

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН  
(ИЯФ СО РАН)

В.М. Аульченко, М.Н. Ачасов, А.Ю. Барняков,  
К.И. Белобородов, А.В. Бердюгин, Д.Е. Беркаев,  
А.Г. Богданчиков, А.А. Ботов, А.В. Васильев,  
В.М. Весенев, В.Б. Голубев, К.А. Гревцов,  
Т.В. Димова, В.П. Дружинин, И.М. Землянский,  
Л.В. Кардапольцев, А.С. Касаев, А.Н. Кирпотин,  
Д.П. Коврижин, И.А. Кооп, А.А. Король,  
С.В. Кошуба, Е.А. Кравченко, А.Ю. Кульпин,  
А.С. Купич, А.П. Лысенко, К.А. Мартин,  
Н.А. Мельникова, Н.Ю. Мучной, А.Е. Образовский,  
А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, Е.А. Переведенцев,  
К.В. Пугачев, Ю.А. Роговский, Е.В. Рогозина,  
А.Л. Романов, А.И. Сенченко, С.И. Середняков,  
З.К. Силагадзе, А.А. Сироткин, К.Ю. Сквепень,  
А.Н. Скринский, И.К. Сурин, А.И. Текутьев,  
Ю.А. Тихонов, Ю.В. Усов, А.Г. Харламов,  
Ю.М. Жаринов, Ю.М. Шатунов, П.Ю. Шатунов,  
Д.Б. Шварц, Д.А. Штоль, А.Н. Шукаев

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДЕТЕКТОРОМ СНД  
НА  $e^+e^-$  КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000

ИЯФ 2013-13

НОВОСИБИРСК

2013

## Эксперименты с детектором СНД на $e^+e^-$ коллайдере ВЭПП-2000

*В.М. Аульченко, М.Н. Ачасов, А.Ю. Барняков, К.И. Белобородов, А.В. Бердюгин, Д.Е. Беркаев, А.Г. Богданчиков, А.А. Ботов, А.В. Васильев, В.М. Весенев, В.Б. Голубев, К.А. Гревцов, Т.В. Димова, В.П. Дружинин, И.М. Землянский, Л.В. Кардапольцев, А.С. Касаев, А.Н. Кирпотин, Д.П. Коврижин, И.А. Кооп, А.А. Король, С.В. Кошуба, Е.А. Кравченко, А.Ю. Кульпин, А.С. Купич, А.П. Лысенко, К.А. Мартин, Н.А. Мельникова, Н.Ю. Мучной, А.Е. Образовский, А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, Е.А. Переведенцев, К.В. Пугачев, Ю.А. Роговский, Е.В. Рогозина, А.Л. Романов, А.И. Сенченко, С.И. Середняков, З.К. Силагадзе, А.А. Сироткин, К.Ю. Скопень, А.Н. Скринский, И.К. Сурин, А.И. Текутьев, Ю.А. Тихонов, Ю.В. Усов, А.Г. Харламов, Ю.М. Жаринов, Ю.М. Шатунов, П.Ю. Шатунов, Д.Б. Шварц, Д.А. Штоль, А.Н. Шукаев*  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера 630090, Новосибирск, Россия

### Аннотация

В сезоне 2012–2013 гг. продолжались эксперименты с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000. Запись экспериментальных данных проводилась в области энергии 320 – 1050 МэВ в системе центра масс. Описаны текущее состояние детектора и предварительные результаты анализа ранее записанных данных.

### Experiments with the SND detector at the $e^+e^-$ collider VEPP-2000

*V.M. Aulchenko, M.N. Achasov, A.Yu. Barnyakov, K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin, D.E. Berkaev, A.G. Bogdanchikov, A.A. Botov, A.V. Vasiljev, V.M. Vesenev, V.B. Golubev, K.A. Grevtsov, T.V. Dimova, V.P. Druzhinin, I.M. Zemlyansky, L.V. Kardapolitsev, A.S. Kasaev, A.N. Kirpotin, D.P. Kovrizhin, I.A. Koop, A.A. Korol, S.V. Koshuba, E.A. Kravchenko, A.Yu. Kulpin, A.S. Kupich, A.P. Lysenko, K.A. Martin, N.A. Melnikova, N.Yu. Muchnoi, A.E. Obrazovsky, A.P. Onuchin, E.V. Pakhtusova, E.A. Perevedentsev, K.V. Pugachev, Yu.A. Rogovsky, E.V. Rogozina, A.L. Romanov, A.I. Senchenko, S.I. Serednyakov, Z.K. Silagadze, A.A. Sirotkin, K.Yu. Skovpen, A.N. Skrinskii, I.K. Surin, A.I. Tekutev, Yu.A. Tikhonov, Yu.V. Usov, A.G. Kharlamov, Yu.M. Zharinov, Yu.M. Shatunov, P.Yu. Shatunov, D.B. Shwartz, D.A. Shtol, A.N. Shukaev*

