

## ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ 2.8. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

### Программа 2.8.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий (координатор акад. А. Н. Скринский)

Учеными Института ядерной физики им. Г. И. Будкера измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  в области энергии 0,75—1,0 ГэВ, причем при энергии  $2E < 0,92$  ГэВ сечение данного процесса измерено впервые. Обнаружен редкий распад  $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ , имеющий относительную вероятность  $1,6 \cdot 10^{-5}$ . Установлен верхний предел на относительную вероятность распада  $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  на уровне  $2 \cdot 10^{-4}$ , что на два порядка превосходит другие имеющиеся экспериментальные ограничения на эту величину. Полученные результаты подтвер-



Рис. 45. СНД в рабочем состоянии на коллайдере ВЭПП-2000.

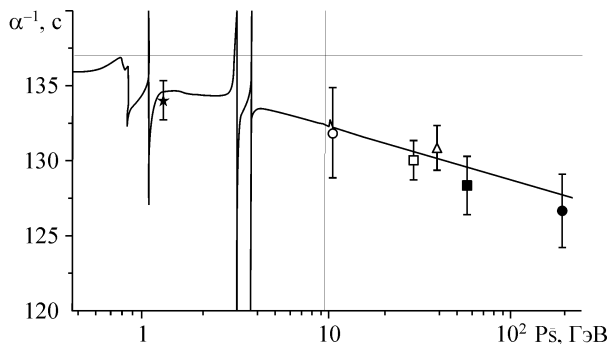


Рис. 47. Значение бегущей константы  $1/\alpha(s)$ . Результат СНД — крайняя слева точка, отмеченная звездочкой. Линия соответствует расчету.

ждают применимость модели векторной доминантности к описанию экспериментальных данных.

В этом же Институте выполнено прецизионное измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  в области энергии 1,04—1,38 ГэВ сферическим нейтронным детектором (СНД) (рис. 46). Впервые экспериментально получено значение бегущей электромагнитной константы  $\alpha(s)$  (постоянной тонкой структуры) для этой энергии:  $1/\alpha(s) = 134,1 \pm 1,3$  (рис. 47). Полученный в новосибирском эксперименте результат является важным подтверждением роста константы  $\alpha(s)$  в Стандартной модели в области, где отсутствуют результаты других измерений.

Учеными Института ядерной физики им. Г. И. Будкера в серии экспериментов с детектором «Кедр» на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М с наилучшей в мире точно-

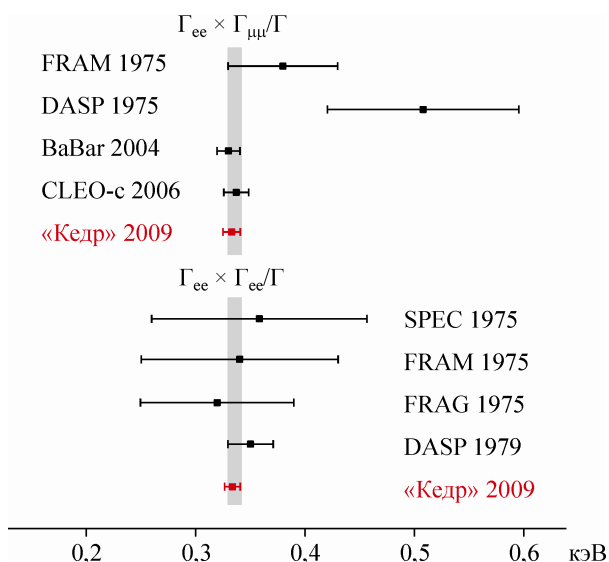
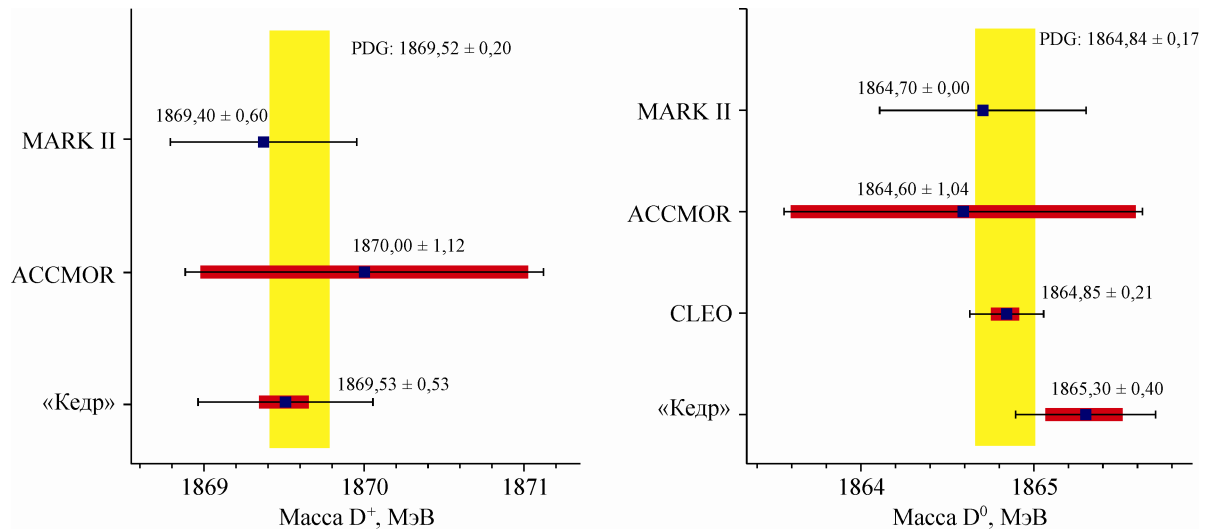


