

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ им. В. П. ДЖЕЛЕПОВА

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В рамках проекта CDF главными результатами 2007 г. было прецизионное измерение массы топ-кварка и обеспечение эффективной работы установки CDF. Группа из ОИЯИ внесла существенный вклад в определение массы топ-кварка. В дилептонной топологии распада пары топ–анти топ на статистике $2,1 \text{ фб}^{-1}$ получена $M_{\text{top}} = 167,7 \pm 4,2 \text{ (стат.)} \pm 3,1 \text{ (сист.) ГэВ}/c^2$ [1]. При этом для увеличения числа выбранных событий был использован так называемый отбор лептон + трек.

В этой же топологии распада было проведено измерение массы топ-кварка с использованием информации о величине поперечного импульса [2]. Предварительный результат, соответствующий накопленной светимости в $1,8 \text{ фб}^{-1}$, составляет $M_{\text{top}} = 156 \pm 20 \text{ (стат.)} \pm 4,6 \text{ (сист.) ГэВ}/c^2$.

В рамках проекта D0 физики Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и университетов Мичигана и Оклахомы (США) выполнили первое прямое наблюдение заряженного «прелестного» бариона Ξ_b , частицы, содержащей кварки из всех трех поколений d , s и b [3]. Анализировалось 35 млн соударений протонов с антипротонами при энергии в с. п. м. 1,96 ТэВ, содержащих в конечном состоянии мюонные пары в области масс 2,5–3,6 $\text{ГэВ}/c^2$. В этих событиях реконструировались J/ψ -частицы и заряженные Ξ -гипероны и антигипероны, вылетающие из общей вершины, не совпадающей с вершиной первичного взаимодействия. В итоге после применения дополнительных критериев, понижающих уровень фоновых комбинаций вторичных частиц, осталось 51 событие с эффективной массой системы ($J/\psi\Xi$) в интервале 5,2–7,0 $\text{ГэВ}/c^2$. Их распределение по массе ($J/\psi\Xi$)

имеет пик из 19 событий в районе 5774 $\text{МэВ}/c^2$ с шириной 37 $\text{МэВ}/c^2$. Вероятность появления пика из-за флуктуации фона (3,6 события) не превышает $3,3 \cdot 10^{-8}$. Все контрольные наборы событий не имеют особенностей в этом интервале масс ($J/\psi\Xi$) (рис. 1). Данный пик интерпретируется как распад $\Xi_b \rightarrow J/\psi + \Xi$. Измеренная масса Ξ_b согласуется с предсказаниями теории.

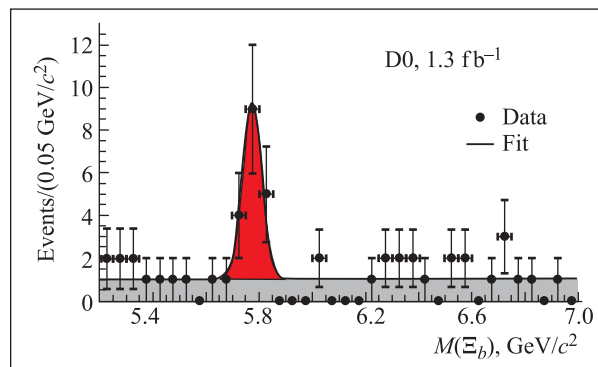


Рис. 1. Пик, соответствующий распаду $\Xi_b \rightarrow J/\psi + \Xi$

В течение 2007 г. было завершено подключение к рабочим коммуникациям ATLAS 84 мюонных камер типа BMS/BMF, установленных в течение 2005–2006 гг. Все камеры успешно прошли предварительную проверку, они участвуют в тестировании детектора космическими мюонами. В 2007 г. были проведены исследования по определению возможности прецизионных измерений на установке ATLAS процессов типа процессов Дрелла–Яна для высоко-

точного измерения дифференциальных сечений этих процессов, а также возможности калибровки мюонного спектрометра ATLAS при помощи распадов $Z \rightarrow \mu\mu$. В результате была разработана процедура отбора событий, обеспечивающая выделение сигнала с высокой эффективностью (90 %) при низком уровне фона (2 %). Огромная статистика (порядка 10 миллионов в год) позволяет использовать этот канал для «мониторинга светимости» с точностью 1 % за сутки (24 ч) набора статистики.

Неопределенности структурных функций протона являются основным источником погрешности в теоретических предсказаниях для всех процессов ЛНС. Один из способов уточнения этой величины — прецизионное измерение дважды дифференциального сечения $pp \rightarrow Z \rightarrow \mu\mu$ (по P_T и η). В отделе встречных пучков ЛЯП была разработана процедура, позволяющая определять дифференциальное сечение указанного процесса с высокой (2–3) % точностью. Определение реальной эффективности мюонного спектрометра — важная задача, без решения которой невозможно проведение прецизионных измерений. Был предложен метод, в рамках которого один из мюонов, рожденных в реакции $pp \rightarrow Z \rightarrow \mu\mu$, используется как «меченый», что позволяет определять эффективность установки по вероятности реконструкции второго мюона. Основная сложность метода — низкая эффективность отбора событий $Z \rightarrow \mu\mu$ с использованием информации только об одном мюоне. В результате выполненной работы была предложена специальная процедура, позволяющая производить отбор указанных событий с низким уровнем фона ($\sim 3,8$ %). Показано, что с помощью данного метода возможно определение эффективности спектрометра с точностью лучше 1 %.