### Abstract

SND experiments at the VEPP-2000  $e^+e^-$  collider have been continued in 2012-2013. Data has been taken in the center-of-mass energy region from 320 to 1050 MeV. The current status of the SND detector and preliminary results of data analysis are presented.

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

---

# 1 Введение

В сезоне 2012–2013 гг. набор данных с детектором СНД на ВЭПП-2000 начался в ноябре 2012 г. Целью эксперимента было сканирование энергетического диапазона «ниже  $\phi$ -мезона». Энергия пучка  $E$  изменялась от 160 до 500 МэВ. Главной физической задачей этого эксперимента является точное измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  и уточнение вклада от этого процесса в аномальный магнитный момент мюона. В марте 2013 г. этот эксперимент был завершен. Накопленная интегральная светимость составила около  $6 \text{ пб}^{-1}$ . Большим достижением коллайдера стала высокая мгновенная светимость ВЭПП-2000, в 3–5 раз превышающая светимость ВЭПП-2М при тех же значениях энергии. Благодаря высокой светимости эксперимент был завершен досрочно, и было принято решение в оставшееся время провести два дополнительных эксперимента: сканирование узкой области энергии вблизи  $\phi$ -мезонного резонанса с интегральной светимостью  $7 \text{ пб}^{-1}$  и дополнительный набор данных в некоторых областях вблизи  $\rho$  и  $\omega$ -резонансов с интегральной светимостью около  $8 \text{ пб}^{-1}$ . Первый эксперимент был завершен в середине мая. По данным этого эксперимента кроме чисто физических задач по уточнению параметров  $\phi$ -мезона предполагается решить и ряд методических задач, в частности, откалибровать по пионам от распада  $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  черенковский счетчик с показателем преломления  $n = 1.05$ . Второй эксперимент был завершен в конце июня. С учетом этого дополнительного эксперимента полная статистика, накопленная в области  $\rho$  и  $\omega$ -резонансов, оказалась сравнима со статистикой, накопленной детектором СНД на ВЭПП-2М за все предыдущие годы.

Во время всех этих экспериментов энергия коллайдера контролировалась методом обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на пучке электронов.

В настоящем препринте кратко описаны состояние систем детектора СНД во время эксперимента, планы по их модернизации и предварительные результаты по анализу данных.

## 2 Детектор СНД

Детектор СНД (рис. 1) включает в себя трековую систему, состоящую из дрейфовой и пропорциональных камер, объединенных в общем газовом объеме, систему идентификации заряженных частиц на основе пороговых аэрогелевых черенковских счетчиков, трехслойный сферический электромагнитный калориметр на основе кристаллов  $\text{NaI}(\text{Tl})$  и мюонную систему, состоящую из двух слоев пропорциональных трубок и пластиковых сцинтиляционных счетчиков. В ходе экспериментов 2012–2013 гг. все системы детектора работали стабильно без существенных поломок. Далее коснемся изменений в системах, произошедших во время последних экспериментов.

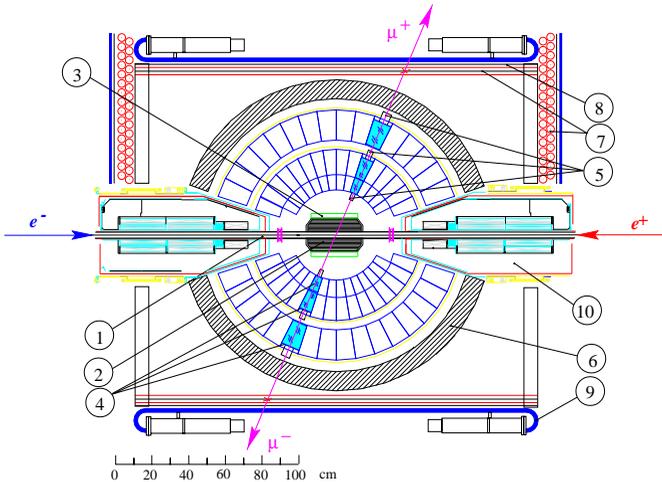


Рис. 1. Детектор СНД – сечение вдоль оси пучков: 1 – вакуумная камера; 2 – трековая система; 3 – аэрогелевые черенковские счетчики; 4 – кристаллы  $\text{NaI}(\text{Tl})$ ; 5 – вакуумные фототриоды; 6 – поглотитель; 7 – пропорциональные трубки; 8 – железный фильтр; 9 – сцинтиляционные счетчики; 10 – фокусирующие соленоиды ВЭПП-2000.