Рис. 48. Результаты измерения произведения электронной ширины  $J/\psi$ -мезона на относительную вероятность его распада в электрон-позитронную пару  $\Gamma_{ee}^* B(J/\psi \rightarrow e^+e^-)$  и пару мюонов  $\Gamma_{ee}^* B(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)$ . Для каждого измерения положение вертикальной полосы и ее ширина соответствуют табличному значению и его неопределенности до эксперимента с детектором «Кедр».



**Рис. 49.** Сравнение результатов измерения массы заряженного (слева) и нейтрального (справа) D-мезонов, полученных с детектором «Кедр», с данными других экспериментов. Положение вертикальной полосы и ее ширина соответствуют значению массы в таблицах свойств частиц (Particle Data Group) и его неопределенности.

стью измерено произведение электронной ширины  $J/\psi$ -мезона на относительную вероятность его распада в электрон-позитронную пару и пару мюонов:

$$\Gamma_{ee}^* B(J/\psi \rightarrow e+e^-) = (0,3323 \pm 0,0064 \pm 0,0048) \text{ кэВ (2,4 \%)},$$

$$\Gamma_{ee}^* B(J/\psi \rightarrow \mu+\mu^-) = (0,3318 \pm 0,0052 \pm 0,0063) \text{ кэВ (2,4 \%)}.$$

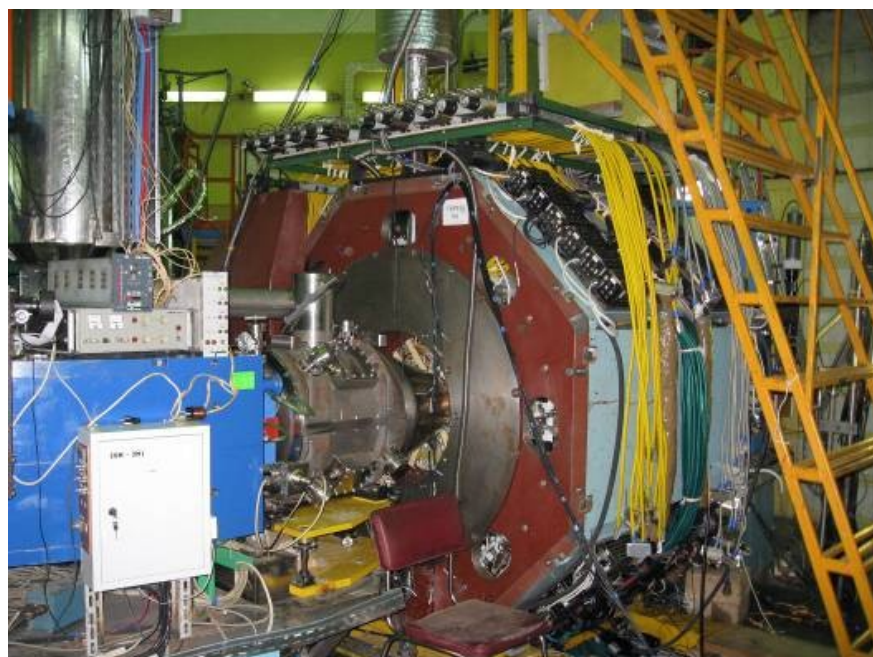
На рис. 48 приведено сравнение результатов с данными других экспериментов.

