготовлен в Кракове в Институте им. Х. Неводничанского. Новый детекторный модуль позволяет измерять корреляции ФПМ по относительному углу и относительной скорости с селекцией каждого из фрагментов по заряду и энергии. Модернизированный вариант установки называется **ФАЗА-3**.

## НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено моделирование динамики пучка  ${}^3\text{He}^{2+}$  в фазотроне ЛЯП при использовании разных частотных программ. Результаты расчетов показали, что ни один ион, независимо от вида частотной программы, не смог преодолеть критическую энергию. Чтобы пройти критическую энергию, необходимо рассма-

Дальнейшие экспериментальные исследования направлены на получение большей информации о свойствах спинопального состояния ядерной материи.

Важным аргументом в пользу спинопального развала является то, что температура в момент развала меньше критической температуры  $T_c$  для фазового перехода жидкость–газ. Значение  $T_c$ , полученное коллаборацией **ФАЗА**, свидетельствует в пользу спинопального развала.

Принимать специальные меры по изменению параметров ускоряющего поля в момент достижения ионами критической энергии.

В рамках темы «**Физика и техника ускорителей заряженных частиц**» проведены испытания криогенного источника медленных монохроматических

позитронов (КРИП) для накопителя низкоэнергичных позитронов ЛЕПТА. Эксперименты по измерению характеристик потока медленных позитронов источника КРИП проводились с тестовым радиоактивным изотопом  $^{22}\text{Na}$  с активностью 0,8 МБк. Получен пучок медленных позитронов с интенсивностью  $5,8 \cdot 10^3$  част./с со средней энергией 1,2 эВ при ширине спектра 1 эВ (рис. 15). Эффективность замедления составила порядка 1%, что находится на уровне лучших мировых достижений. В ходе экспериментов для данного типа источников впервые была измерена зависимость выхода медленных позитронов и спектры медленных позитронов, измерена зависимость ширины спектра позитронов от толщины замороженного слоя замедлителя, определено оптимальное значение толщины.

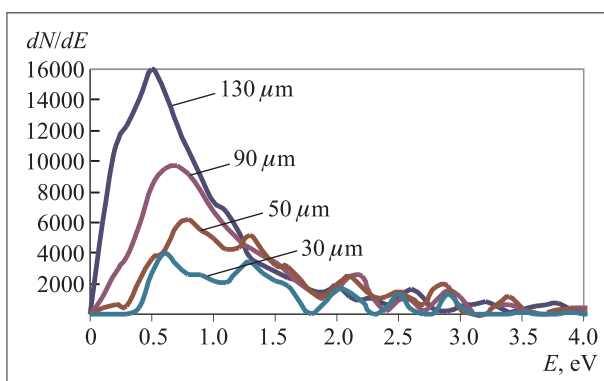


Рис. 15. Спектры позитронов при различной толщине замороженного неоновой замедлителя, полученные с помощью электростатического анализатора

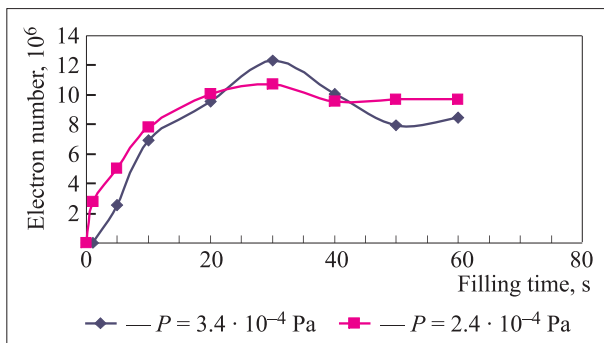


Рис. 16. Зависимость числа накопленных электронов в ловушке от времени накопления

Собрана и испытана позитронная ловушка, и проведено ее тестирование электронами с помощью специально изготовленной электронной пушки. Пушка позволяет генерировать электронный пучок с энергией от 10 до 50 эВ, с током до нескольких сотен фемтоампер и разбросом по энергии 3 эВ. Была получена и измерена интенсивность электронного пучка на уровне  $10^{-13}$  А. Проведены испытания по накоплению электронов в ловушке. Максималь-

ное количество электронов, накопленных в ловушке,  $N_{\text{max}} = 1,7 \cdot 10^8$  частиц, что соответствует пределу по пространственному заряду для этого типа ловушек (рис. 16). Достигнуто время жизни накопленных электронов около 30 с.