### 2.1 Дрейфовая камера

В 2012–2013 гг. продолжались работы по изготовлению второго экземпляра трековой системы. После натяжения проволочной структуры были проведены проверка целостности и натяжения проволок, замена проволок с неудовлетворительным натяжением и распайка высоковольтного

кросса. В настоящее время изготовлен внутренний катод, ведется подготовка к его вклеиванию в корпус трековой системы. Также ведется подготовка к распайке высоковольтных плат и их установке на фланцах камеры.

## 2.2 Калориметр

На момент окончания набора данных доля работоспособных счетчиков в калориметре СНД составляла 96%. Эксперимент 2012–2013 гг. был выполнен с полностью обновленной электроникой первого слоя калориметра. За время набора данных на первом слое вышли из строя три вакуумных фототриода и два зарядо-чувствительных усилителя. Работоспособность неисправных каналов была восстановлена в порядке текущего ремонта. В 2013 году были завершены производство и проверка новой электроники для второго и третьего слоев. Все элементы электроники готовы для установки на детектор.

Продолжалась работа по созданию новых плат канала электроники калориметра: усилителя-формирователя и АЦП. Новый АЦП (плата А24ММ) — представляет собой 24-канальный модуль флэш-АЦП с шагом оцифровки 25 нс и буфером данных на 64 слова для каждого канала. Оцифровка ведется в непрерывном режиме и фиксируется в буфере по сигналу первичного триггера.

Для учета временного сдвига между сигналом первичного триггера и шагом оцифровки АЦП используется плата DeltaT, измеряющая этот сдвиг (от 0 до 25 нс) между сигналами. Плата представляет собой экспандер с коэффициентом экспандирования 8 и счетчик прямого счета на 8 разрядов.

Новый канал позволит помимо амплитуды сигнала определять время срабатывания счетчика калориметра. Прототипы блоков были подключены к счетчикам калориметра и испытаны в ходе набора экспериментальных данных. Результаты измерения энергетического и временного разрешения канала электроники с помощью калибровочного генератора приведены на рис. 2 и 3. Временное разрешение для генераторного сигнала, с амплитудой эквивалентной энерговыделению 100 МэВ, составляет 1.5 нс, амплитудное разрешение – 350 кэВ. Временные спектры, набранные на физических событиях, представлены на рис. 4. Для событий с энерговыделением в счетчике от 50 до 200 МэВ разрешение составило 2.3 нс, а при энерговыделении более 200 МэВ – 1.3 нс. Полученные значения соответствуют проектным параметрам.

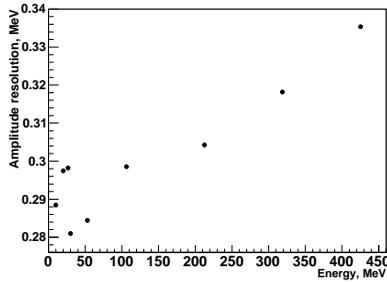


Рис. 2. Зависимость амплитудного разрешения канала электроники калориметра с новыми платами (формирователь + флэш-АЦП) от амплитуды генераторного сигнала.

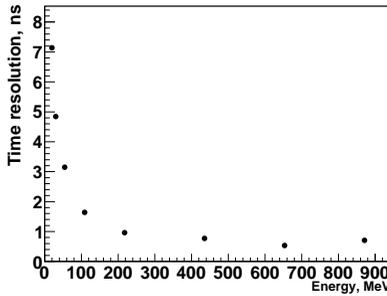


Рис. 3. Зависимость временного разрешения канала электроники калориметра с новыми платами (формирователь + флэш-АЦП) от амплитуды генераторного сигнала.

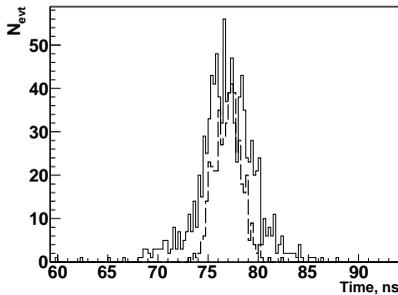


Рис. 4. Временное разрешение счетчика NaI(Tl) при энергосделении от 50 до 200 МэВ (сплошная линия) и более 200 МэВ (пунктирная линия) для новых плат (формирователь + флэш-АЦП), полученное на пучковых событиях.

