

ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ П.15.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, В ТОМ ЧИСЛЕ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, ВКЛЮЧАЯ ФИЗИКУ НЕЙТРИНО И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ И КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ, А ТАКЖЕ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА, ФИЗИКИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ДЕТЕКТОРОВ, СОЗДАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ, МЮОНОВ, СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В НАУКЕ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МЕДИЦИНЕ

Программа П.15.1. Фундаментальные проблемы физики элементарных частиц и космологии: теория и эксперимент (координатор член-корр. РАН А. Е. Бондарь)

С участием Института ядерной физики им. Г. И. Будкера был подготовлен и проведен эксперимент MEG (Швейцария) по поиску безнейтринного распада положительного мюона на позитрон и гамма-квант, который нарушает закон сохранения лептонного числа. В эксперименте MEG получены рекордные скорость остановки мюонов в тонкой мишени и чувствительность и избирательность детектора к искомому процессу по отношению к фоновым. В результате установлен верхний предел на вероятность распада $5,7 \times 10^{-13}$, который в 20 раз улучшает лучший предыдущий экспериментальный результат и является одним из наиболее сильных ограничений на выходящие за рамки Стандартной модели теории.

В эксперименте с детектором КЕДР (рис. 42, 43) на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН с лучшей в мире точностью 0,65 % измерено отношение



Рис. 42. Детектор КЕДР в частично разобранном состоянии.

лептонных ширин в прямых распадах J/ψ -мезона (джипси-мезона).

В этом же Институте впервые показано, что во времениподобной области, вблизи порога рождения нуклон-антинуклонной пары, изоскалярный формфактор нуклона много больше изовекторного. Для пар частиц, родившихся вблизи порога реакции при аннигиляции электрона и позитрона, существенным фактором, влияющим на сечение, является взаимодействие в конечном состоянии. Это особенно актуально для рождения пар протон-антипротон и нейтрон-антинейтрон, взаимодействие между которыми является сильным. Также впервые показано, что сильное отталкивание между нуклоном и антинуклоном в триплетном состоянии в изовекторном канале сильно подавляет сечение рождения, что автоматически означает подавление изовекторных

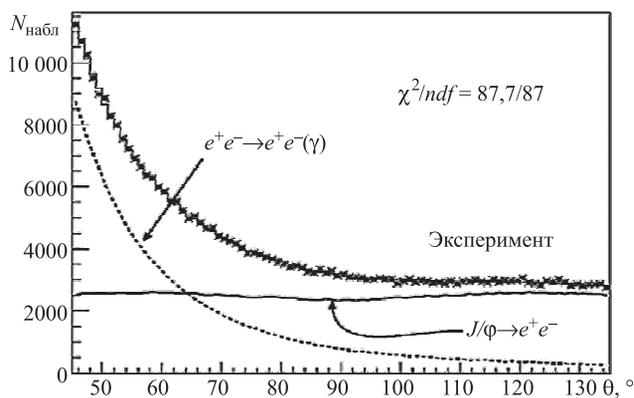


Рис. 43. Разделение событий $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ и электромагнитного фона с помощью гистограммы распределения по углу рассеяния электрона процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$.

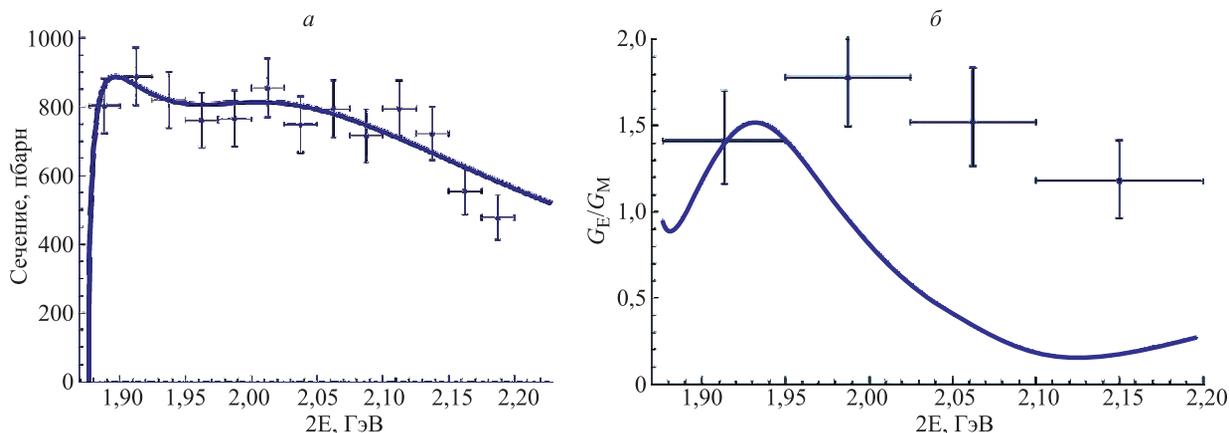


Рис. 44. Зависимости от энергии изоскалярного сечения и экспериментальных данных (а) и отношения формфакторов и экспериментальных данных (б).