С целью проверки шкалы электромагнитных энергий и для понимания отклика калориметра 11 % модулей установки ATLAS TileCal были облучены электронными пучками с различной энергией под углами 90 и 20° [4]. Были определены средние значения калибровочных констант, которые составляют $(1,154 \pm 0,002)$ пК/ГэВ и $(1,192 \pm 0,002)$ пК/ГэВ при углах облучения 90 и 20° при использовании метода плоского фильтра и $(1,040 \pm 0,002)$ пК/ГэВ и $(1,068 \pm 0,003)$ пК/ГэВ при использовании метода подгоночного фильтра. Полученные значения констант в пределах ошибок находятся в хорошем согласии со средними взвешенными калибровочными константами для отдельных модулей. Глобальные калибровочные константы, которые должны использоваться для электромагнитной калибровки адронного тайл-калориметра, равны 1,15 пК/ГэВ при использовании метода плоского фильтра и 1,04 пК/ГэВ при использовании метода подгоночного фильтра.

Исследование влияния выбранных критериев при псевдобыстрогах $\eta = 0,35$ и $0,45$ и энергиях падаю-

щего пучка от 10 до 180 ГэВ показало, что данные критерии имеют заметное, хотя и не ключевое, влияние на значение отношения e/h [5]. В то же время можно установить, что сдвиг e/h -отношения из-за выбранных обрезаний имеет отрицательный знак, т.е. события с энергией выше энергии π^0 -мезона предпочтительнее. Эффект возрастает с ростом энергии падающего пучка, средний сдвиг e/h для всех значений энергии и обрезаний составляет 1,5 %.

В течение 2007 г. группой из ОИЯИ была детально разработана физическая программа эксперимента BES-III, в рамках которой была показана возможность изучения лоренц-структуры лептонных распадов тау-лептона, включая измерения параметров Мишеля и поиск аномальной тензорной связи. Оценки на основе расчетов по методу Монте-Карло показывают, что параметры Мишеля можно улучшить в 2–4 раза, а предел на константу аномальной связи — более чем в 10 раз. Данные разработки включены в физическую программу эксперимента BES-III.

На BES-III могут быть проведены измерения функций КХД-фрагментации. Благодаря очень хорошей идентификации частиц можно отдельно измерить функцию КХД-фрагментации для пионов, каонов и протонов в новой области Q^2 . На BES-III также возможно измерение азимутальной корреляции двух адронов в противоположных полусферах. Некомпланарность двух адронов может дать ключ к функциям фрагментации Коллинза, которые связаны с поперечной корреляцией спина системы кварк-антикварк в процессе $ee \rightarrow q\bar{q} \rightarrow hhX$. Подобное исследование на основе статистики в 30 фб^{-1} было проведено коллаборацией Belle, причем был выявлен явный ненулевой эффект.

На BES-III 2-фотонные события с адронным конечным состоянием будут фоновыми для других процессов. Однако эти реакции могут представлять интерес, так как экспериментальные знания об адронном рождении двух фотонов довольно скупы. В физическую программу BES-III включено предложение по 2-фотонной физике. Группа из ОИЯИ также вовлечена в разработку программ для физического анализа и программного обеспечения.

В настоящее время проект SANC включает в себя теоретические предсказания практически для всех 3-частичных и для многих 4-частичных процессов в рамках Стандартной модели на однопетлевом уровне точности. Программа доступна на серверах в ЦЕРН <http://pcphsanc.cern.ch/> (137.138.180.42) и в Дубне <http://sanc.jinr.ru/> (159.93.75.10). Для проекта ATLAS продолжают дальнейшие прецизионные расчеты процессов типа процессов Дрелла-Яна [6]. Завершаются прецизионные расчеты вероятностей полуплептонных распадов топ-кварка [7]. Продолжаются расчеты фермион-бозонных процессов на партоном уровне. Результаты представляют интерес для e^+e^- - и γe -физики на линейных коллайдерах, в

частности, для ILC эта работа находится в стадии завершения [8].

Целью эксперимента **DIRAC** является измерение времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома для проверки предсказаний КХД при малых энергиях. В 2007 г. группой из ОИЯИ была проведена окончательная настройка установки после ее модернизации, также был проведен сеанс по набору данных на платиновой мишени для наблюдения π^+K^- - и π^-K^+ -атомов и измерения времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома. Была проведена обработка и анализ данных, полученных в 2001–2003 гг., для получения времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома с систематической и теоретической ошибкой на уровне 10%. В установку **DIRAC** была включена система микродрейфовых камер. В условиях реальных рабочих нагрузок выполнено сканирование по порогам и высокому напряжению для определения рабочего диапазона и точности детектора.