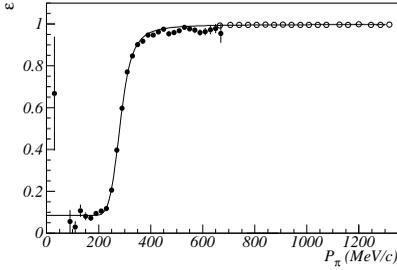


Рис. 5. Зависимость эффективности регистрации системы АЧС от импульса для пионов, определенная по событиям процесса  $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  (заполненные окружности), и для мюонов, определенная по событиям процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  (пустые окружности). Кривая – аппроксимирующая функция.

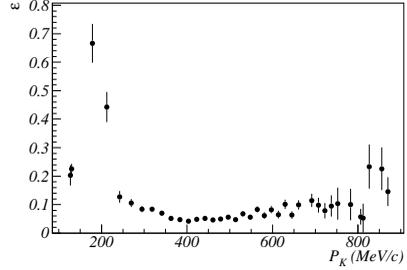


Рис. 6. Зависимость эффективности регистрации системы АЧС от импульса каона, полученная по событиям процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ .

### 2.3 Система аэрогелевых черенковских счетчиков

В экспериментальных сезонах 2010–2013 гг. на ВЭПП-2000 использовались два варианта системы пороговых черенковских счетчиков с разными показателями преломления аэрогеля:  $n = 1.05$  при энергиях ниже 1 ГэВ для  $e/\pi$ -разделения и  $n = 1.13$  при энергиях выше 1 ГэВ для  $\pi/K$ -разделения.

По экспериментальным данным 2011 года, накопленным при энергиях выше  $\phi$ -мезонного резонанса, для системы с  $n = 1.13$  были измерены эффективности регистрации для заряженных  $\pi$  и  $K$  мезонов. Они показаны на рис. 5 и 6. Достигнутый уровень эффективности системы обеспечивает подавление пионов более чем на два порядка в диапазоне импульсов от 0.35 до 0.87 ГэВ/с. Средняя амплитуда сигнала для ультрарелятивистских электронов составляет 6–8 фотоэлектронов. Соответствующая эффективность регистрации электронов равна 99.7%.

В экспериментальном сезоне 2012–2013 гг. ВЭПП-2000 работал в области энергий ниже  $\phi$ -мезонного резонанса. В связи с этим в конце ноября 2012 года на детектор СНД была установлена система аэрогелевых черенковских счетчиков с показателем преломления аэрогеля  $n = 1.05$ . Данная система предназначена для  $e/\pi$ -разделения в области импульсов ниже

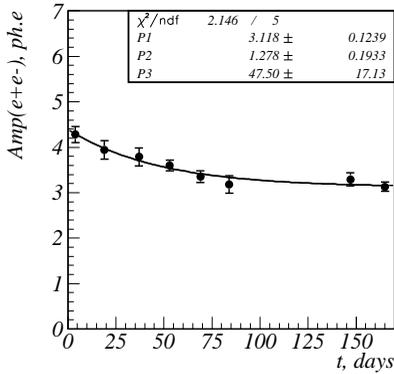


Рис. 7. Зависимость среднего числа фотоэлектронов в счетчике с  $n = 1.05$  от времени.

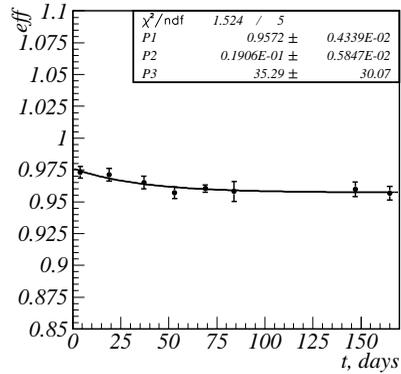


Рис. 8. Зависимость эффективности регистрации ультрарелятивистских электронов для системы с  $n = 1.05$  от времени.