формфакторов нуклона. Наличие только одного канала сильно упрощает амплитуду реакции и позволяет очень хорошо воспроизвести спектр протонов и отношение электрического и магнитного формфакторов протона (рис. 44).

Кроме того, естественным образом объясняется близость сечений рождения протон-антипротонных и нейтрон-антинейтронных пар, что имеет большое значение для экспериментов по изучению этих процессов.

Программа П.15.2. Электромагнитные и сильные взаимодействия при низких энергиях (координатор докт. физ.-мат. наук В. П. Дружинин)

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера в эксперименте с детектором СНД на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 в интервале энергии 1,07–2,00 ГэВ проведено изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ (рис. 45). Около 30 событий $\eta\gamma$, зарегистрированных при энергии выше 1,1 ГэВ, могут быть объяснены только распадами возбужденных векторных мезонов $\rho(1450)$ и $\phi(1680)$. При аппроксимации энергетической зависимости измеренного сечения $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ были получены величины сечений процессов $e^+e^- \rightarrow \rho(1450) \rightarrow \eta\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \phi(1680) \rightarrow \eta\gamma$ в максимумах резонансов. Это первое наблюдение радиационных распадов возбужденных состояний легких векторных мезонов. Ожидалось, что вероятности радиационных распадов могут быть вычислены с малой теоретической неопределенностью в рамках кварковой модели. Полученные в эксперименте СНД величины сечений для $\rho(1450)$ и $\phi(1680)$ в несколько раз превышают имеющиеся теоретические расчеты.

В этом же Институте в эксперименте с детектором КМД-3 на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 с лучшей в мире точностью измерено anomальное поведение сечения

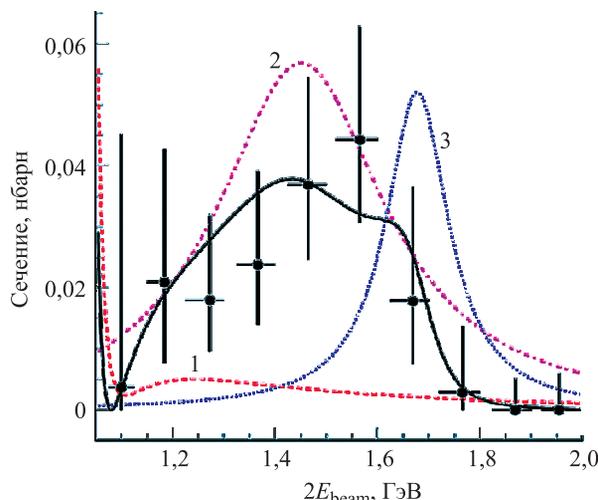


Рис 45. Энергетическая зависимость сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$. Точки с ошибками – измерение СНД. Сплошная линия – аппроксимация сечения с учетом вкладов легких векторных мезонов $\rho(770)$, $\omega(782)$, $\phi(1020)$ и их радиальных возбуждений $\rho(1450)$ и $\phi(1680)$. Отдельно показаны вклады $\rho(770)$, $\omega(782)$ и $\phi(1020)$ (1), $\rho(1450)$ (2) и $\phi(1680)$ (3) без учета интерференции.

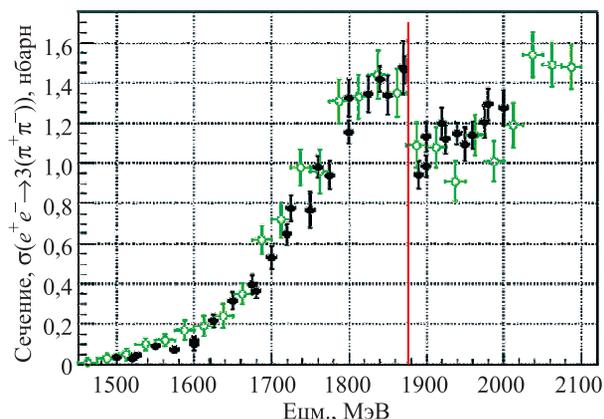


Рис. 46. Энергетическая зависимость сечения электрон-позитронной аннигиляции в шесть пионов, полученная в экспериментах КМД-3 (черные точки) и ВаBar (зеленые точки). Вертикальной линией показана энергия, соответствующая порогу рождения нуклон-антинуклонной пары.