Космический эксперимент **TUS** нацелен на измерения энергетического спектра, состава и углового распределения космических лучей сверхвысоких энергий при $E \approx 10^{19}–10^{20}$ эВ. Флуорес-

центный детектор будет запущен в 2010 г. как отдельная платформа «Фотон-4». Изготовлен технологический прототип некоторых компонент детектора [9]. Разработан новый дизайн зеркала-концентратора, состоящий из 6 зеркал Френеля и одного центрального параболического зеркала. Площадь зеркала — 2 м², фокусное расстояние — 1,5 м. Разрабатывается новый стальной шаблон. Для будущего анализа ECLIPSE-данных разработано новое программное обеспечение для зеркала и шаблона.

Целью проекта **NUCLEON** являются прямые измерения атмосферных ливней в околоземном пространстве при энергии $10^{11}–10^{15}$ эВ в районе зарядов ядер до $Z \approx 40$. Особенно интересен поиск сигнала рождения тяжелых частиц с массой около 0,5 ТэВ, а также легких и стабильных WIMP-частиц темной материи. Запуск запланирован на 2009 г. Закончена разработка и изготовление триггерного модуля для триггерной системы **NUCLEON**. На SPS в ЦЕРН было проведено тестирование детекторов на пионном пучке при энергии 300 ГэВ [10].

ФИЗИКА НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

Спектрометр **GEMMA** состоит из 1,5-килограммового HPGe-детектора, окруженного пассивной и активной защитой и расположенного под трехгигаваттным реактором №2 Калининской АЭС на расстоянии 13,9 м от центра его активной зоны. Нейтринный поток $2,73 \cdot 10^{13}$ см⁻²·с⁻¹ рассеивается на электронах кристалла германия, и энергия их отдачи регистрируется. Сравнивая низкоэнергетическую часть спектра, измеренного при включенном и заглушенном реакторе, можно выделить вклад от электромагнитного взаимодействия и тем самым оценить величину магнитного момента нейтрино. Для подавления физического и аппаратного фона использовались различные методы, в результате реальный порог регистрации был снижен до 3 кэВ (рис. 2). Анализ данных 2005–2006 гг., полученных за 6200 ч в режиме он-лайн и 2064 ч в режиме офф-лайн, позволил получить лучшее в мире ограничение на магнитный момент нейтрино: $\mu_\nu \leq 5,8 \cdot 10^{-11}$ в единицах магнетона Бора с 90-процентной вероятностью [11]. В настоящее время набор данных продолжается.

Детектор **NEMO-3**, расположенный в подземной лаборатории Modane (LSM, Франция), создан для поиска двойного безнейтринного бета-распада ($0\nu\beta\beta$), который является одним из свидетельств наличия новой физики за пределами Стандартной модели.

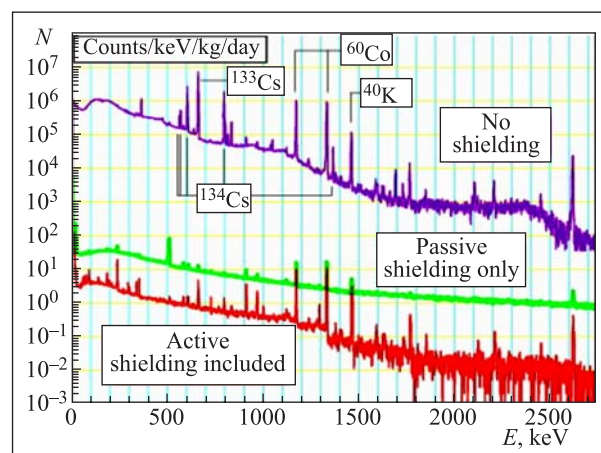


Рис. 2. Полученные спектры при использовании активной, пассивной защиты и без защиты

Главная особенность проекта **NEMO/SuperNEMO** — чувствительность на уровне $(0,2–1,0)/(0,04–0,1)$ эВ к эффективной массе нейтрино $(T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}(^{100}\text{Mo}) \sim 4 \cdot 10^{24} \text{ лет})/(T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}(^{82}\text{Se}) \sim 2 \cdot 10^{26} \text{ лет})$. Детектор **NEMO-3** работает при стабильных условиях с февраля 2003 г. Полное время экспозиции составило 1178 сут. В 2007 г. был проведен детальный анализ компонент фона детектора. Были получены но-

вые пределы для двойного бета-распада: для ^{130}Te $T_{1/2}^{2\nu\beta\beta}(^{130}\text{Te}) = 7,6 \pm 1,5$ (стат.) $\pm 0,8$ (сист.) $\cdot 10^{20}$ лет (рис. 3) и для ^{100}Mo в возбужденном состоянии $T_{1/2}^{2\nu\beta\beta}(^{130}\text{Mo}(0^+, 1130 \text{ кэВ})) = 5,7_{-0,9}^{+1,3}$ (стат.) $\pm 0,8$ (сист.) $\cdot 10^{20}$ лет [12].