Измерены массы нейтрального и заряженного D-мезонов:

$$M_{D^+} = (1869,53 \pm 0,49 \pm 0,20) \text{ МэВ}, \quad M_{D^0} = (1865,30 \pm 0,33 \pm 0,23) \text{ МэВ}.$$

Полученный результат для массы  $D^+$ -мезона имеет лучшую в мире точность (рис. 49).

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера завершена сборка всех систем детектора КМД-3 и осуществлена его установка на место встречи пучков электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000 (рис. 50).



**Рис. 50.** Детектор КМД-3 на ВЭПП-2000.

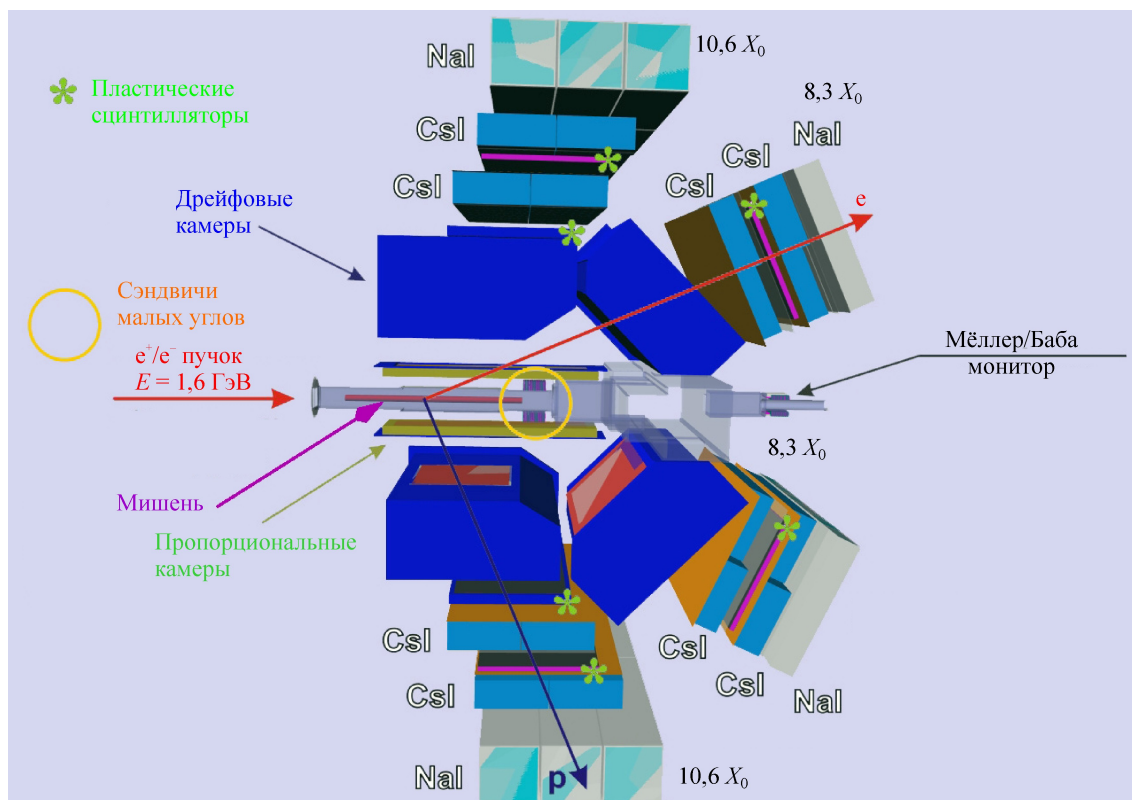
Учеными этого же Института проведено вычисление кулоновских поправок в следующем за главным логарифмическом приближении по параметру  $L = \ln \gamma_A \gamma_B$  ( $\gamma_{A,B}$  — лоренц-факторы сталкивающихся ядер). Обнаружено значительное подавление кулоновских поправок за счет вклада в сечение рождения электрон-позитронных пар событий, в которых пары