электрон-позитронной аннигиляции в шесть пионов при энергии встречных пучков, соответствующей порогу рождения нуклон-антинуклонной пары (рис. 46). Хотя необычное поведение сечения наблюдалось в более ранних экспериментах, впервые показано, что при энергии встречных пучков, соответствующей порогу рождения нуклон-антинуклонной пары, наблюдается резкий спад сечения на ~30 %.

В эксперименте ВаBar (Стэнфорд, США) при непосредственном участии группы физиков из Института ядерной физики им. Г. И. Будкера в диапазоне энергии от порога до 6,5 ГэВ измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow p \text{ anti-}p$. За исключением узкого диапазона вблизи 4 ГэВ это самое точное на сегодня измерение сечения. Обнаружено сложное энергетическое поведение сечения: его резкое ступенеобразное уменьшение вблизи 2,2, 2,5 и 3,0 ГэВ. Такое поведение не описывается существующими теоретическими моделями. При энергии выше 4,2 ГэВ сечение и времениподобный формфактор протона измерены впервые.

Программа П.15.3. Коллайдеры и высокопроизводительные фабрики частиц (координатор докт. физ.-мат. наук Е. Б. Левичев)

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 (рис. 47) в диапазоне энергии 320–1000 МэВ в системе центра масс достиг-

нуто рекордное значение «параметра встречных пучков» “кси” и проведен эксперимент с двумя детекторами СНД и КМД-3 с рекордной интегральной светимостью (рис. 48). Исполь-

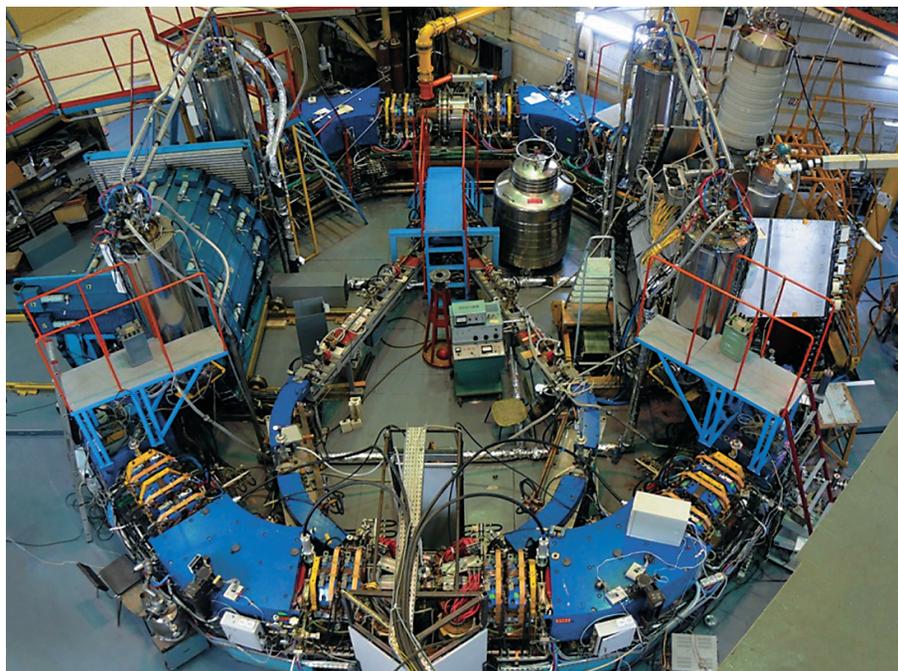


Рис. 47. Общий вид коллайдера ВЭПП-2000.

