

# ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ им. В. П. ДЖЕЛЕПОВА

## ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На основе данных, полученных на LEP (ЦЕРН, Швейцария), коллаборацией **DELPHI** был изучен процесс рождения мюонной пары в реакции  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$ . Один из самых интересных результатов был получен при измерении энергетической зависимости константы связи сильного взаимодействия  $\alpha_s$ . Таким образом, в рамках данных одного эксперимента DELPHI был продемонстрирован «бегущий» характер этой константы. Завершен важный этап работ по поиску бозона Хиггса на LEP [1]. Было исследовано множество моделей с различными свойствами бозона Хиггса, в том числе стандартная модель, суперсимметричная теория, хиггс с двойным зарядом  $H^{++}$  и т.д. Во всех этих случаях результат был отрицательный, верхний предел для массы хиггс-бозона составил 100–115 ГэВ/ $c^2$ .

Достигнут прогресс в понимании и определении систематической погрешности измерения массы  $W$ -бозона. Окончательные результаты анализа ожидаются в 2004 г. В 2003 г. выполнено измерение поперечного сечения рождения  $\tau$ -пары в реакции  $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$  [2], откуда были получены верхний предел для электрического дипольного момента ( $d_\tau$ ) и наиболее точные на данный момент пределы для магнитного момента  $a_\tau$   $\tau$ -лептона:  $-0,052 < a_\tau < 0,013$ ,  $|d_\tau| < 3,7 \cdot 10^{-16} e \text{ см}$  (рис. 1).

В 2004 г. планируется закончить работу по определению массы  $W$ -бозона и изучению процесса рождения фермионных пар при высоких энергиях соударения, а также исследовать физику  $b$ -кварка, продолжить поиск новых частиц и явлений.

Целью проекта **NOMAD** (Neutrino Oscillation MAgnetic Detector) является поиск нейтринных ос-

цилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ,  $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$  и  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  и изучение взаимодействий нейтрино. В научную программу также входит определение поляризации  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$  в  $\nu_\mu$ - и  $\bar{\nu}_\mu$ -взаимодействиях нейтральных токов и изучение странных нейтральных частиц и странных тяжелых гиперонов во взаимодействиях  $\nu_\mu$ .

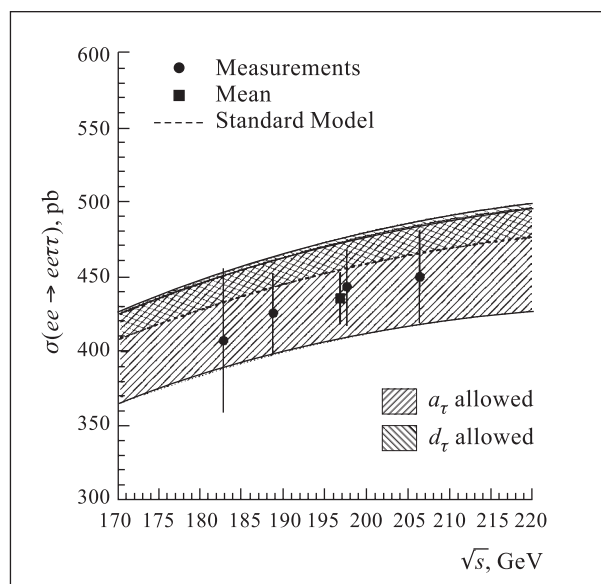


Рис. 1. Энергетическая зависимость поперечного сечения реакции  $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$

В 2003 г. были получены окончательные результаты поиска осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  [3]. Доказательств существования осцилляций не найдено и на 90%-м уровне вероятности получено, что  $\Delta m^2 <$

0,4 эВ<sup>2</sup> для максимального смешивания нейтрино и  $\sin^2 2\theta_{\nu_\mu \nu_e} < 1,4 \cdot 10^{-3}$  для большого  $\Delta m^2$ . Этот результат исключает область параметров LSND с  $\Delta m^2 > 10$  эВ<sup>2</sup>.

Точное значение состава пучка нейтрино (рис. 2) является решающим для поиска осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ . Был разработан метод расчета потока и состава нейтринного пучка, который используется в эксперименте NOMAD для поиска нейтринных осцилляций [4]. Неопределенность нахождения энергии в предсказании  $\nu_e/\nu_\mu$  составляет от 4 до 7%, в то время как неопределенность нормировки составляет 4,2%.

Коллаборацией NOMAD также было проведено измерение  $\Lambda^0$ - и  $\bar{\Lambda}^0$ -поляризации в  $\nu_\mu$ -взаимодействии. В обоих случаях нейтрального и заряженного токов для данных NOMAD была измерена выстроенность спинов векторных мезонов  $K^{*\pm}$ .

В 2004 г. коллаборация планирует закончить анализ реакции  $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$  и измерение значения аксиальной массы  $M_A$ . Такие данные очень важны

для интерпретации результатов экспериментов с атмосферными нейтрино.

Целью эксперимента **DIRAC** является измерение времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атома для проверки предсказаний при малых энергиях. В 2003 г. проведен сеанс набора статистики продолжительностью 4 месяца на ускорителе PS в ЦЕРН [5]. Полное число событий, набранных в 2003 г. на однослойной и многослойной никелевых мишенях, составило около 309 млн. К октябрю 2003 г. число идентифицированных  $\pi^+\pi^-$ -атомов в данных, полученных в 1999–2003 гг. на мишенях из никеля, титана и платины, составляло около 20000. Система микродрейфовых камер с электроникой считывания была испытана на пучке. Были подтверждены расчетные значения для пространственного и временного разрешения камер. Было набрано около 100 млн событий. Информация с микродрейфовых камер будет использована для изучения двухтрекового разрешения передних детекторов установки.

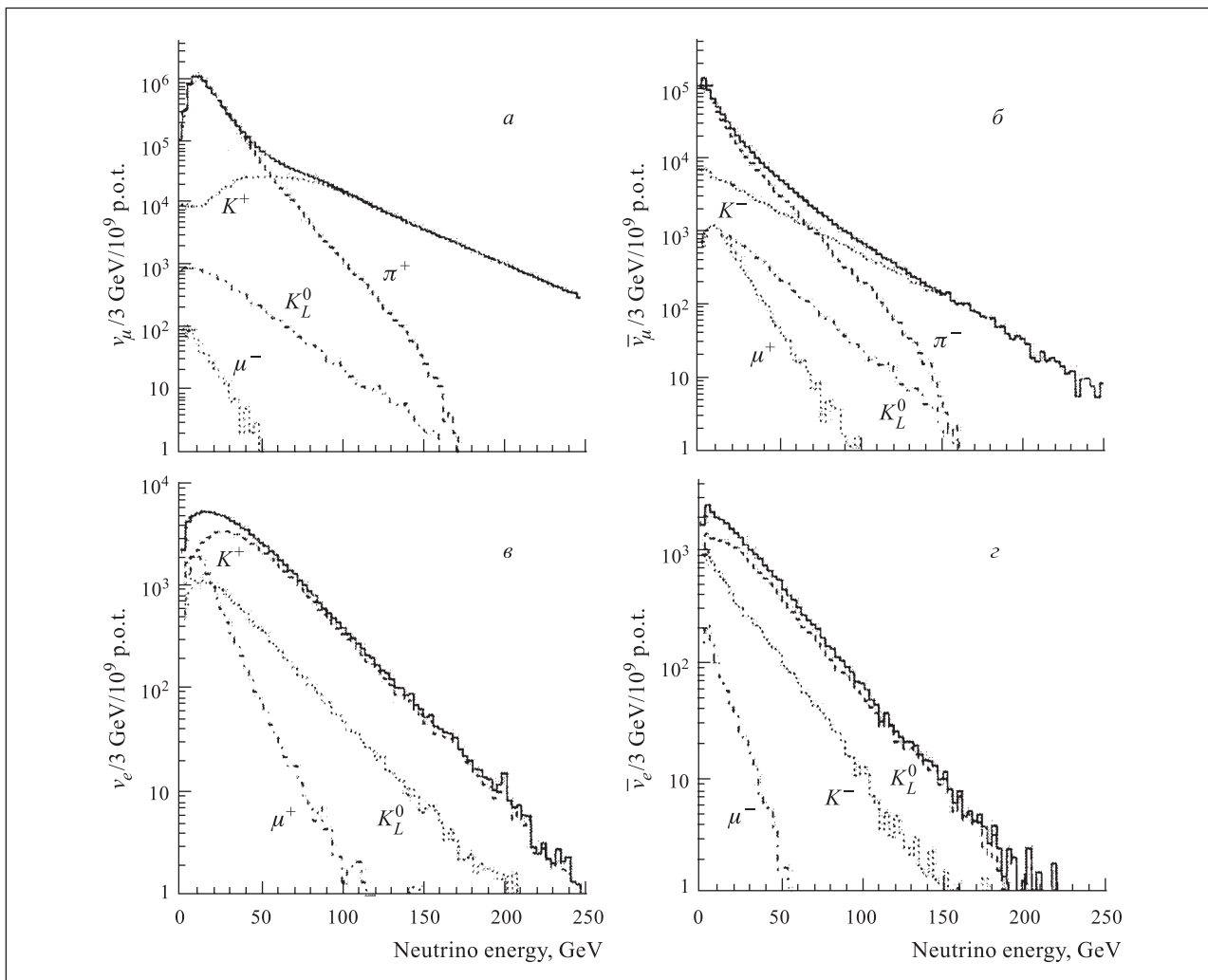


Рис. 2. Состав энергетических спектров  $\nu_\mu$  (а),  $\bar{\nu}_\mu$  (б),  $\nu_e$  (в),  $\bar{\nu}_e$  (г), полученных в эксперименте NOMAD