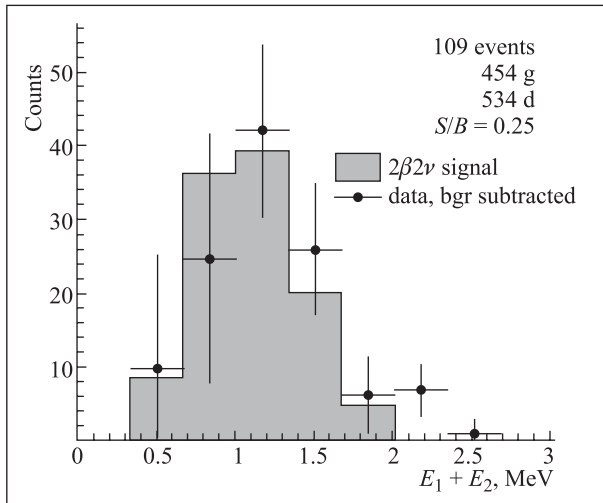


Рис. 3. Сигнал $2\nu\beta\beta$ -распада для ^{130}Te на основе данных NEMO

В 2007 г. был достигнут значительный прогресс в разработке и подготовке к проведению международного эксперимента GERDA (Germanium Detector Array). Основной целью эксперимента является поиск безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$) ^{76}Ge . GERDA будет оперировать с открытыми германиевыми детекторами (из обогащенного ^{76}Ge), погруженными непосредственно в жидкий аргон (LAr). В настоящее время установка GERDA находится в стадии сборки в подземной лаборатории LNGS (Италия). В первой фазе эксперимента будут использоваться существующие детекторы, взятые из предыдущих экспериментов Гейдельберг–Москва (HdM) и IGEX; во второй фазе будут добавлены новые сегментированные детекторы, изготовленные из недавно обогащенного германия.

Создание основной инфраструктуры эксперимента началось в 2007 г. с производства водного танка и криостата. В подземной лаборатории LNGS уже установлена нижняя часть водного танка. Окончательная конструкция водного танка будет закончена после того, как внутри будет смонтирован криостат. В настоящее время заканчивается изготовление и монтаж основных частей криостата. Из необогащенного германия было произведено несколько тестовых детекторов открытого типа (в том числе 18-сегментный детектор), которые прошли успешное тестирование на энергетическое разрешение и анализ по форме импульса. Были разработаны новые методы подавления фона, в том числе выделение фоновых событий в сегментированных де-

текторах и антисовпадения со сцинтилляционными сигналами LAr. Рассчитаны основные характеристики водного черенковского детектора, и изготовлены основные элементы фотоприемников. Создан стенд для сборки и тестирования модулей мюонного вето на основе пластмассовых сцинтилляторов, первая партия таких модулей была изготовлена и протестирована. Разработан и создан сверхчувствительный радонный детектор, который прошел успешные испытания в подземной лаборатории. Разработана конструкция тестовой установки LArGe, рассчитанной на работу с 1 т жидкого аргона в качестве сцинтиллятора. Все элементы установки LArGe произведены и готовы к сборке в подземной лаборатории [13].

Эксперимент EDELWEISS, расположенный в подземной лаборатории (LSM) в туннеле Frejus, соединяющем Францию и Италию, посвящен прямому поиску небарионной холодной темной материи в виде WIMPs. Принцип прямого поиска заключается в измерении энерговыделения, происходящего при упругом рассеянии WIMP, движущихся как составная часть гало нашей Галактики, на ядрах мишени, состоящей из обычной материи. В EDELWEISS детекторами являются криогенные Ge-болометры, имеющие возможность одновременного измерения фоновых и ионизационных сигналов. Сравнение двух сигналов дает возможность эффективного отбора событий между теми, в которых начальное рассеяние происходит на ядре мишени (такие события являются результатом рассеяния WIMP или нейтрона), и теми, в которых начальное рассеяние происходит на электронах (результат, производимый бета- или гамма-излучением). В EDELWEISS-II используются три различных типа детекторов: 320 г Ge/NTD, 400 г Ge/NbSi, разработанные в коллаборации EDELWEISS, с двумя термометрическими слоями изолятора NbSi для активной отбраковки поверхностных событий и новый тип детекторов — 400 г Ge/NTD/INTERDIGIT, использующий специальную схему электродов с целью отбраковки поверхностных событий. В настоящее время EDELWEISS-II имеет 28 детекторов: 21 Ge/NTD и 7 детекторов Ge/NbSi. Набор данных с ними начался летом 2007 г. Сорок дополнительных детекторов (50 % Ge/NbSi и 50 % Ge/NTD/INTERDIGIT) будут добавлены в течение двух последующих лет, что будет непрерывно повышать чувствительность эксперимента.