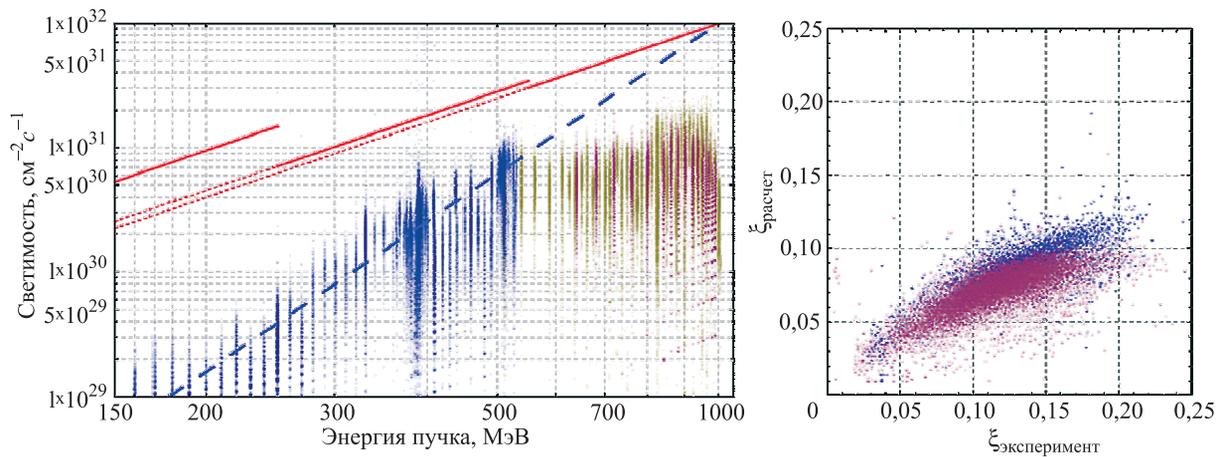


Рис. 48. Светимость ВЭПП-2000 в 2013 году (слева) и достигнутый параметр встречных пучков (справа).



Рис. 49. Подготовка стенда к приемным испытаниям в DESY.

зование концепции круглых пучков и аккуратная настройка магнитной системы позволили впервые в мире спуститься по энергии до 320 МэВ и получить пиковую светимость $1,2 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на энергии 1000 МэВ. Сдвиг частоты бетатронных колебаний, обусловленный взаимодействием с полем встречного сгустка, достигал 0,174, что соответствует значению действующего параметра встречи 0,125 на

одно место встречи и является рекордным для коллайдеров (в 2,5 раза больше чем на коллайдере ВЭПП-2М).

В том же Институте разработаны, изготовлены и запущены в эксплуатацию в лаборатории DESY (Германия) уникальные криогенные стенды (рис. 49) для испытания ускорительных модулей Европейского рентгеновского лазера на свободных электронах (XFEL).

Программа П.15.4. Физика и техника линейных ускорителей заряженных частиц (координатор член-корр. РАН П. В. Логачев)

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера осуществлен физический запуск уникального высокопроизводительного источника позитронов для ускорительных комплексов Института (рис. 50). Достигнут рекордный коэффициент конверсии электронов в позитроны, составляющий $0,14 \text{ ГэВ}^{-1}$, что примерно в 2,5 раза превосходит предыдущий рекорд, достигнутый на коллайдере PEP-II в лаборатории SLAC (Стэнфорд, США).

В этом же Институте предложена и обоснована численным моделированием схема плазменного кильватерного ускорения с контролируемой самомодуляцией длинного протонного пучка-драйвера, открывающая перспективу увеличения максимальной энергии электронных и позитронных пучков на два порядка. Найден способ, позволяющий с помо-

щью плазмы превратить длинный сгусток высокоэнергичных протонов в эквидистантную последовательность коротких (субмиллиметровых) микросгустков. Способ заключается в контролируемом возбуждении осесимметричной моды поперечной двухпоточковой неустойчивости при помощи затравочного возмущения (короткого лазерного импульса). Эти микросгустки затем создают в той же самой плазме кильватерную волну, в которой частицы другого сорта (лептоны) могут ускоряться с темпом, более чем на порядок превышающим темп ускорения в традиционных высокочастотных структурах. Предложенный способ лег в основу проекта AWAKE (ЦЕРН, Швейцария), имеющего целью впервые экспериментально продемонстрировать плазменное кильватерное ускорение с протонным драйвером.

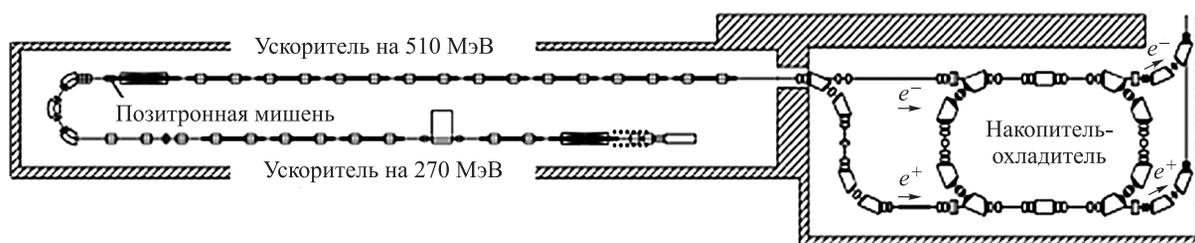


Рис. 50. Схема инжекционного комплекса в ИЯФ СО РАН.