В 2004 г. коллаборация DIRAC планирует провести обработку данных, набранных в 2000–2003 гг. на никелевой и титановой мишенях, для определения времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атома со статистической точностью 10% и оценки систематических неопределенностей. Будет проведен анализ экспериментальных данных, полученных при измерении угла многократного рассеяния в мишени, детекторах и элементах установки, для уменьшения систематических ошибок, возникающих из-за неточности в описании многократного рассеяния. Также планируется уточнение теоретического описания многократного рассеяния, анализ данных, полученных при испытании микродрейфовых камер, для изучения систематических ошибок в набранных данных. Будет разработано приложение к проекту DIRAC по измерению времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атома с точностью 5%, наблюдению  $\pi K$ -атомов и долгоживущих состояний  $\pi^+\pi^-$ -атома. В дальнейшем планируются работы над проектом эксперимента по измерению времени жизни  $\pi^+\pi^-$ - и  $\pi K$ -атомов на ускорителе J-PARC в Японии.

Обеспечение высокого качества измерения мюонных треков — один из основных пунктов, предусмотренных в проекте эксперимента ATLAS. Мюонный спектрометр покрывает наружную поверхность детектора (высота около 22 м, длина 44 м). Для определения траектории мюона требуется измерение как минимум трех точек трека мюона, что ведет к необходимости создания трекового детектора для регистрации мюонов общей площадью 5500 м<sup>2</sup>, состоящего из 400000 отдельных дрейфовых трубок, собранных в 1200 мюонных камер. Предложение об использовании дрейфовых трубок с повышенным давлением рабочего газа в качестве основного координатного детектора мюонной системы было сделано группой ОИЯИ и избрано коллаборацией ATLAS как основное. В сооружении мюонного спектрометра ATLAS помимо ОИЯИ участвует 11 институтов из России, Германии, Италии, Голландии и США. Вклад ОИЯИ (изготовление мюонных камер типа BMS/BMF) составляет около 20% от общего объема работ. В 2003 г. группа ОИЯИ завершила производство и испытание всех дрейфовых трубок (24800 трубок) и продолжает сборку и тестирование мюонных камер [6].

Успешно завершена сборка 64 модулей **тайл-калориметра установки ATLAS**. Впервые для модулей тайл-калориметра получены энергетические калибровочные константы. 30 октября 2003 г. в ЦЕРН была закончена сборка адронного барреля тайл-калориметра на поверхности земли. Возведение 1350-тонного барреля в пределах жестких проектных допусков, с постоянным on-line контролем механических точностей являлось уникальной технической операцией.

Разработанное в ОИЯИ новое программное обеспечение было успешно применено для энергетиче-

ской калибровки ячеек модулей тайл-калориметра установки ATLAS [7]. Были определены электронные и пионные калибровочные константы для различных ячеек, энергий и углов. Исследованы электронные и пионные энергетические разрешения. Полученные калибровочные константы включены в калибровочную базу данных тайл-калориметра.

Был предложен новый метод быстрой монтекарловской генерации откликов адронного калориметра [8]. Ключевая идея метода — это использование трехмерной параметризации адронных ливней, полученных на основе экспериментальных данных с тайл-калориметра.

Энергетический спектр и сечение фотоядерных взаимодействий 180-ГэВ мюонов с железом ( $\mu + \text{Fe} \rightarrow \mu' + \text{адроны} + X$ ) были измерены на ускорителе SPS ЦЕРН с помощью модулей тайл-калориметра установки ATLAS [9]. Дифференциальное и интегральное сечения для  $v = \Delta E_\mu / E_\mu$  были измерены в интервале  $0,1 < v < 1$ . В 2003 г. было подготовлено и проведено 4 сеанса экспозиции модулей тайл-калориметра на ускорителе SPS ЦЕРН, а также были обработаны полученные экспериментальные данные [10].

Группа ОИЯИ активно участвует в проведении эксперимента D0 на тэватроне FNAL (США), который имеет максимальную энергию протон-антипротонных встречных пучков (2 ТэВ в системе центра масс). Группа участвовала в усовершенствовании D0-детектора для сеанса Run II тэватрона, который позволит достигнуть максимальной светимости (около  $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Основные интересы группы ОИЯИ — изучение КХД и барионной физики.

Для коллаборации наиболее важна задача калибровки энергии адронных струй (или задача определения абсолютной энергетической шкалы струи). В настоящее время основной вклад в ошибку массы топ-кварка дает неопределенность в шкале энергии струи. Группа ОИЯИ разработала новый критерий отбора событий с рождением адронных струй и прямых фотонов, позволяющий существенно улучшить точность шкалы абсолютной энергии струи. Показано, что основной вклад в поперечный момент фотона (или  $Z^0$ ) дает излучение в начальных и конечных состояниях. Другое новое требование изоляции струи позволяет отобрать топологически чистые события «фотон/ $Z^0$  + струя», что обеспечит точность определения шкалы абсолютной энергии струи 1%. Параллельно с решением задачи калибровки энергии струи разрабатывается возможность экспериментального исследования структуры протона — функции распределения глюонов. Показано, что для этой цели можно использовать образцы событий « $\gamma$  + струя» (рис. 3).

Интерес коллаборации D0 также сфокусирован на барионной спектроскопии. До сих пор эта область развита достаточно слабо. Группа пытается исследо-

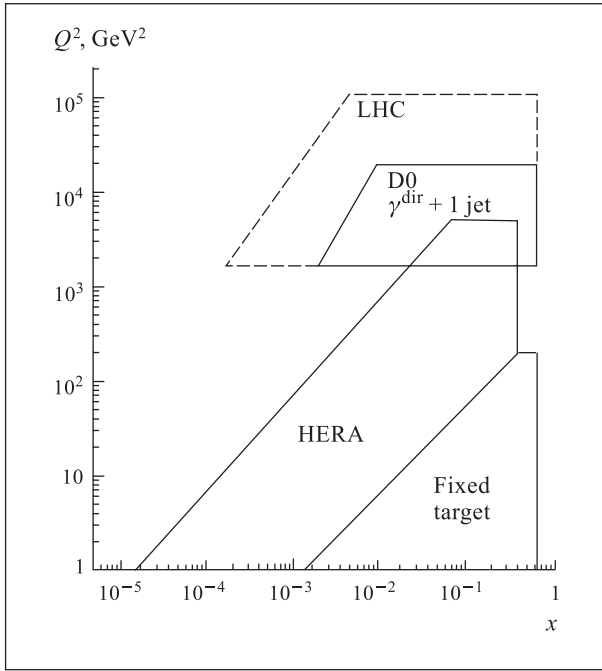


Рис. 3. Кинематическая область для  $pp \rightarrow \gamma + \text{струи}$  на тэватроне и на LHC. Также показана область для HERA и экспериментов с фиксированной мишенью

вать нелептонные распады барионов:  $\Lambda_b \rightarrow J/\psi + \Lambda$  и  $\Xi_b \rightarrow J/\psi + \Xi$  с дальнейшим лептонным распадом  $J/\psi$  ( $\mu^+\mu^-$  или  $e^+e^-$ ). Это дает возможность определить массу и время жизни барионов и антибарионов.

Главным достижением группы сотрудников ОИЯИ, работающих в рамках эксперимента CDF, в 2003 г. стало начало исследований на модернизированной установке CDF по физике  $c$ -,  $b$ -,  $t$ -кварков.

В 2003 г. группа специалистов ОИЯИ обеспечивала эффективное функционирование детектора CDF на тэватроне FNAL и участвовала в наборе экспериментальных данных, проводила анализ физической информации с CDF с целью измерения массы топ-кварка с высокой точностью, обеспечивала эффективное функционирование триггера на базе кремниевого вершинного детектора (SVT), предназначенного для быстрого on-line поиска вторичных вершин, участвовала в модернизации мюонного комплекса CDF и системы мониторинга высоковольтного питания сцинтилляционных счетчиков [11].