рождаются с энергией несколько электронных масс в системе покоя одного из ядер. Полученные результаты дают естественное объяснение неожиданным результатам, полученным в ЦЕРН на ускорителе SPS в экспериментах по рождению электрон-позитронных пар при столкновении релятивистских ядер.

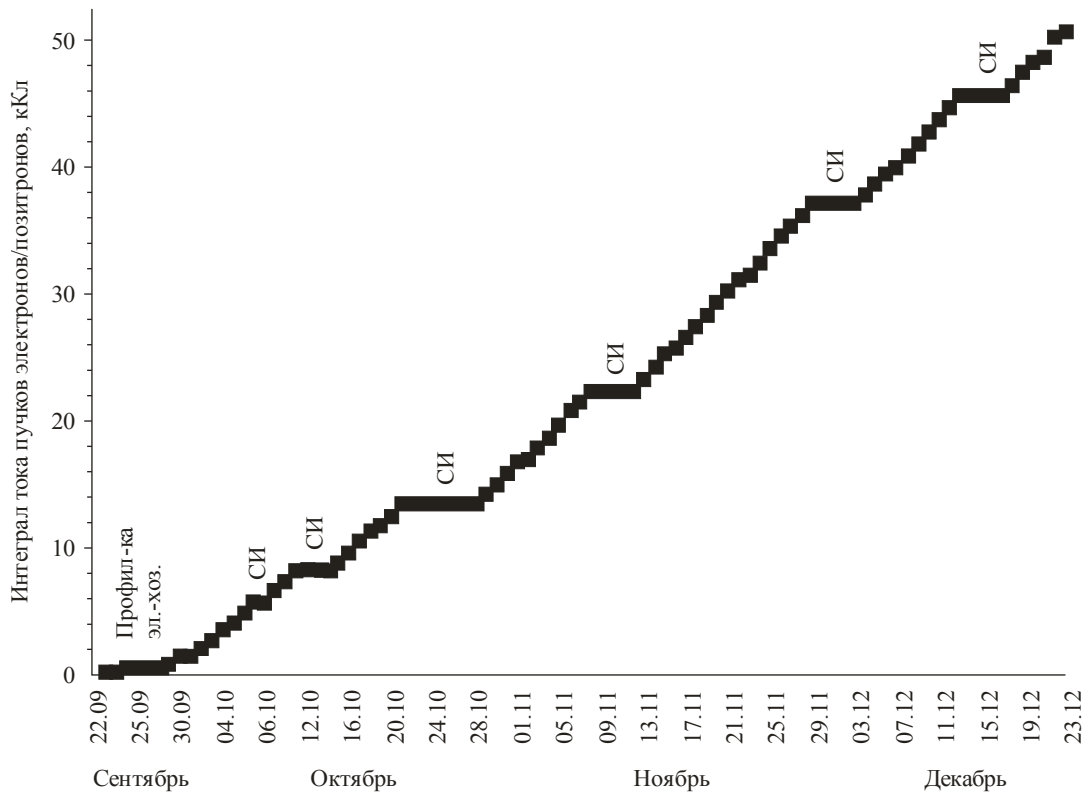
**Программа 2.8.2. Физика атомного ядра**  
(координатор докт. физ.-мат. наук В. Ф. Дмитриев)

В Институте ядерной физики им.Г. И. Будкера на накопителе ВЭПП-3 с установкой «Дейтон» (рис. 51) проведен эксперимент со сверхтонкой внутренней водородной мишенью по измерению отношения сечений рассеяния электрона и позитрона на протоне (рис. 52), позволяющий определить величину вклада двухфотонного обмена в изучаемом процессе, что, в свою очередь, может объяснить обнаружен-

ное драматическое противоречие в результатах измерения формфакторов протона, проведенных с использованием различных методик. К настоящему времени имеется единственный экспериментальный результат, полученный в середине прошлого века в ускорительной лаборатории СЛАК (США) и существенно уступающий по точности данным ИЯФ, которые будут получены.