Программа П.15.5. Генерация и использование электронных и ионных пучков для научных, технологических и медико-биологических применений (координатор член-корр. РАН В. В. Пархомчук)

На синхротроне COSY в исследовательском центре Юлих (Германия) была собрана и запущена разработанная в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера уникальная высоковольтная система электронного охлаждения с энергией электронов от 25 кэВ до 2 МэВ (рис. 51). Данная система предназначена для компенсации греющих эффектов в протонном пучке при работе на внутренней мишени во всем диапазоне энергий пучка. Первые эксперименты по охлаждению пучка протонов с энергией 200 МэВ позволили добиться как продольного, так и поперечного охлаждения. При этом система диагностики COSY позволила измерить

изменения поперечного размера пучка при охлаждении и показала, что температура протонного пучка уменьшилась в 50 раз (рис. 52).

Совместными усилиями Института ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирского государственного университета и Института катализа им. Г. К. Борескова разработана методика анализа биомедицинских образцов и проведены первые в России эксперименты по исследованию токсичности и фармакокинетики химических соединений с использованием сверхчувствительного метода анализа – ускорительной масс-спектрометрии на ускорительном масс-спектрометре ЦКП СО РАН. Метод

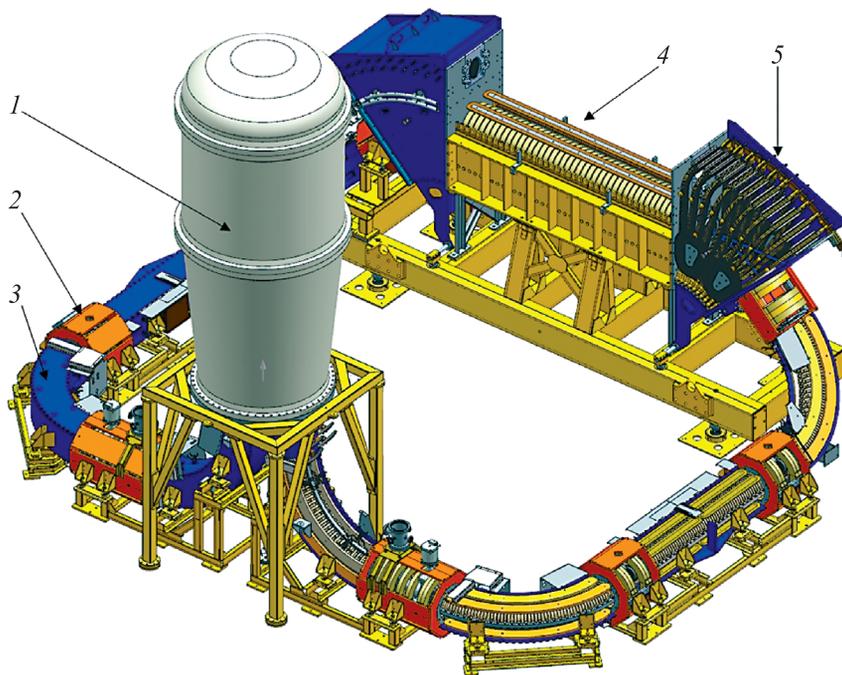


Рис. 51. Трехмерная модель 2 МэВ системы электронного охлаждения для COSY.

1 – бак с элегазом высокого давления, содержащий электронную пушку, коллектор, ускорительные трубки и систему высоковольтного питания, 2 – прямолинейные соленоиды транспортного канала, 3 – поворотные соленоиды транспортного канала, 4 – секция охлаждения, 5 – торойды.