Подготовлены метод и программное обеспечение для высокоточного измерения массы топ-кварка в топологии  $p\bar{p} \rightarrow \text{лептон} + \text{струи}$ . Метод успешно опробован для широкого спектра значений топ-массы на моделированных событиях (рис. 4). Получены предварительные результаты измерения массы топ-кварка в однолептонной моде его распада на основе первых  $72 \text{ pb}^{-1}$  данных сеанса Run II CDF. Измеренная масса топ-кварка составляет

$$m_t = 171,2 \pm_{12,5}^{14,4} (\text{стат.}) \pm 9,9 (\text{сист.}) \text{ ГэВ}/c^2.$$

Подготовлено программное обеспечение для измерения массы топ-кварка в двухлептонной моде его распада. Метод опробован на смоделированных событиях. Предварительные результаты ожидаются в апреле 2004 г.

На установке CDF смонтирована новая группа сцинтилляционных счетчиков, которые включены в так называемый «модернизированный мюонный триггер CDF» и используются при отборе событий с тяжелыми кварками.

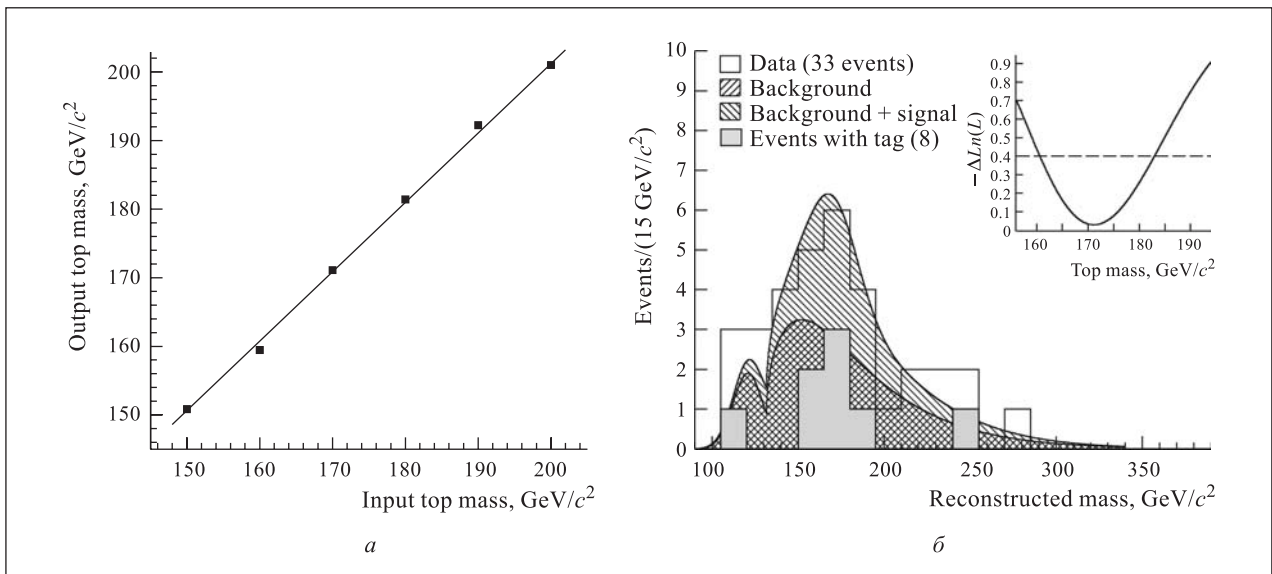


Рис. 4. а) Зависимость восстановленной массы топ-кварка от ее значения, заложенного в монте-карло-событиях. б) Результат фитирования спектра эффективной массы кандидатов в топ-кварки, отобранных из первых  $72 \text{ pb}^{-1}$  данных. Параметризации сигнального и фонового распределений заштрихованы. События с мечеными струями приведены на окрашенной гистограмме

В 2004 г. коллаборация планирует определить массу топ-кварка на увеличенной в 3 раза статистике в однолептонной моде распада, а также получить предварительный результат по массе топ-кварка в двухлептонной моде распада топ-кварка.

Эксперимент HARP [12] нацелен на систематическое изучение рождения адронов при столкновении протонного пучка с импульсом от 2 до 15 ГэВ/с с ядрами мишени от кислорода до свинца. Для этого используется спектрометр с большим акцептансом и двумя различными частями: передней (полярный угол 350 мрад), которая состоит из набора дрейфовых трубок, взятых с эксперимента NOMAD (NSC), и задней части, где в качестве идентификатора частиц стоят TPC.

В эксперименте HARP ведется измерение рождающихся пионов, что позволяет количественно оценить характеристики протонного драйвера нейтринной фабрики и более точно рассчитать поток атмосферных нейтрино. Кроме того, указанные пределы энергии удобны с точки зрения измерений выходов частиц, которые важны для предсказаний потоков нейтрино в экспериментах MiniBooNe и K2K.

В 2003 г. группа из ОИЯИ установила, собрала и запустила дрейфовые камеры NOMAD для эксперимента HARP. Были выполнены калибровка и юстировка NDC. После тщательной юстировки было получено пространственное разрешение NDC около 350 мкм. Был разработан алгоритм NDC-реконструкции. Алгоритм сегментной реконструкции в NDC, предложенный группой из ОИЯИ, был выбран как основной для коллаборации ввиду его высокой эффективности и чистоты. Были выполнены систематические измерения и анализ данных для понимания различных эффектов в TPC. Неоднородности магнитного и электрического полей в активном объеме TPC ведут к смещению координат кластера и к смещению треков. На основе детального моделирования магнитного и электрического полей была рассчитана карта поправок для этих эффектов [13].

Предварительный анализ данных, взятых из работы с водяной мишенью, показал наличие электронов и пионов во взаимодействии 1,5-ГэВ/с протонов с водой. Эти данные необходимы для правильной интерпретации результатов нейтринного эксперимента LSND.

В 2004 г. анализ данных эксперимента с водяной мишенью будет завершен. Также будет закончена разработка программ для NDC, TPC, RPC и других детекторов. Будет проводиться анализ данных, полученных для мишеней K2K и MiniBooNe, а также расчеты вкладов фоновых мюонов.

Основной задачей эксперимента «Гиперон» [14] в 2003 г. было создание установки для исследования мезон-ядерных реакций на различных ядрах с образованием нейтральных мезонов в конечном состоянии и проведение тестовых сеансов для подготовки к набору данных. Базовыми элементами уста-

новки являются электромагнитный калориметр, создаваемая система мечения нейтральных мезонов и пропорциональные камеры.

Для определения импульса пучковой частицы в состав установки будут включены пропорциональные камеры. Проведены установка и монтаж гексагональных камер.

Годоскопический калориметр установки «Гиперон» из свинцового стекла предназначен для регистрации гамма-квантов от распадов нейтральных мезонов. Требовалось заменить все АЦП системы, так как они сильно устарели. К настоящему времени заменено и подключено 320 АЦП системы MISS из 640 требуемых.

Создана система сбора данных, позволяющая принимать несколько тысяч событий за сброс и одновременно контролировать работу детекторов и качество набираемого материала. Подготовлена и запущена программа реконструкции событий.

В 2004 г. планируется доставить в Протвино систему мечения, смонтировать ее на канале к началу весеннего сеанса и закончить изготовление мониторинговой системы, а к концу года получить предварительные результаты изучения  $A$ -зависимости в мезон-ядерных реакциях с образованием нейтральных мезонов в конечном состоянии.

В эксперименте ТУС путем регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) с космической орбиты будет измеряться энергетический спектр, состав и угловое распределение космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ) в области  $E > 10^{19}$  эВ, для которой предсказано обрезание спектра из-за GZK-эффекта.

Эксперимент ТУС является проверочным, запуск детектора планируется в 2006–2007 г. на российском спутнике «Ресурс-О». На основе полученного опыта работы предполагается создание КЛПВЭ-детектора следующего поколения с зеркалом Френеля площадью  $\sim 10$  м<sup>2</sup> и матрицей ФЭУ  $50 \times 50$ , который будет базироваться на Международной космической станции и исследовать спектр КЛПВЭ, в том числе от космических нейтрино сверхвысокой энергии. В 2003 г. в ОИЯИ была спроектирована и изготовлена пресс-форма для производства модулей зеркала Френеля.

Создана программа SLAST, моделирующая как флюоресцентное, так и черенковское излучение ШАЛ, инициированных КЛПВЭ-частицами в атмосфере Земли. В программе SLAST моделируются свойства зеркала Френеля, параметры электроники и алгоритм работы триггерной системы, полная программа включает моделирование развития воздушного ливня, флюоресцентного и черенковского излучения. Моделирование свойств оптики, триггерной и электронной систем находится в стадии развития. Развита алгоритм реконструкции направления КЛПВЭ, а также алгоритмы определения высоты максимума ШАЛ, необходимые для вычисления

энергии ШАЛ, и реконструкции глубины максимума ШАЛ в атмосфере.