**Рис. 51.** Схематическое изображение детектора частиц. Детектор регистрирует рассеяние электронов/позитронов с энергией 1600 МэВ на углы в областях 10, 25 и 65°. Регистрируются на совпадениях обе частицы: рассеянный электрон/позитрон (в зависимости от того, какой пучок циркулирует в накопителе) и протон отдачи. Показан случай рассеяния на средний угол (в области 25°).



**Рис. 52.** График набора интеграла тока пучков позитронов/электронов ВЭПП-3 в зависимости от времени. Пометки указывают на причину остановки набора статистики, основная из которых — плановая работа ВЭПП-3 в режиме источника синхротронного излучения.

### Программа 2.8.3. Физика и техника ускорителей заряженных частиц (координатор член-корр. РАН В. В. Пархомчук)

Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера в рамках международного сотрудничества с Институтом современной физики в г. Ланчжоу (Китай) завершено создание системы высоковольтного электронного охлаждения на энергии 400 МэВ/нуклон (рис. 53). Система полностью разработана, спроектирована и изготовлена в ИЯФ. В 2009 г. осуществлены запуск и успешные испытания установки в ИСФ на пучке ионов углерода (рис. 54). Использование «охлажденных» ионных пучков открывает новые перспективы для развития радиационной терапии онкологических заболеваний. В частности, существенно увеличивается максимально достижимая интенсивность ионного пучка, появляется возможность реализации уникальных схем выпуска ионного пучка из ускорителя, что в итоге позволяет значительно улучшить качество терапевтического пучка.

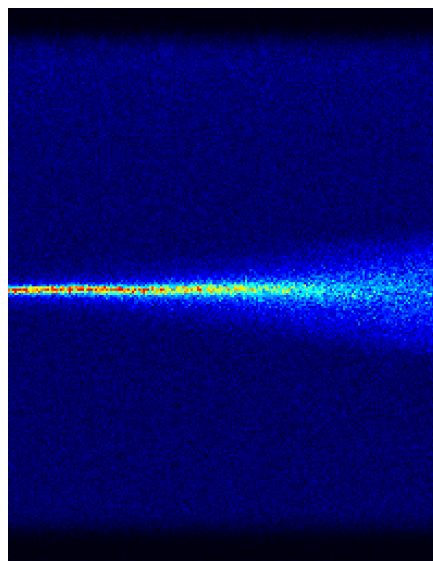
Кроме того, сокращаются стоимость и энергопотребление ускорительного комплекса, что непосредственно отразится на стоимости курса терапии.

Учеными и специалистами ИЯФ им. Г. И. Будкера завершено изготовление и произведен запуск ускорительного масс-спектрометра в Центре коллективного пользования СО РАН «Геохронология кайнозоя» (рис. 55). В ходе первых экспериментов по измерению образцов, полученных из растущего в новосибирском Академгородке дерева, обнаружено изменение содержания изотопа углерода  $^{14}\text{C}$  до и после атомных испытаний, производившихся в середине прошлого века. В этих же экспериментах продемонстрирован малый уровень содержания изотопа углерода  $^{14}\text{C}$  в образце из чистого графита, что указывает на хорошее отношение сигнал/фон.





**Рис. 53.** Установка электронного охлаждения в Институте современной физики в г. Ланчжоу (Китай).



**Рис. 54.** Динамика затухания пучка ионов углерода с энергией 400 МэВ/Нуклон за время 20 с

В настоящее время продолжается отладка ионного источника для получения большого срока службы и совершенствуется методика

измерений большого числа образцов. Начала работу лаборатория по подготовке образцов для ускорительной масс-спектропии (рис. 55).