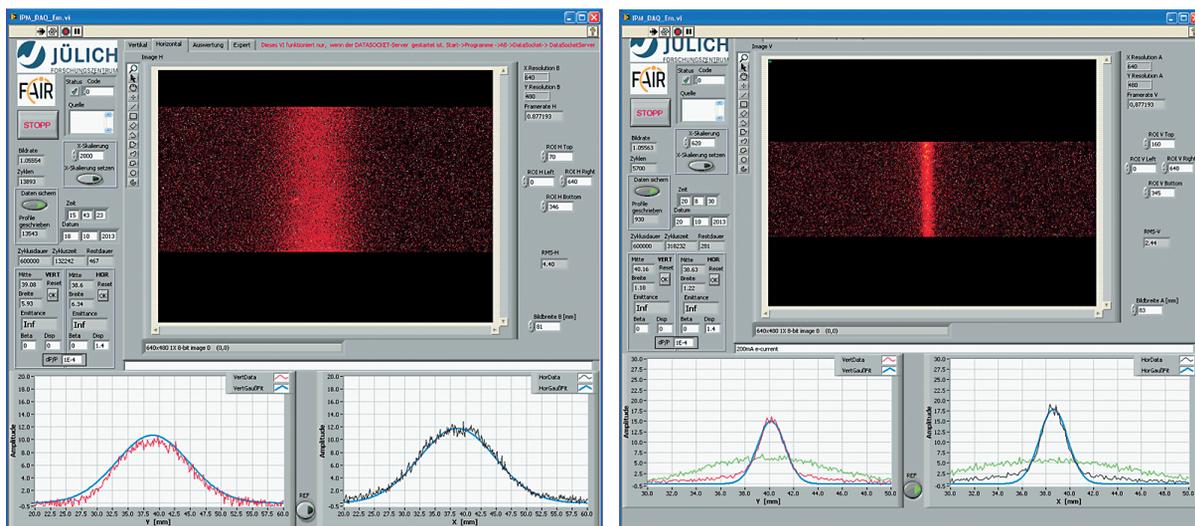


Рис. 52. Сравнение поперечного профиля протонного пучка с энергией 200 МэВ в начале (слева) и в конце (справа) цикла охлаждения.

основан на выделении и поштучном подсчете радиоуглеродных меток от вводимого в живые системы химического соединения посредством ускорительного масс-спектрометра с обдиркой ионов в мишени на парах магния и дополнительным поворотом ионов в зарядовом состо-

янии $3+$ в высоковольтном терминале ускорителя. Уникальный метод позволяет надежно выделять ионы радиоуглерода из сопутствующего изобарного фона. Методика позволила провести исследования токсичности и фармакокинетики метанола в органах лабораторных

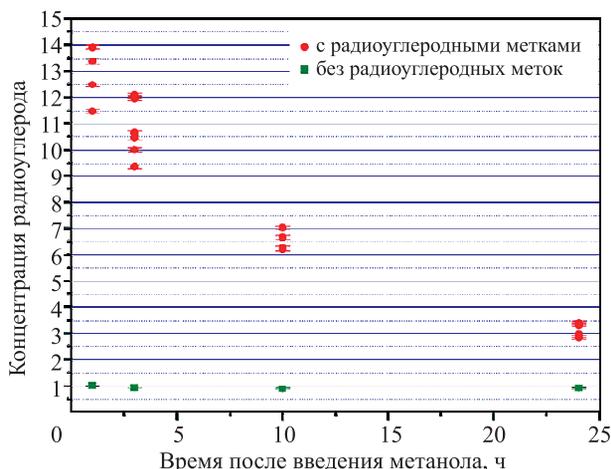


Рис. 53. Концентрация радиоуглерода в почках группы лабораторных мышей после введения метанола радиоактивностью 20 Бк и метанола без радиоуглеродных меток.

мышей при радиоактивности химического соединения 20 Бк, что соответствует естественной радиоактивности половины обычного банана (рис. 53). Полученные результаты позволяют в будущем проводить доклинические тестирования новых лекарственных средств на человеке и проводить медицинские исследования на мировом уровне.

Программа П.15.6. Физика и техника источников синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах (координатор акад. Г. Н. Кулипанов)

Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера разработаны, изготовлены и установлены в международных центрах синхротронного излучения уникальные сверхпроводящие много-

полюсные вигглеры с полем 4,2 и 7,5 Тл для генерации мощного рентгеновского излучения для биомедицинских исследований (рис. 54, 55).



Рис. 54. Сверхпроводящий 63-полюсный вигглер с рабочим полем 4,2 Тл с периодом поля 48 мм был разработан и изготовлен для австралийского синхротрона (ASHo).



Рис. 55. Сверхпроводящий 15-полюсный вигглер с полем 7,5 Тл и периодом 200 мм во время установки в центре синхротронного излучения LSU CAMD в США.