Эксперимент **E391a** нацелен на поиск редкого распада каона  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  с использованием тонкого пучка и детектора, имеющего очень хорошие характеристики для подавления фона  $\gamma$ -квантов. Ведется

сооружение детектора, который состоит из трех механически независимых частей, что означает их индивидуальное изготовление и последующую сборку. Все три части изготовлены, сборка началась в декабре 2003 г., после тестирования вакуума начнутся измерения. Набор данных начнется в феврале 2004 г.

## ФИЗИКА НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

Основным результатом 2003 г. является пуск детектора **НЕМО-3** в нормальном рабочем режиме. После завершения юстировки, наладки и сборки системы защиты 14 февраля 2003 г. детектор начал набор данных [15]. Общее время работы детектора в 2003 г. составило  $\approx 5500$  ч (230 сут).

Анализ первых данных показал большой уровень концентрации радона внутри детектора, он составил  $\approx 20\text{--}30$  мБк/м<sup>3</sup>. Были предприняты работы по исключению радона из воздуха лаборатории. В октябре 2003 г. детектор **НЕМО-3** был накрыт антирадонным тентом, и в начале 2004 г. будет построена специальная антирадонная фабрика. Исходя из анализа первых данных (февраль–сентябрь 2003 г., 3834 ч) были даны оценки для времени полураспада некоторых изотопов. Лучшие результаты были получены для предела безнейтринного двойного  $\beta$ -распада изотопа <sup>100</sup>Mo (7,2 кг) (см. рис. 5):  $T_{1/2}^{2\beta 0\nu} (^{100}\text{Mo}) > 2,3 \cdot 10^{23}$  лет (при уровне достоверности 90%), что соответствует эффективной массе нейтрино  $\langle m_\nu \rangle < 0,6\text{--}1,4$  эВ. 83000 событий, отобранных для  $2\beta 2\nu$ -распада <sup>100</sup>Mo, дали незначительную статистическую погрешность:

$$T_{1/2}^{2\beta 2\nu} (^{100}\text{Mo}) = (8,2 \pm 0,0025(\text{стат.}) \pm 0,8(\text{сист.})) \cdot 10^{18} \text{ лет.}$$

Основные усилия направлены на уменьшение систематической ошибки измерений. Для других изотопов получены следующие результаты:

- $T_{1/2}^{2\beta 2\nu} (^{82}\text{Se}) = (9,52 \pm 0,25(\text{стат.}) \pm 0,9(\text{сист.})) \cdot 10^{19}$  лет,  $T_{1/2}^{2\beta 0\nu} > 1,0 \cdot 10^{22}$  лет (при уровне достоверности 90%),
- $T_{1/2}^{2\beta 2\nu} (^{116}\text{Cd}) = (2,69 \pm 0,09(\text{стат.}) \pm 0,3(\text{сист.})) \cdot 10^{19}$  лет,  $T_{1/2}^{2\beta 0\nu} > 1,6 \cdot 10^{22}$  лет (при уровне достоверности 90%),
- $T_{1/2}^{2\beta 2\nu} (^{150}\text{Nd}) = (7,5 \pm 0,3(\text{стат.}) \pm 0,7(\text{сист.})) \cdot 10^{18}$  лет,  $T_{1/2}^{2\beta 0\nu} > 3,6 \cdot 10^{21}$  лет (при уровне достоверности 90%).

Новый высокоэффективный спектрометр **TGV** [16] был спроектирован с использованием материалов с низким уровнем радиоактивных примесей

( $U + Th < 0,1$  ppb). Спектрометр **TGV-2** предназначен для исследований двойного  $\beta$ -распада <sup>48</sup>Ca и двойного электронного захвата <sup>106</sup>Cd. Спектрометр базируется на 32 HPGe-детекторах объемом 2040 мм<sup>2</sup>×6 мм каждый (около 3 кг германия). Детекторы установлены вертикально один на другой с тонкими (50–100 мг/см<sup>2</sup>) однородными эмиттерами в специальный низкофонный криостат. Детекторная часть **TGV-2** окружена пассивной защитой, включая защиту от радона и нейтронов. Для исследований двойного  $\beta$ -распада и двойного электронного захвата были разработаны специальные методы активного уменьшения радиоактивного фона и электронного шума. Детектор установлен в Моданской подземной лаборатории (4800 м в.э.) во Франции. Уровень фона спектрометра был определен в серии экспериментов с низкой энергией (< 50 кэВ) и с полной энергией (< 5 МэВ) и оказался приемлемым для изучения  $2K2\nu$ - и  $2K0\nu$ -распадов <sup>106</sup>Cd и для  $2\beta 2\nu$ - и  $2\beta 0\nu$ -распадов <sup>48</sup>Ca. В серии измерений с 10 г обогащенного <sup>48</sup>Ca были получены новые пределы для  $\beta$ -распада <sup>48</sup>Ca в основное 6<sup>+</sup>-состояние, возбужденные 5<sup>+</sup>- и 4<sup>+</sup>-состояния <sup>48</sup>Sc и для двойного

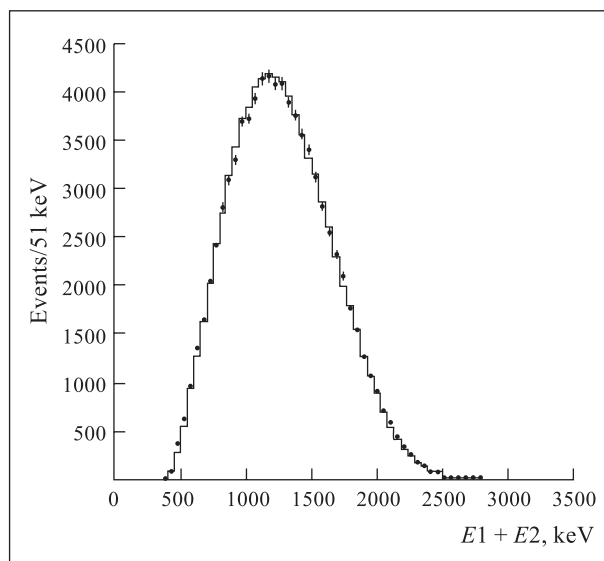


Рис. 5.  $\beta\beta$ -сигнал <sup>100</sup>Mo



двухнейтринного  $\beta$ -распада  $^{48}\text{Ca}$  в первое  $2^+$ , второе  $2^+$  и первое  $0^+$  возбужденные состояния  $^{48}\text{Ti}$ .

В начале 2004 г. эти измерения будут закончены, начнутся исследования двойного электронного захвата для  $^{106}\text{Cd}$ , а затем исследования двойного  $\beta$ -распада для  $^{48}\text{Ca}$ .

Работа коллаборации **AnCor** направлена на поиск скалярного взаимодействия в процессах рассеяния мюонов на ядрах. Здесь скалярная константа связи  $C_s$  может давать вклад в различные наблюдаемые величины в мюонном захвате, суммируясь с индуцированной константой скалярной связи ( $C_s + g_s$ ). Исследовалась двухступенчатая реакция, в которой сначала осуществлялся запрещенный переход  $0^+ \rightarrow 1^-$  в обычном мюонном захвате в ядре  $^{16}\text{O}$  с нулевым спином, а потом происходило испускание  $\gamma$ -кванта из возбужденного дочернего ядра отдачи. Так как время жизни  $1^-$ -уровня относительно велико (около 4 пс), необходимо использовать мишень с низкой плотностью (газ кислорода под давлением в несколько бар), чтобы уменьшить эффект торможения ядер отдачи в материале мишени. В то же время процент мюонов, остановленных в газе, относительно других конструкционных материалов должен быть как можно больше. В связи с этим была создана мишень из специального газа, которая была установлена на  $\mu\text{E4}$ -пучке в PSI. За три недели при атмосферном давлении с помощью HPGe-детектора был измерен спектр  $\gamma$ -квантов.

Используя метод, основанный на эффекте Доплера и описанный в [17], можно исследовать корреляцию между моментами  $\mathbf{q}$ - и  $\mathbf{k}$ -нейтрино и  $\gamma$ -кванта. В этом случае форма  $\gamma$ -линии, уширенной за счет эффекта Доплера, определяется сверткой функции отклика детектора (откалиброванной с помощью  $^{169}\text{Yb}$ -источника) и корреляционной функции  $W$ , которая может быть найдена из  $W = 1 + a_2^1 P_2(\mathbf{kq})$ , где  $P_2(\cos\theta)$  — полиномы Лежандра. Корреляционные коэффициенты  $a_2^1$  зависят от относительных значений ядерных матричных элементов и константы связи слабого взаимодействия. В эксперименте было найдено значение  $a_2^1 = 0,096 \pm 0,020$  [18].

Для того чтобы из  $a_2^1$  определить скалярную константу связи (рис. 6), были рассчитаны ядерные матричные элементы для различных остаточных взаимодействий: ZBMI, REWIL и ZWM. Все они привели к различным значениям ( $C_s + g_s$ ), отличным от нуля. Наилучший путь подтвердить или опровергнуть эти нетривиальные результаты — повторный эксперимент с другой мишенью. После нескольких тестов в качестве многообещающего кандидата был выбран неон при атмосферном давлении.