В рамках программы по изучению фонов в окружении установки EDELWEISS-II группой из ОИЯИ были построены и доставлены в LSM высокочувствительные детекторы нейтронов и радона. Для детектирования нейтронов используются специальные пропорциональные счетчики, заполненные газовой смесью с ^3He . Для регистрации быстрых нейтронов счетчики установлены в замедлитель из полиэтилена. Счетчики сделаны из нержавеющей труб,

внутренняя поверхность которых покрыта слоем тефлона в 50–60 мкм и затем слоем электролитической меди толщиной 1 мкм, таким образом, собственный альфа-фон детектора значительно уменьшен. Данный детектор позволяет регистрировать в подземной лаборатории LSM порядка 150 нейтронов в день. Такая скорость счета дает возможность проверять изменение потока нейтронов с течением времени. К настоящему времени такой мониторинг продолжается уже в течение 1,5 лет. Собственный фон данного детектора был измерен экспериментально в подземной лаборатории с использованием дополнительной нейтронной защиты из борированного полиэтилена толщиной 30 см, он составил менее 3 отсчетов в день. С учетом этого, а также на основе предварительных результатов МС-оценки эффективности детектор имеет чувствительность к потоку нейтронов на уровне $\sim 10^{-8} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Группа из ОИЯИ планирует собрать новый нейтронный детектор с ^3He -счетчиками без замедлителя для прямого измерения и мониторинга изменений потока тепловых нейтронов.

Основной целью проекта NN является измерение разницы спинзависимых полных сечений $\Delta\sigma_L$ и $\Delta\sigma_T$ при энергии нейтронов 16,2 МэВ. В течение 2007 г. продолжалось экспериментальное изучение nd -рассеяния с поляризованными частицами на ускорителе Карлова университета. С использованием классического метода передачи была измерена полная разность сечений. Поляризованный нейтронный пучок, падающий на поляризованную мишень, контролировался двумя тонкими сцинтилляционными детекторами. Позади мишени были помещены еще два детектора для регистрации проходящих нейтронов. Все детекторы были размещены вдоль оси пучка. Группа из ОИЯИ принимала участие в модернизации поляризованной мишени, а также обеспечивала устойчивую работу установки во время набора данных. В октябре 2007 г. были выполнены измерения $\Delta\sigma_L$ (несколько 24-часовых наборов данных при различной ориентации спина дейтрона). После каждого набора данных спин мишени менялся на противоположный. Набор состоял из 20 000 000 событий, которые были набраны с 5 парами спиновой поляризации дейтрона (положительной и отрицательной). Средняя отрицательная поляризация составила 34 %, а положительная — 28 %. Ожидаемая статистическая ошибка в измерении $\Delta\sigma_L$ — около 60 мб.

Проект GDH [14] посвящен важнейшей проблеме спиновой физики — экспериментальной проверке правила сумм Герасимова–Дрелла–Херна с помощью нового ускорителя «МАМІ С». При измерениях использовалась комбинация новой замороженной спиновой мишени, фотонного пучка с линейной и круговой поляризацией и кристаллического детектора. Это позволило с большой точностью определить поляризацию наблюдаемых. Группа из ОИЯИ

разработала и спроектировала $^3\text{He}/^4\text{He}$ криостат с новой поляризованной фотон-дейтериевой мишенью с замороженным спином. Криостат был протестирован в ОИЯИ в августе 2007 г., а затем переправлен в Майнц. В настоящее время криостат установлен как часть новой поляризованной мишени и проходит настройку.

В рамках проекта RIBETA были получены окончательные результаты анализа экспериментальных данных. С помощью детектора и пионного пучка был изучен распад $\pi^+ \rightarrow e^+\nu\gamma$ для 3 кинематических областей. Эти данные были использованы для определения значений слабого аксиального F_A и векторного F_V формфакторов пионов. В результате была набрана статистика, на порядок превосходящая всю предыдущую. В трех перекрывающихся фазовых областях (с углом $\theta_{e^+\gamma} > 40,0^\circ$) были зарегистрированы радиоактивные пионные распады. Путем минимизации было найдено значение для векторного пионного формфактора: $F_V = 0,0259$. С 90-процентным уровнем достоверности был получен предел на гипотетический тензорный вклад в амплитуду распада $|F_T(0)| \leq 5,1 \cdot 10^{-4}$. Этот предел более чем на порядок ниже предела, полученного коллаборацией ISTRА.