**Рис. 55.** Ускорительный масс-спектрометр и участники работ по его запуску в Центре коллективного пользования СО РАН «Геохронология кайнозоя» (слева) и лаборатория подготовки образцов для ускорительной масспектрометрии этом центре (справа).

#### Программа 2.8.4. Создание интенсивных источников синхротронного и терагерцевого излучения (координатор акад. Г. Н. Кулипанов)

В рамках международного научного сотрудничества между Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера и лабораторией DESY (Германия) в лаборатории DESY осуществлен успешный запуск источника синхротронного излучения PETRA III с энергией 6 ГэВ и рекордно малым эмиттансом  $1 \text{ нм} \times \text{рад}$ . Ключевой системой проекта, позволившей получить рекордный фазовый объем пучка, является система магнитных «змеек» («вигглеров»), разработанных и изготовленных в Институте (рис. 56).

Получен режим генерации вынужденного излучения на второй очереди Новосибирского лазера на свободных электронах. Средняя мощность излучения второй очереди составляет 0,5 кВт, а длина волны излучения перестраивается в диапазоне от 40 до 80 мкм. Как и

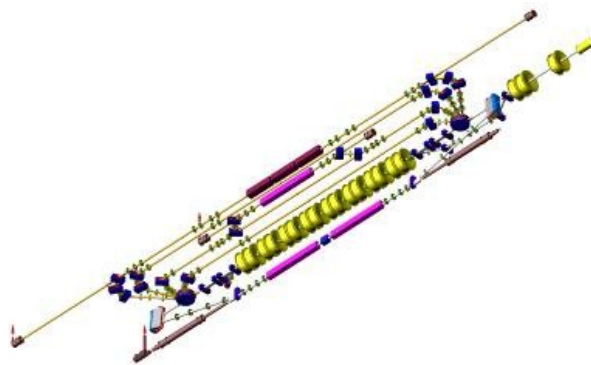
для первой очереди, по средней мощности излучения Новосибирский ЛСЭ значительно превосходит аналогичные зарубежные установки в своих диапазонах длин волн (рис. 57). Новосибирский ЛСЭ является уникальным источником когерентного электромагнитного излучения с проектным диапазоном длин волн от 5 до 240 мкм. Рекордно высокая мощность ЛСЭ обусловлена использованием уникального ускорителя-рекуператора электронов со средним током пучка 25 мА и энергией электронов до 40 МэВ (рис. 58). Запуск второй очереди Новосибирского ЛСЭ существенно расширил спектр мультидисциплинарных исследований, проводимых с использованием уникального лазерного излучения в Сибирском центре фотохимических исследований.



**Рис. 56.** «Змейки» (вверху) и приемники излучения (внизу), установленные в тоннеле PETRA III.



**Рис. 57.** Первая и вторая очереди ускорителя-рекуператора и Новосибирского ЛСЭ в ускорительном зале.



**Рис. 58.** Оптическая схема ускорителя-рекуператора и Новосибирского лазера на свободных электронах.





**Рис. 59.** Общий вид спектрометра нарушенного полного внутреннего отражения с кремниевыми призмами.

Учеными Института ядерной физики им. Г. И. Будкера разработан и создан изображающий спектрометр нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО-спектрометр) терагерцевого диапазона с широким рабочим полем, способный работать в режиме реального времени (рис. 59). Источником излучения для спектрометра служит Новосибирский лазер на свободных электронах, генерирующий непрерывную последовательность импульсов длительностью около 100 пс, следующих с частотой повторения 5,6 МГц. Длина волны излучения первой очереди ЛСЭ может плавно перестраиваться в интервале от 120 до 240 мкм при

относительной ширине линии генерации 0,3—1 %. Образцы располагаются на одной из сменных кремниевых призм. Матричный микроболлометрический приемник (ММБП) на основе оксида ванадия размером  $320 \times 240$  элементов, разработанный в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова, позволяет записывать изображения отраженного от поверхности раздела призма—образец излучения в реальном времени со скоростью 20 кадров в секунду.

Созданный спектрометр предназначен для изучения динамики НПВО-спектров разных объектов в терагерцевом диапазоне.