При захвате мюона ядрами  $^{20}\text{Ne}$  было замечено несколько интересных процессов, среди них: первый запрещенный переход ( $0^+ \rightarrow 1^-$ ), чувствительный к скалярному вкладу, последующий ( $0^+ \rightarrow 1^-$ )- и два уникальных ( $0^+ \rightarrow 2^-$ )-перехода, чувствительных к индуцированному псевдоскалярному вза-

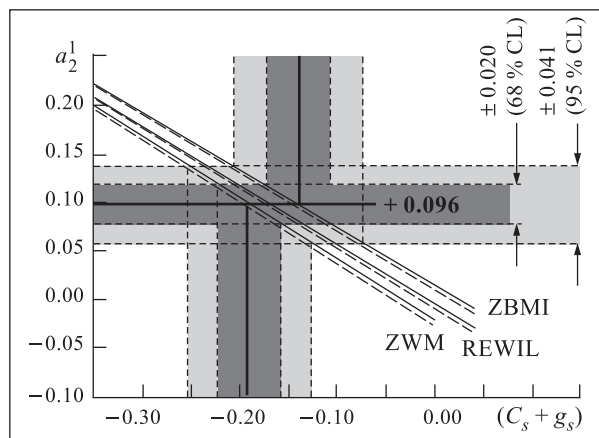


Рис. 6. Определение ( $C_s + g_s$ ) на основе корреляционного коэффициента  $a_2^1$

модействием, а также переходы в гигантские дипольные резонансы с последующей эмиссией  $\gamma$ -линией, которые расширены за счет эффекта Доплера из-за ядерной отдачи, вызванной испусканием нейтрино и нейтрона.

В 2003 г. коллаборация использовала обычный мюонный захват на возбужденные состояния в качестве пробного для ядерных волновых функций, которые определяют амплитуды многих виртуальных переходов двойного  $\beta$ -распада. Для того чтобы получить такую информацию для наиболее интересных  $\beta$ -распадных ядер, коллаборация предложила измерить скорость ядерного захвата на ряде обогащенных мишеней [19]. На первом этапе медленными мюонами были облучены однограммовые мишени из  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{76}\text{Se}$ ,  $^{106}\text{Cd}$ ,  $^{116}\text{Sn}$  и  $^{150}\text{Sm}$  на мюонной фабрике в PSI (Виллиген, Швейцария). С хорошей точностью была получена полная скорость мюонного захвата. Далее измерения проводились с помощью мишеней из  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{48}\text{Ti}$ , результаты сравнивались с результатами измерений для натурального металлического кальция (97%  $^{40}\text{Ca}$ ) (рис. 7).

Наибольшее внимание было уделено мишени из  $^{48}\text{Ti}$ . Измерения проводились в течение недели, была получена достаточная статистика для выделения всех  $\gamma$ -линий спектра и для их анализа и выделения скоростей частичного захвата с необходимой точностью (10–20%).

В рамках проекта **LESI** в период с 1996 по 2002 г. на сильноточном ускорителе Института сильноточной электроники СО РАН проведены исследования  $dd$ -реакции в области энергий столкновения дейтронов 1,8–3,7 кэВ. Впервые получены экспериментальные значения астрофизического S-фактора и эффективных сечений  $dd$ -реакции в указанной области энергий. В 2003 г. осуществлен монтаж и запуск экспериментальной установки на более мощном импульсном ускорителе ( $I = 2,5$  МА,  $\tau = 80$  нс). Такой переход осуществлен с целью продолжения

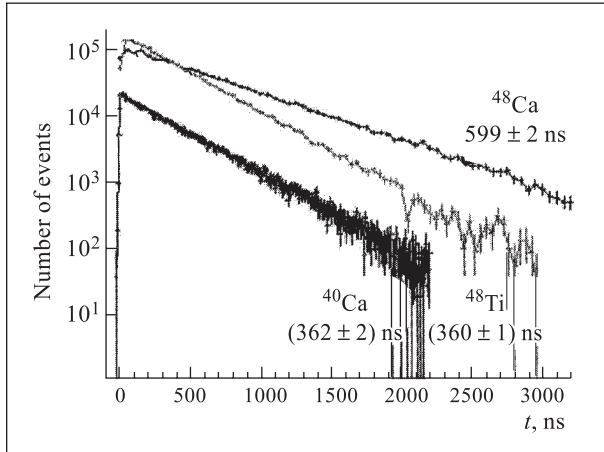


Рис. 7. Временная зависимость  $\gamma$ -линии, сопровождающей  $\mu$ -захват в мишенях  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{48}\text{Ti}$

изучения механизмов протекания реакций между легкими ядрами при более «высоких» энергиях (3–10 кэВ) по сравнению с достигнутой областью энергий. Актуальность данных исследований обусловлена необходимостью корректного сравнения полученных результатов с результатами вычислений и экспериментов, выполненных с использованием классических ускорителей [20].

Разработаны и созданы разнообразные методики для исследования процесса формирования инверсного  $Z$ -пинча и измерения энергетического распределения ионов в лайнере. Информация о лайнере крайне важна для правильной интерпретации полученных экспериментальных результатов, так как зависимость сечения ядерных реакций от энергии столкновения в указанной области энергий носит экспоненциальный характер. Результаты тестовых испытаний свидетельствуют о применимости методики для получения корректной информации об энергетическом распределении ионов, падающих на мишень. В НИИЯФ ТГУ (Томск) параллельно с работами в ИСЭ СО РАН проводятся исследования по генерации встречных плазменных потоков для изучения  $dd$ -,  $pd$ - и  $d^3\text{He}$ -реакций в астрофизической области энергий. Полученные к настоящему времени результаты свидетельствуют о перспективности предложенного метода генерации интенсивных встречных плазменных потоков с энергией больше 3 кэВ [21].

В 2004 г. запланировано проведение эксперимента на ускорителе МИГ по исследованию  $pd$ -реакции в интервале энергий столкновения протонов с дейтронами 3–10 кэВ, также будет проведено исследование  $dd$ -реакции с использованием встречных плазменных потоков дейтерия в интервале энергий 3–6 кэВ.

На спектрометре ANKE (COSY, Юлих) была проанализирована энергетическая зависимость [22] дифференциального сечения развала дейтрона  $p +$

$d \rightarrow (pp) + n$  с испусканием вперед протонной пары с относительной энергией меньше 3 МэВ. Была использована теоретическая модель, учитывающая однопартонный обмен, возбуждение  $\Delta$ -изобары и однократное рассеяние. Показана сильная зависимость вычисляемых сечений от вида используемого  $NN$ -потенциала. Наблюдаемая зависимость воспроизводится [23] лишь при использовании более современного боннского потенциала. Более детальный анализ эксперимента будет проведен в 2004 г. после полной обработки данных, полученных коллаборацией ANKE в экспериментах на COSY.

Цель проекта «Катализ» — изучение физических проблем ядерных реакций мюонного катализа. В 2003 г. были завершены измерения скорости цикла мюонного катализа в смеси изотопов водорода  $\mu \rightarrow \mu + D/T \rightarrow t\mu \rightarrow dt\mu \rightarrow ^4\text{He} + n + \mu$ . Были измерены зависимости скорости цикла в газовой смеси от температуры ( $T = 45\text{--}800$  К), от плотности ( $\phi = 0,2\text{--}0,9$  от плотности жидкого водорода), от концентрации трития ( $C_t = 17\text{--}80\%$ ).

В рамках проекта «Мюон» были выполнены измерения магнитного момента отрицательного мюона в  $1S$ -состоянии в различных атомах. Релятивистское движение отрицательного мюона, находящегося на  $1S$ -орбите атома, приводит к отличию его магнитного момента от магнитного момента свободного мюона. До настоящего времени было выполнено всего три эксперимента по измерению магнитного момента отрицательного мюона в связанном состоянии. Результаты указанных измерений для легких элементов согласуются с ранее полученными значениями магнитного момента отрицательного мюона в легких элементах. В случае тяжелых элементов (Zn, Cd) обнаружено существенное отклонение от теоретических расчетов.

Продолжалось изучение конденсированных сред  $\mu\text{SR}$ -методом. Эксперименты с кремнием были направлены на изучение влияния примесей на скорость релаксации магнитного момента акцепторного центра. Были выполнены измерения более 20 образцов с различными концентрациями примесей  $p$ - и  $n$ -типа. Впервые определена, в предположении изотропного сверхтонкого взаимодействия, константа сверхтонкого взаимодействия в акцепторном центре, образованном атомом Al в Si:  $A/h(^{27}\text{Al}) = (-2,2 \pm 0,2)$  МГц.