На установке ANKE на ускорителе COSY в Юлихе изучалось одиночное рождение пионов. Было измерено дифференциальное сечение реакции $pp \rightarrow pp\pi^0$ при энергии пучка в диапазоне от 0,5 до 2,0 ГэВ и испускании протонных пар вперед под углами $\theta_{pp}^{\text{ct}} = 0-18^\circ$. При энергии возбуждения протонных пар $E_{pp} < 3$ МэВ такие дипротоны находятся в 1S_0 -состоянии. Поэтому реакция $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ является изоспин-спиновым партнером кинематически аналогичного процесса $pp \rightarrow d\pi^+$, который был предметом тщательного изучения в течение многих лет. Напротив, для реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ единственные данные для удаленной от порога области были ограничены значениями $T_p < 0,425$ ГэВ. Совместное изучение обеих реакций на ANKE нацелено на более глубокое понимание динамики нуклон-нуклонного взаимодействия. В измеренных угловых зависимостях сечения при нулевом угле вылета дипронов наблюдается минимум при $T_p \leq 1,4$ ГэВ, в то время как при 2,0 ГэВ имеется максимум (рис. 4). Рост сечения при 2,0 ГэВ вместе с сильным изменением формы углового распределения указывает на переход к другому механизму реакции при энергиях, при которых возбуждаются более высокие состояния изобары, чем $\Delta(1232)$. Некоторые из наблюдаемых особенностей проявляются и в процессе $pp \rightarrow d\pi^+$. Однако отношение сечений двух реакций под нулевым углом, направленное на различное взаимодействие в конечном состоянии соответствующих нуклонных пар, очень мало и тем самым демонстрирует значительное подавление однопионного рождения при образовании спин-синглетной конечной нуклонной пары (рис. 5).

В то время как такое подавление известно и понятно в околороговой области и области резонанса Δ (1232), при более высоких энергиях для объяснения этого явления требуются новые теоретические изыскания.

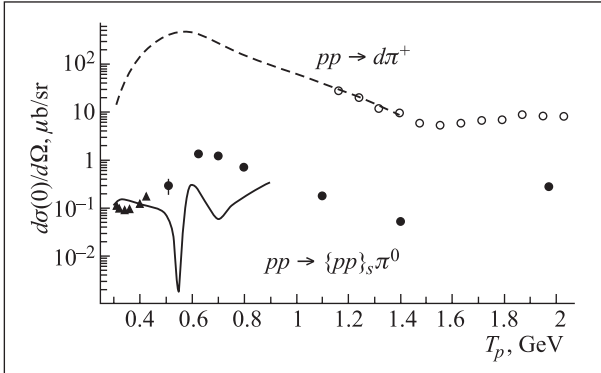


Рис. 4. Дифференциальное сечение реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ при $E_{\{pp\}} < 3$ МэВ. Темные кружки — результаты ANKE; треугольники — данные CELSIUS; сплошная линия — предсказание модели Ю. Нисканена. Для сравнения приведено сечение реакции $pp \rightarrow d\pi^+$: штриховая линия — параметризация SAID; светлые кружки — результаты КЕК

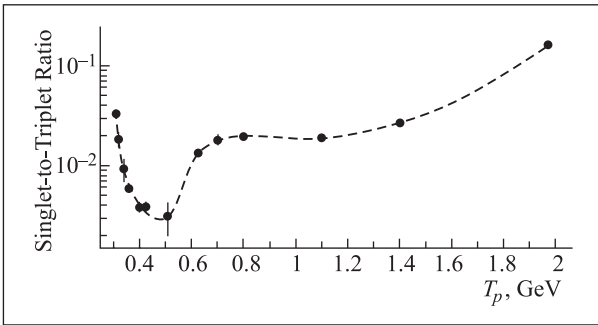


Рис. 5. Энергетическая зависимость синглет-триплетного отношения $|A_s|^2/|A_t|^2$, полученного при сравнении сечений реакций $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ и $pp \rightarrow d\pi^+$

DUBVO — совместный проект ОИЯИ и INFN по изучению пион-ядерных взаимодействий при энергиях ниже Δ -резонанса с использованием самошунтирующейся стримерной камеры, разработанной в ОИЯИ, и ядерной фотоэмульсионной техники. Главные физические результаты, полученные коллаборацией: увеличение статистики для определения относительных вероятностей двухлучевых каналов реакций $\pi^- + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- + {}^4\text{He}$, $\pi^- + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- + {}^4\text{He} + \gamma$, $\pi^- + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- + {}^4\text{He} + n$ с помощью техники искусственных нейронных сетей; первое наблюдение канала реакции $\pi^- + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- + {}^4\text{He} + \gamma$; первое экспериментальное свидетельство возбуждения отрицательного Δ -резонанса при выбивании нейтрона, связанного в ядре $M_{\Delta^-} = 1160$ МэВ, $\Gamma/2 = 20$ МэВ. Кроме того, было проведено дальнейшее изучение поведения инвариантных масс M_{π^+nn} и M_{π^-pp} в реакциях развала гелия $\pi^- + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- + {}^4\text{He} + \gamma$ и в ядерной фотоэмульсии. Была получена первая прямая оценка массы мюонного нейтрино по одному событию $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu$: $m_\nu < 2,2$ МэВ.