Основной целью исследований по теме «Развитие методов и средств лучевой терапии и сопутствующей диагностики на адронных пучках ОИЯИ» является проведение на базе медикотехнического комплекса (МТК) ЛЯП 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 отсутствие терапевтического протонного пучка из-за произошедшего в апреле 2005 г. пожара радиотерапия онкологических пациентов проводилась на  $\gamma$ -аппарате «Рокус-М». За отчетный период было проведено 49 фракционированных курсов облучения (около 2000 лучевых сеансов). Параллельно проводились работы по восстановлению оборудования, пострадавшего при пожаре. К настоящему времени тракт транспортировки терапевтического протонного пучка к процедурным кабинетам полностью подготовлен к работе. Проведена обработка результатов измерений по радиозащитному действию лазерного излучения с длиной волны 633 нм на выживаемость клеток мышинных фибробластов СЗН10Т1/2, подвергшихся воздействию  $\gamma$ -излучения или протонов с энергией 150 МэВ. Оказалось, что как предварительное, так и последующее лазерное облучение фибробластов приводит к увеличению выживаемости клеток, поврежденных ионизирующими излучениями (значения фактора изменения дозы в пределах от 1,3 до 2,2). Одновременное облучение клеток СЗН10Т1/2 лазерным излучением и протонами также приводило к увеличению их выживаемости. Эксперименты показали, что радиозащитное действие оптического излучения с длиной волны 633 нм может передаваться клеткам фибробластов также по механизму «bystander»-эффекта. Полученные результаты показывают, что излучение с длиной волны 633 нм можно использовать в процессе лучевой терапии или хирургии онкологических заболеваний для радиозащиты какой-либо области тела, в частности, кожного покрова или слизистых оболочек носовой или ротовой полости. Продолжены экспериментальные работы по изучению особенностей генетического действия ионизирующих излучений разного качества (фотоны и нейтроны) на уровне ДНК отдельных экзонов и интронов гена модельного объекта дрозофилы. Получены новые данные, подтверждающие наличие «горячих» точек радиационного мутагенеза внутри гена с одинаковой локализацией для обоих видов излучения [26].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bardin D. et al.* SANCnews: Sector fbb // Comput. Phys. Commun (to be published); hep-ph/0506120.
2. *Kalinovskaya L.* Processes of Higgs Production and Decay in SANC. Talk at ATLAS Higgs Working Group, at CERN, April 20, 2006 (URL: <http://agenda.cern.ch/fullAgenda.php?ida=a058301>).
3. *Arbuzov A. et al.* One-loop Corrections to the Drell–Yan Processes in SANC (I). The Charged Current Case // EPJC. 2006. V. 46. P. 407.
4. *Bardin D.* SANC for Higher Calculation: Application to LHC. Talk at ATLAS Week at CERN, February 24, 2006 (URL: <http://agenda.cern.ch/age?a056827>).
5. *Kulchitsky Y., Tsiareshka P., Vinogradov V.* Electron Energy Resolution of the ATLAS TileCal Modules with Fit Filter Method (July 2002 test beam). ATL-TILECAL-PUB-2006-004; ATL-COM-TILECAL-2006-003. CERN. 2006. 48 p.
6. *Budagov J.A. et al.* Study of the Transition Effect with the ATLAS Tile Calorimeter. ATL-TILECAL-PUB-2006-005; ATL-COM-TILECAL-2006-007, CERN-ATL-COM-TILECAL-2006-007. Geneva: CERN, 2006. 16 p.
7. *Budagov J. et al.* Study of TileCal Sampling Fraction for Improvement of Monte-Carlo Data Reconstruction. ATL-TILECAL-PUB-2006-006, ATL-COM-TILECAL-2006-008, CERN-ATL-COM-TILECAL-2006-008. Geneva: CERN, 2006. 32 p.
8. *Kulchitsky Y., Tokar S., Vinogradov V.* Study of the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter Non-compensation Sensitivity. ATL-TILECAL-PUB-2006-002, ATL-COM-TILECAL-2006-004. Geneva: CERN, 2006. 9 p.
9. *Arbuzov A. et al.* Tuned Comparison of Electroweak Corrections to Drell–Yan-like  $W^-$ - and  $Z$ -production — a Status Report. arXiv:hep-ph/0604120.
10. *Andonov A. et al.* QCD Branch in SANC. arXiv:hep-ph/0610268.
11. *Sadykov R. et al.* On the Electroweak Corrections to  $t \rightarrow bl^+\nu$  // Proc. of Intern. Workshop of Top Quark Physics, PoS(TOP2006)036.
12. *Abulencia A. et al.* Measurement of the Top Quark Mass Using the Template Method in the Lepton Plus Jets Channel. CDF Note: CDF/ANAL/TOP/PUBLIC/8125.
13. *Tokar S. et al.* Finding the Charge of the Top Quark in the Dilepton Channel // Proc. of Symp. on Hadron Collider Physics 2006 (HCP-2006), Durham, North Carolina, May 22–26, 2006. CDF Note: CDF/PUB/TOP/PUBLIC/8367.
14. *Ahn J.K. et al.* New Limit on the  $K_L^0 \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  Decay Rate // Phys. Rev. D. 2006. V. 74. P. 051105.
15. *Acquafredda R. et al.* First Events from CNGS Neutrino Beam Detected in OPERA Experiment // New J. Phys. 2006. V. 8. P. 303.
16. *Dmitrievsky S. et al.* Neural Network, Cellular Automata, and Robust Approach Applications for Vertex Localization in the OPERA Target Tracker Detector. JINR Preprint E10-2005-216. Dubna, 2005; submitted to «Neuroinformatics».
17. *Arnold R. et al.* Measurement of Double Beta Decay of  $^{100}\text{Mo}$  to Excited States in the NEMO-3 Experiment // Nucl. Phys. A. 2006. V. 765. P. 483.
18. *Dymov S. et al.* // Phys. Lett. B. 2006. V. 635. P. 270.
19. *Bystritsky V.M. et al.* Neutron Emission at the Collision of Plasma Opposing Fluxes in the External Magnetic Field // Plasma Physics. 2005. V. 31. P. 1114–1122.
20. *Batusov Yu.A. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2006. V. 28. P. 11.
21. *Angelov N. et al.* // Nucl. Phys. A. 2006. V. 780. P. 78.
22. *Karnaikhov V.A.* // Part. Nucl. 2006. V. 37, No. 2. P. 165–193.
23. *Karnaikhov V.A. et al.* // Phys. At. Nucl. 2006. V. 69, No. 7. P. 1142–1149.
24. *Avdeyev S.A. et al.* ArXiv:nucl-ex/0603001, 2006.
25. *Karnaikhov V.A. et al.* // Nucl. Phys. A. 2006. V. 780. P. 91–99.
26. *Будяшов Ю.Г. и др.* Система контроля параметров протонного пучка при радиотерапии // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 1(130). С. 101–110.