Установлено, что в кремнии с изоэлектронной примесью релаксация магнитного момента акцепторного центра при  $T < 50$  К обусловлена спин-решеточным взаимодействием и скорость релаксации зависит от температуры как  $\nu \sim T^q$ ,  $q \approx 3$ . В вырожденном кремнии при  $T < 30$  К релаксация магнитного момента акцептора практически определяется спин-обменным рассеянием свободных носителей заряда. Получены оценки для эффективных сечений спин-обменного рассеяния дырок ( $\sigma_h$ ) и электронов ( $\sigma_e$ ) на акцепторном центре Al в Si:



$\sigma_h \sim 10^{-13} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_e \sim 8 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  при концентрации акцепторной (донорной) примеси  $n_a$  ( $n_d$ )  $\sim 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Было продолжено изучение систем с «тяжелыми фермионами» с помощью положительных мюонов. При температуре ниже 0,4 К было обнаружено резкое увеличение скорости деполяризации спина мюона, которое может интерпретироваться как образование квазистатического упорядочения магнитных моментов электронного происхождения, предположительно со случайным распределением (спиновое стекло). Наблюдался сдвиг частоты прецессии спина мюона во внешнем магнитном поле. Этот факт может быть объяснен увеличением суммарного магнитного момента «суперпарамагнитного» куба, образованного 8 атомами Се и их ферромагнитным упорядочением с понижением температуры [24].

Завершается анализ данных, набранных уникальным спектрометром РИВЕТА [25]. Объем данных РИВЕТА на два порядка превышает мировой для редких распадов пионов и мюонов в каналах  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ ,  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ ,  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu \gamma$  и  $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu \bar{\nu} \gamma$ . Статистика приведена в табл. 1.

Таблица 1

Распад	Данные РИВЕТА	Мировые данные
$\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$	> 50 К событий	1,77 К событий
$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$	> 580 М событий	0,35 М событий
$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu \gamma$	> 60 К событий	1,35 К событий
$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu \bar{\nu} \gamma$	> 500 К событий	8,5 К событий

Предварительная оценка относительной вероятности пионного  $\beta$ -распада  $BR \approx (1,038 \pm 0,004(\text{стат.}) \pm 0,007(\text{сист.})) \cdot 10^{-8}$ . Согласно данным PDG предсказание стандартной модели  $BR = (1,038-1,041) \cdot 10^{-8}$  (при уровне достоверности 90%). В предыдущих измерениях было найдено, что  $BR = (1,026 \pm 0,039) \cdot 10^{-8}$ . Продолжается работа по наиболее точному определению фактора, обуславливающего систематические ошибки. Было зарегистрировано более 50000 событий радиоактивного распада пиона  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu \gamma$ . На основе этих данных было определено значение пионного аксиального формфактора  $F_A = 0,0123(4)$ . Теоретически радиоактивный пионный распад определяется двумя электрослабыми формфакторами, аксиальным ( $F_A$ ) и векторным ( $F_V$ ). В стандартной модели согласно гипотезе CVC  $F_V$  определяется временем жизни  $\pi^0$  и равен  $0,0259(5)$ . После фитирования экспериментальных данных для формфакторов было получено  $F_V = 0,0139(10)$ . Рассогласование со стандартной моделью составляет более 12 ошибок. Для набранных данных (рис. 8) можно получить удовлетворительный результат после фитирования, если предположить существование вклада тензорного взаимодействия в радиоактивный пионный распад с тензорным формфактором  $F_T \approx -0,0022(4)$ . Хорошо известно, что тензорное взаимодействие отсут-

ствует в стандартной модели и окончательное значение  $F_T = -0,0017 \pm 0,0001$  — прямое указание на выход за рамки стандартной модели.

При энергии позитрона и фотона более 10 МэВ и угле между ними  $\theta_{\gamma e} > 40^\circ$  было зарегистрировано более 80000 событий радиоактивного мюонного распада  $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu \bar{\nu} \gamma$ . Эти данные хорошо согласуются со стандартной моделью. Получена относительная вероятность распада  $\Gamma_{\mu \rightarrow \nu \nu \gamma} \approx (2,563 \pm 0,050(\text{стат.}) \pm 0,050(\text{сист.})) \cdot 10^{-2}$ . Значение из стандартной модели  $\Gamma_{\mu \rightarrow \nu \nu \gamma} \approx 2,584 \cdot 10^{-2}$ .

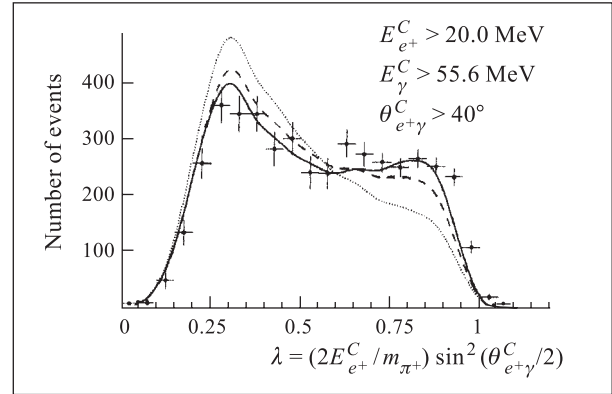


Рис. 8. Спектр кинематической переменной  $\lambda$  в распаде  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu \gamma$ : точечная кривая — фитирование с пионным формфактором  $F_V$ , зафиксированным CVC-гипотезой,  $F_A$  взят из данных 2002 г.; штриховая кривая — фитирование с  $F_V$  и  $F_A$  как со свободными константами и с  $F_T = 0$ ; сплошная кривая — фитирование с  $F_V$ , зафиксированным CVC-гипотезой, и произвольными  $F_A$  и  $F_T$

В связи с неординарной ситуацией с радиоактивным пионным распадом коллаборация РИВЕТА в 2004 г. планирует новые точные исследования радиоактивного пионного распада с интенсивностью пионного пучка  $\sim 0,1$  МГц. С такой интенсивностью фон будет подавлен более чем на один порядок и составит 1–3% по сравнению с распадом. В 2004 г. необходимо провести подготовку детектора для новых запусков. Детектор будет испытан в пучке пионов и космических лучей.

**DUBTO** — совместный ОИЯИ–INFN проект по изучению пион-ядерных взаимодействий при энергиях ниже  $\Delta$ -резонанса. Используемая экспериментальная установка «Стример» [26] — наполненная гелием самошунтирующаяся стримерная камера в магнитном поле, оснащенная двумя видеокамерами с ПЗС-матрицами для видеорегистрации ядерных событий, происходящих в объеме камеры. Самошунтирующаяся стримерная камера служит одновременно тонкой мишенью и управляемым трековым детектором и позволяет получать следы вторичных заряженных частиц с очень низкой энергией (так, например, в  $^4\text{He}$  при атмосферном давлении длины следов протона с энергией 1,5 МэВ и  $\alpha$ -частицы с энергией 5,0 МэВ превышают 20 см). Эта техника была со-

здана в 70-е гг. в ЛЯП ОИЯИ совместно с туринской секцией INFN.

В эксперименте DUBTO стримерная камера была размещена на пионном пучке фазотрона ЛЯП ОИЯИ, интенсивность пучка составляла  $(1-5) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  при импульсе пионов 218 МэВ/с. Параметры пучка и параметры системы набора данных позволили получить около 20000 стереоизображений реакции пионов с ядрами гелия при энергии пионов в пучке 218 МэВ/с.

Одна из задач эксперимента — получить информацию об инвариантной массе  $\pi NN$  при низких энергиях, где влияние  $\Delta$ -резонанса мало, что можно выполнить, определяя инвариантную массу рассеянного пиона и двух вторичных нейтронов в 3-лучевой реакции развала  $\pi^{\pm 4}\text{He} \rightarrow \pi^+ 2p 2n$ . Для идентификации этой реакции была применена искусственная нейронная сеть (ANN).

Измерение событий реакции  $\pi^{\pm 4}\text{He} \rightarrow \pi^+ 2p 2n$  позволило выделить свыше 100 событий, удовлетворяющих условию взаимодействия двух нейтронов в конечном состоянии, для которых распределение инвариантных масс  $\pi NN$  (рис. 9) проявляет резонансное поведение и имеет максимум в районе 2,07 ГэВ. Аналогичный результат был получен в протон-протонном взаимодействии при энергии 920 МэВ в ИТЭФ [27].

Другой 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  $^4\text{He}$ , т. е. впервые удалось наблюдать тормозное излучение пионов на гелии и определить его относительную вероятность (см. табл. 2).

В 2004 г. коллаборация планирует провести два сеанса на фазотроне ОИЯИ при энергии пионов 70 МэВ для получения данных о различных каналах  $\pi^{\pm 4}\text{He}$ -взаимодействия при низких энергиях, завершить обработку данных о  $\pi^{\pm 4}\text{He}$ -взаимодействиях при энергии 100 МэВ и подготовить к публикации статьи на эту тему.