В рамках проекта **CATALYSIS** была проведена разработка системы гамма-детекторов с подавлением фона [15]. Основная часть системы детектирования состоит из двух гамма-детекторов полного поглощения с апертурой $\approx 25\%$. Гамма-детекторы составного типа (BGO + пластик) просматриваются одним фотоумножителем. Кристалл BGO предназначен для регистрации гамма-квантов с энергией 23,8 МэВ, образующихся в реакции $d(d, {}^4\text{He})\gamma$. Слой пластического сцинтиллятора вокруг кристалла BGO служит активной защитой от фоновой загрузки (в основном — космические лучи). Методом Монте-Карло был проведен анализ формы импульса сигнала для разделения «полезных» и фоновых событий с использованием разницы во времени высвечивания (300 нс для BGO и 10 нс для пластика). Для оптимизации геометрии установки и разработки ее инженерной конструкции [16] были выполнены вычисления и проведено моделирование основных физических процессов в детекторах и мишени (рис. 6).

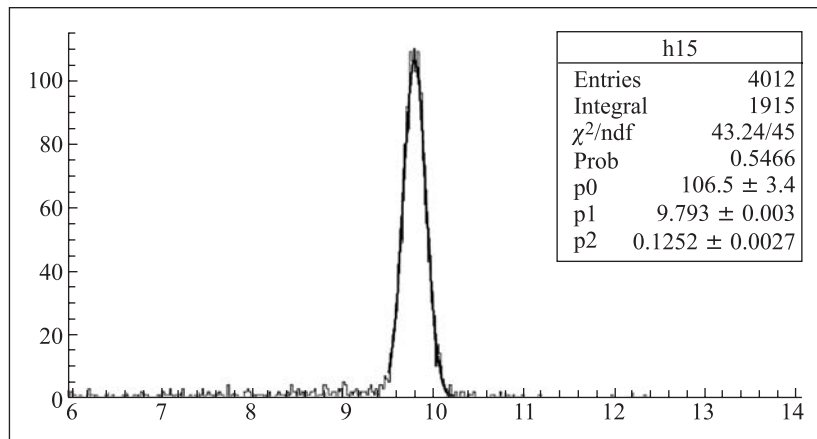


Рис. 6. Результат моделирования гамма-линии 23,8 МэВ, включая критерии отбора

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

В рамках проекта **ФАЗА** был проведен сеанс на нуклотроне по программе изучения динамики тепловой мультифрагментации в соударениях дейтронов (2,5 ГэВ/нуклон) с мишенью из золота.

В этих экспериментах использовался новый детекторный модуль установки **ФАЗА**, состоящий из 25 телескопов-спектрометров, который дает возможность измерять корреляции фрагментов промежуточной массы (ФПМ) [17]. Было зарегистрировано 10^8 событий фрагментации. Экспериментальное определение критической температуры для ядерного фазового перехода жидкость–газ — важный параметр ядерного уравнения состояния. Путем анализа делимости возбужденных ядер установлено, что $T_c = (19,5 \pm 1,2)$ МэВ. Этот результат находится в согласии со значением, полученным коллаборацией при изучении мультифрагментации [18].

Таким образом, разрешена противоречивая ситуация, описанная в литературе по этой проблеме (рис. 7).

Кроме того, коллаборацией получены предварительные данные о наличии двух источников испускания фрагментов промежуточной массы. В следующем году эта гипотеза будет проверена экспери-

ментально путем анализа корреляции фрагментов в функции относительной скорости.

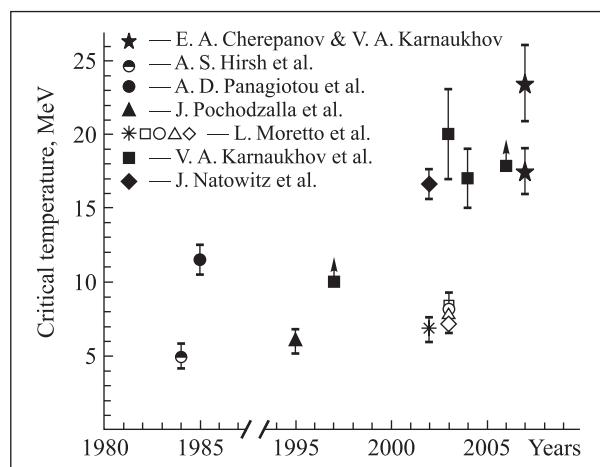


Рис. 7. Экспериментальные оценки критической температуры для ядерного фазового перехода жидкость–газ. Значения, полученные коллаборацией **ФАЗА** из данных по мультифрагментации, показаны в верхнем правом углу (черные квадраты). Они существенно превышают величины из работ Л. Моретто (Беркли, США). Это противоречие разрешено в пользу Дубны в результате нашего анализа данных по делению (звездочки)

НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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 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 [19].

В январе 2007 г. был окончательно восстановлен тракт транспортировки терапевтического протонного пучка к первой процедурной кабине МТК, поврежденный в результате пожара 2005 г. С января по ноябрь 2007 г. проведено шесть лечебных циклов суммарной продолжительностью 25 недель. На медицинском протонном пучке курс фракционированного лучевого лечения прошли 80 пациентов, при этом общее количество протонных терапевтических облучений (полей) составило 3700. Кроме того, на гамма-аппарате «Рокс-М» были пролечены еще 42 пациента (более 1000 полей).