Целью проекта «Аэрогель» является разработка и усовершенствование технологии производства образцов аэрогеля диоксида кремния, создание на их основе аэрогельных черенковских счетчиков широкого применения в области физики промежуточных и высоких энергий и исследование их параметров и

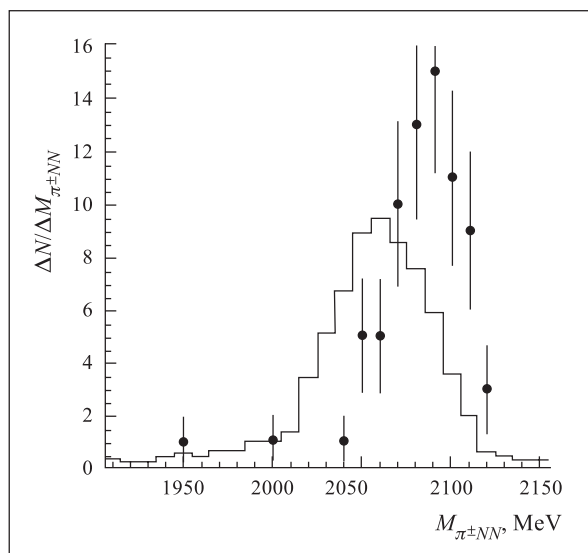


Рис. 9. Распределение инвариантных масс  $\pi^{\pm} NN$ : гистограмма — моделирование; темные кружки — эксперимент

характеристик. Совершенствовалась технология производства образцов аэрогеля, главным образом с низким показателем преломления ( $n \leq 1,02$ ) [28].

Совместно с ИТЭФ и ЛВЭ изучались характеристики аэрогелей (полученных в ЛЯП) в космических лучах и на ускорителях. Выход фотоэлектронов в образцах с  $n = 1,06-1,03$  (при толщине 6 см) составлял 5–6 на событие при 97%-й эффективности регистрации пионов, что сравнимо с данными, полученными на образцах из Новосибирска и Японии.

В 2004 г. планируется дальнейшее развитие технологии производства образцов аэрогеля с низким показателем преломления: увеличение выхода образцов и улучшение их оптических свойств (прозрачность, оптическая однородность). Будет проведена автоматизация системы управления давлением на 1-литровом автоклаве.

В рамках проекта FAMILON была проведена модернизация магнитного спектрометра. В ПИЯФ изготовлены новые пропорциональные камеры с координатным съемом информации, система считывания информации и программное обеспечение. В ОИЯИ проведена модернизация тракта пучка поверхностных мюонов. В ИТЭФ созданы программы моделирования установки методом Монте-Карло и программа off-line обработки экспериментального материала.

Таблица 2

Реакция	Относительная вероятность	
	1980 г.	2003 г.
$\pi^{\pm 4}\text{He} \rightarrow \pi^+ ^4\text{He}$	$0,588 \pm 0,076$	$0,380 \pm 0,021 + 0,049 - 0,043$
$\pi^{\pm 4}\text{He} \rightarrow \pi^+ ^4\text{He}\gamma$	—	$0,322 \pm 0,019 + 0,112 - 0,026$
$\pi^{\pm 4}\text{He} \rightarrow \pi^+ ^4\text{He}n$	$0,240 \pm 0,038$	$0,136 \pm 0,013 + 0,025 - 0,018$
$\pi^{\pm 4}\text{He} \rightarrow \pi^+ ^4\text{He}p$	$0,176 \pm 0,053$	$0,162 \pm 0,014 + 0,000 - 0,000$

В 2001 г. рабочий вариант установки был смонтирован на мюонном тракте фазотрона ЛЯП ОИЯИ. Тестовые эксперименты на установке FAMILON проведены в мае–июне 2001 г. В 2002–2003 гг. на пучках поверхностных мюонов синхротрона ПИЯФ и фазотрона ЛЯП ОИЯИ проведены испытания новых элементов аппаратуры установки (пропорциональных камер, плоскопараллельных лавинных детекторов) для достижения энергетического разрешения установки FAMILON на уровне  $10^{-3}$ .

Для уменьшения энергетического разброса при определении потери энергии позитрона в элементах установки предложено использовать активную мишень на основе плоскопараллельных лавинных детекторов. В ПИЯФ разработан и изготовлен про-

тотип активной мишени, состоящий из четырех детекторов размером  $60 \times 60$  мм. В ноябре 2002 г. и июне 2003 г. на пучке поверхностных мезонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ проведено исследование работы детектора. Показана возможность определения точки останова мюона в активной мишени исходя из анализа амплитуды сигнала с лавинных детекторов. продемонстрирована высокая эффективность регистрации медленных мюонов (98,5 % на плато по напряжению) плоскопараллельными лавинными детекторами.

В 2004 г. будет построена новая система считывания информации для пропорциональных камер, будет проведено ее тестирование и запуск на фазотроне ОИЯИ.

## РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Целью проекта «Фаза» является изучение тепловой мультифрагментации. Это новый, многотельный тип распада горячих ядер, взрывоподобный процесс, сопровождающийся множественной эмиссией фрагментов промежуточной массы (ФПМ,  $2 < Z < 20$ ). Горячие ядра образуются как спектаторы мишени в соударениях легких релятивистских ионов с тяжелыми ядрами. В экспериментах используется 4π-установка «Фаза» на выведенном пучке нукло-трона ОИЯИ.

Доказано [29], что тепловая мультифрагментация является новым ядерным фазовым переходом (первого рода), «жидкость–туман», происходящим при  $T_f = 5–7$  МэВ. Горячее ядро, расширяясь за счет теплового давления, попадает в область фазовой неустойчивости (спинодальная область). В результате флуктуаций плотности гомогенная ядерная система распадается на ансамбль, состоящий из капелек (ФПМ) и ядерного газа (нуклоны). Это «ядерный туман», который разлетается под действием кулоновских сил и регистрируется как мультифрагментация. Физическим основанием аналогии между ядерным веществом и классической жидкостью, приводящей к появлению спинодальной области, является сходство молекулярных и ядерных сил в зависимости от расстояния. Молекулы, сближаясь, испытывают притяжение, которое затем сменяется отталкиванием (силы Ван-дер-Ваальса). Ядерные силы имеют подобное поведение, хотя и в совершенно иной шкале энергий и расстояний. В результате «уравнения состояния» получаются весьма похожими. Вместе с тем фазовый переход «жидкость–туман» — специфически ядерный, и его характеристики обусловлены зарядом системы.

В пользу такого сценария говорят четыре основных наблюдения: пороговый характер явления; пониженная плотность системы в момент развала:  $\rho_f \approx (1/3–1/4)\rho_0$ ; малое время жизни горячего ядра, которое порядка характерного времени флуктуаций плотности ( $\approx 50$  фм/с); характеристическая температура  $T_f$ , существенно меньшая, чем  $T_c$  — критическая температура для фазового перехода «жидкость–газ».

Другой тип ядерного фазового перехода (уже второго рода), «жидкость–газ», ожидается при более высокой температуре. Вершиной спинодальной области является особая точка — критическая температура  $T_c$  фазового перехода «жидкость–газ». В критической точке жидкая и газовая фазы становятся идентичными, граница раздела между ними исчезает, коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma_s(T)$  обращается в нуль. При  $T > T_c$  существует только газовая фаза.

В соответствии со статистической моделью мультифрагментации (SMM) выход фрагментов, их распределение по заряду  $Y(Z)$  существенно зависят от вклада поверхностной энергии в энтропию конечного состояния процесса. Это дает возможность определить  $T_c$  из вида  $Y(Z)$ . Для этого зарядовое распределение ФПМ из соударений  $p(8,1 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$  было проанализировано в рамках SMM с критической температурой  $T_c$  в качестве свободного параметра. На рис. 10, а показаны измеренное зарядовое распределение фрагментов из соударений  $p(8,1 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$  и расчетные зарядовые распределения для трех значений критической температуры:  $T_c = 7, 11$  и  $18$  МэВ. Результаты расчетов близки к результатам эксперимента при  $T_c = 18$  МэВ. За-

рядовое распределение фрагментов хорошо аппроксимируется степенным законом  $Y(Z) \sim Z^{-\tau_{app}}$ , это видно из рис. 10, б. Подобный результат получен и для соударений  $p(3,6 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$ .

Из условия наилучшего согласия эксперимента с модельными предсказаниями найдено, что критическая температура для ядерного фазового перехода «жидкость–газ» равна  $T_c = (17 \pm 2) \text{ МэВ}$ . Безусловно, полученное значение  $T_c$  модельно-зависимо, однако оно представляет первым достаточно надежным определением этого важного параметра, поскольку использованная модель хорошо описывает большой набор данных по мультифрагментации.

В 2004 г. будет проведено исследование эволюции механизма тепловой мультифрагментации с увеличением массы бомбардирующей частицы (от протонов до ядер неона), а также определение природы коллективного потока в процессе эмиссии фрагментов, который наблюдается для пучков частиц более тяжелых, чем гелий. Данные по множественности фрагментов, их зарядовым и энергетическим распределениям, а также угловым и скоростным корреляциям будут использоваться для получения новой ин-

формации о фазовом переходе «жидкость–туман». Будет проведено исследование динамики расширения горячего ядра под действием теплового давления и сжатия, измерение среднего времени расширения. Идея метода этого измерения уже разрабатывается и представляется вполне реалистической.

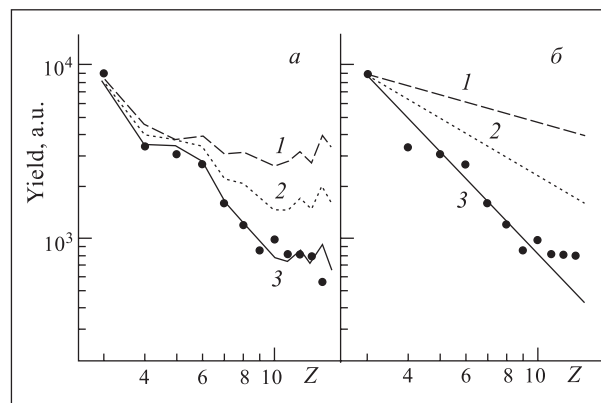


Рис. 10. Зарядовое распределение фрагментов для соударений  $p(8,1 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$  (точки): а) линии получены в модельном расчете в предположении, что  $T_c = 7$  (1), 11 (2) и 18 (3) МэВ; б) аппроксимация степенным законом

## НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках темы «**Физика и техника ускорителей заряженных частиц**» в ЛЯП ОИЯИ в 2001 г. начато сооружение накопителя **LEPТА** с системой электронного охлаждения. Совместно с научными центрами GANIL (Кан, Франция), GSI (Дармштадт, Германия), BNL (Аптон, США) был разработан специальный пакет программ для расчета процесса электронного охлаждения и динамики заряженных частиц в накопительных кольцах и фокусирующих каналах. Совместные исследования стабильности ионного пучка в процессе электронного охлаждения были проведены на протонном синхротроне с перезарядной инжекцией COSY (Юлих, Германия).

Была 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 проведение прямого сравнения электрических зарядов электрона и позитрона, измерение времени жизни орто- и парапозитрония, спектроскопия позитрония.

В 2004 г. будет продолжено развитие программного обеспечения для расчета процесса электронного охлаждения и динамики заряженных частиц в

накопительных кольцах RHIC (BNL), HESR (GSI), IR (RIKEN), LSR (ICR, Университет Киото). В процессе рассмотрения находятся разработка проектов систем электронного охлаждения нуклотрона (ОИЯИ), ТВН (ИТЭФ, Москва), IR (RIKEN, Япония) и NIRS (Тиба, Япония), вопросы создания и тестирования их элементов.

В 2004 г. будет произведен запуск накопителя **LEPТА** и проведены первые эксперименты с циркулирующим электронным пучком, будет завершено создание инжектора позитронов. Предполагается дальнейшее развитие программного обеспечения для расчета нелинейной динамики движения заряженных частиц в накопителях с жесткой связью поперечных степеней свободы. Будет осуществлена постановка экспериментов с электронным охлаждением позитронов, генерацией и изучением позитрония. В дальнейшем на основе проекта **LEPТА** предполагается разработка технического проекта генерации пучка атомов антиводорода на антипротонном накопителе.

Основной целью проекта «**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 заболеваний на медицинских адронных пучках фазотрона ОИЯИ.

В течение 2003 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 заболеваний на пучках фазотрона ОИЯИ в процедурной кабине №1 МТК. На медицинском протонном пучке курс фракционированного лучевого лечения прошли 95 пациентов (143 облученных мишени), при этом общее количество протонных терапевтических облучений превысило 2000. Еще 55 пациентов были пролечены на гамма-аппарате «Рокус-М» (более 1600 лучевых сеансов).

Для выведенного в первую процедурную кабину терапевтического протонного пучка с энергией 170 МэВ с резким спадом дозы за пиком Брэгга были разработаны и изготовлены формирующие устройства — гребенчатые фильтры. Фильтры позволяют получать пучок с плоским максимумом на глубинно-дозовом распределении длиной от 8 до 60 мм в зависимости от протяженности конкретной мишени. Все дозиметрические параметры сформированного пучка были измерены и введены в систему планирования трехмерной конформной протонной лучевой терапии, что позволило использовать его в сеансах радиотерапии.

С целью сокращения времени, затрачиваемого на проверку положения пациента относительно протонного пучка во время сеансов радиотерапии, а также повышения точности этой проверки была приобретена и введена в эксплуатацию автоматическая проявочная машина рентгеновских снимков. Для повышения качества проводимой радиотерапии разработана, изготовлена и введена в эксплуатацию система измерения основных параметров протонного пучка (симметрии и однородности в поперечном сечении, а также пробега пучка) в реальном времени непосредственно во время облучения пациентов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abreu P. et al. (DELPHI Collab.) // Phys. Lett. B. 2003. V. 565. P. 61.*
2. *Abreu P. et al. (DELPHI Collab.). CERN Preprint EP 2003-058; Eur. Phys. J. (submitted).*
3. *Astier P. et al. // Phys. Lett. B. 2003. V. 570. P. 19.*
4. *Astier P. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 515. P. 800.*

5. *Adeva B. et al. // Nucl. Instr. Meth. A (in press); hep-ex/00305022;*  
*Santamarina C. et al. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2003. V. 36. P. 4273.*
6. *Bauer F. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 478. P. 153.*
7. *Budagov J. et al. JINR, E1-2003-22. Dubna, 2003. 36 p.*
8. *Kulchitsky Y. et al. // Part. Nucl., Lett. 2003. No. 2[117]. P. 52–70.*
9. *Alexa C. et al. // Eur. Phys. J. C. 2003. V. 28. P. 297.*
10. *Kulchitsky Y., Vinogradov V. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 502, No. 2–3. P. 708; P. 775.*
11. *Bellettini G. et al. CDF-6313; CDF-6770. 2003;*  
*Ashmanskas W. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 501. P. 201;*  
*Artikov A. et al. Intermediate Angle Muon Detectors for CDF II // Nucl. Instr. Meth. A. (submitted).*
12. *Catanesi M. G. et al. CERN-SPSC/99-35; SPSC/P315; CERN-SPSC-2003-024; SPSC-M-704. 2003.*
13. *Bogomilov M. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 508. P. 152.*
14. *Русакевич Н. Л., Флягин В. Б. // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1, №1(118). С. 50.*
15. *Ohsumi H. (NEMO Collab.) // Nucl. Phys. A. 2003. V. 721. P. 529;*  
*Vasiliev V., Marquet Ch., Ohsumi H. (NEMO Collab.) First Results from the NEMO-3 Double Beta Decay Experiment // Proc. of the 1st Yamada Symp. on Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics, Nara, Japan, June 9–14, 2003;*  
*Kochetov O. (NEMO Collab.) First Results from the NEMO-3 Experiment // Proc. of the IV Intern. NANP Conf., Dubna, Russia, June 23–28, 2003 (in press).*
16. *Brudanin V. B. et al. // Izv. RAN. Ser. fiz. 2003. V. 67, No. 5. P. 618.*
17. *Briançon Ch. et al. // Nucl. Phys. A. 2000. V. 671. P. 647.*
18. *Shitov Yu. et al. // Nucl. Phys. A. 2002. V. 699. P. 917.*
19. *Briançon Ch. et al. PSI experiment R-02-02.*
20. *Bystritsky V. M. et al. // Phys. At. Nucl. 2003. V. 66. P. 75; P. 1731.*
21. *Dudkin G. N. et al. // Phys. Rev. 2003. V. 29. P. 714.*
22. *Komarov V. et al. // Phys. Lett. B. 2003. V. 553. P. 179.*
23. *Uzikov Yu. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2002. V. 28. P. B13;*  
*Haidenbauer J., Uzikov Yu. // Phys. Lett. B. 2003. V. 562. P. 227.*
24. *Mamedov T. N. et al. JINR Preprint E14-2001-101. Dubna, 2001; JETP Lett. 2002. V. 76, No. 7. P. 440–443; Part. Nucl. 2002. V. 33, No. 4. P. 519–536; Physica B. 2003. V. 326, No. 1–4. P. 97–104; P. 15–18;*  
*Ivanter I. G. et al. // JETP Lett. 2002. V. 77, No. 3. P. 147–148.*
25. *Фрлж Э. и др. Препринт ОИЯИ P13-2003-102. Дубна, 2003.*
26. *Andreev E. M. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 489. P. 99.*
27. *Vorobyev L. S. et al. // Phys. At. Nucl. 1998. V. 61, No. 5. P. 771–780.*
28. *Акимов Ю. К. и др. // ПТЭ. 2002. № 5. С. 55–60; 2003. № 3. С. 5–19.*
29. *Karnaikhov V. A. et al. // Phys. At. Nucl. 2003. V. 66, No. 7. P. 1282; Phys. Rev. C. 2003. V. 67. P. 011601(R).*