Были также продолжены радиобиологические исследования [20]. Ранее уже было показано, что как предварительное, так и последующее облучение мышинных фибробластов СЗН10Т1/2 излучением He-Ne лазера приводит к увеличению выживаемости клеток, подвергшихся воздействию γ -излучения или протонов. Дальнейшее исследование закономерностей радиозащитного действия оптического излучения с длиной волны 633 нм на клетки фибробластов показало, что радиозащитное действие лазерного излучения может быть передано по механизму «bystander»-эффекта необлученным клеткам фибробластов не только путем межклеточных контактов, но и после переливания питательной среды из облученных лазерным излучением флаконов в необлученные.

В результате изучения комбинированного воздействия гамма-лучей и протонов на клетки мышей для определения оптимального режима комбинированных облучений в радиотерапии пришли к выводу, что конечный результат облучения зависит от последовательности излучений, дозы облучения каждого из них, а также от интервала времени между двумя ви-

дами облучения. Совместно со специалистами Лаборатории радиационной биологии были продолжены эксперименты по исследованию хромосомных нарушений в клетках лимфоцитов крови человека на различной фазе клеточного цикла при воздействии на них протонного излучения различной энергии.

С применением радиохромных пленок и антропоморфного фантома Алдерсона продолжены измерения по верификации алгоритмов, используемых в программе планирования при расчете дозных распределений. Изучалась зависимость от материала и размеров коллиматоров глубинного дозного распределения терапевтического протонного пучка. Показано, что при малых размерах апертур коллиматоров глубинное дозное распределение искажается, на малых толщинах наблюдается заметный вклад частиц, рассеивающихся в стенках коллиматора, особенно в коллиматорах из материала с высоким атомным номером.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bellettini G. et al.* Top Quark Mass Measurement in the 2 fb^{-1} Tight Lepton and Isolated Track Sample using Neutrino Phi Weighting Method. CDF/PHYS/TOP/GROUP/9048. 2007.
2. *Giakoumopoulou V. et al.* Measurement of the Top Quark Mass from the Lepton P_t in the Dilepton Channel, at 1.8 fb^{-1} . CDF/PHYS/TOP/PUBLIC/8959. 2007.
3. *Abazov V.M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. P. 052001.
4. *Kulchitsky Y. et al.* Electromagnetic Cell Level Calibration for ATLAS Tile Calorimeter Modules. ATL-TILECAL-PUB-2007-001; CERN-ATL-TILECAL-PUB-2007-001. CERN, Geneva, 2007. 82 p.
5. *Budagov J. et al.* Study of the Selection Criteria Impact on the e/h Ratio Measurement in Tile Calorimeter. ATL-COM-TILECAL-2007-004. CERN, Geneva, 2007. 14 p.
6. *Andonov A. et al.* // Письма в ЭЧАЯ. 2007. Т. 4, № 6(142). С. 757–771.
7. *Arbuzov A. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2007. V. 51. P. 585–591.
8. *Bardin D. et al.* // Ibid. V. 52. P. 83–92.
9. *Tkachev L. et al.* Status of the TUS Space Detector Preparation for UHECR Study // Proc. of the 30th ICRC, Merida, Yucatan, Mexico, 3–11 July, 2007.
10. *Воронин А.Г. и др.* Тестирование прототипа установки «Нуклон» на пионном пучке ускорителя SPS (CERN) // ПТЭ. 2007. Т. 50, № 2. С. 39–49.
11. *Beda A. et al.* // ЯФ. 2007. Т. 70. С. 1; hep-ex/0705.4576.
12. *Arnold R. (NEMO Collab.)* // Nucl. Phys. A. 2007. V. 781. P. 209.
13. *Pandola L. et al.* Monte Carlo Evaluation of the Muon-Induced Background in the GERDA Double Beta Decay Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 570. P. 149–158.
14. *Usov Yu.* The Cryostat for Mainz University // JINR News. 2007. No. 3. P. 4.
15. *Demin D.L. et al.* Status of the dd -Gamma Experiment // Proc. of MCF-07, Dubna, June 18–21, 2007.
16. *Volnykh V.P.* Application of GEANT4 Toolkit in dd -Gamma Experiment in Dubna // Ibid.
17. *Киракосян В.В. и др.* Модернизированная установка ФАЗА для исследования ядерной мультифрагментации // ПТЭ. 2008. № 1. С. 1.
18. *Karnaikhov V.A. et al.* Critical Temperature for the Nuclear Liquid–Gas Phase Transition (from Multifragmentation and Fission) // Phys. Rev. C (submitted); nucl-th/070310v1. 2007.
19. *Молоканов А.Г.* Формирование глубинного дозного распределения радиотерапевтического протонного пучка фазотрона ЛЯП ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ P18-2007-90. Дубна, 2007.
20. *Восканян К.Ш., Мицын Г.В., Гаевский В.Н.* Радиозащитное действие излучения гелий-неонового лазера на клетки фибробластов // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2007. № 3. С. 32–35.