450 МэВ/с. Работоспособность системы проверялась на событиях процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ . Требовалось, чтобы частицы попали в «хорошую» область счетчиков (исключались области шифтеров и края счетчиков). На рис. 7 и рис. 8 показаны зависимости среднего числа фотоэлектронов (усредненное по 9 счетчикам значение) в счетчике и эффективности регистрации системы для ультрарелятивистских электронов. Сразу после установки системы на детектор среднее число фотоэлектронов составляло 3.5–4.5 фотоэлектрона для разных счетчиков. К концу экспериментального сезона 2012–2013 оно упало до 3.0–3.5 фотоэлектронов.

## 2.4 Мюонная система

Мюонная система СНД состоит из двух подсистем: пропорциональных трубок и сцинтилляционных счетчиков. Сигнал срабатывания системы вырабатывается по совпадению сигналов трубок и счетчиков. Эффективность системы для мюонов и пионов изучалась по событиям процессов  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ . События первого процесса отбирались как двухчастичные коллинеарные события с условием, что для обеих частиц энерговыделения в слоях калориметра соответствуют энерговыделениям минимально ионизирующих частиц. Эти условия отбора проходит также некоторая часть событий процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Для определения вклада событий  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  отбирались двухчастичные

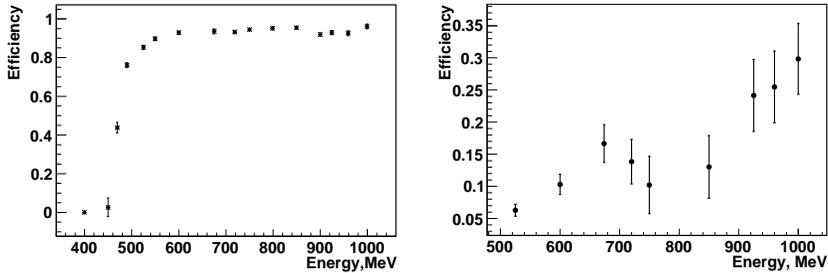


Рис. 9. Эффективность регистрации мюонов (левый график) и пионов (правый график) в зависимости от энергии частицы.

коллинеарные события, в которых одна из частиц испытала ядерное взаимодействие в калориметре, а вторая удовлетворяет условиям отбора минимально ионизирующей частицы. Для этой второй частицы определялась вероятность срабатывания мюонной системы. Затем вычислялась примесь пионов среди отобранных кандидатов в мюоны. Фон процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  подавлялся с помощью система пороговых черенковских счетчиков. Космический фон оценивался по заходам, записанным без пучков.

На рис. 9 приведены вероятности срабатывания мюонной системы от мюонов и пионов в зависимости от энергии частицы.

## 2.5 Система сбора данных (online)

Программное обеспечение системы сбора данных развивалось в направлении поддержки новых компонент электроники и улучшения контролируемости и надежности набора статистики, в частности:

- были реализованы чтение и сохранение в события информации с новых плат оцифровки сигналов калориметра (A24MM) и платы чтения временного сдвига сигнала триггера (DeltaT), было проведено несколько тестовых заходов с прототипами плат;
- принята более регулярная схема запуска процессов ССД (сценарий online);
- реализован обмен данными с ВЭПП2000 используя сервис доступа к каналам (VCAS, [9]);
- организовано сохранение, отображение и передача в VCAS данных

измерения энергии пучка по порогу энергии фотонов от лазерного излучения, рассеянных пучком ([10]);

- добавлен режим «приостановка захода до вмешательства оператора» (Pause);
- в процесс контроля по событиям добавлены калибровка места встречи с учетом наклона оси пучка и контроль измерения Z-координат;
- добавлена возможность «холодной» (полной, после включения) инициализации всех управляющих блоков ССД (cold\_init).

## 3 Система обработки данных (offline)

### 3.1 Моделирование

- ядро моделирования переведено на Geant4 версии 9.5;
- доведено до рабочего состояния моделирование отклика электроники мюонной системы;
- разработаны и добавлены в моделирование СНД первичные генераторы процесса  $e^+e^- \rightarrow e\tau$  с распадом  $\tau \rightarrow \mu\nu\nu$ ,  $e\nu\nu$  или  $\pi\nu$  и процесса рождения в  $e^+e^-$  аннигиляции до 8 частиц, равномерно распределенных по фазовому объему;
- добавлен первичный генератор процессов  $e^+e^- \rightarrow 4$  лептона (DIAG36);
- исправлена ошибка в моделировании отклика полосок пропорциональной камеры;
- в первичный генератор Kardaro добавлен процесс  $e^+e^- \rightarrow \eta\phi$ .

### 3.2 Реконструкция

В течение 2012–2013 годов было сделано несколько важных изменений в системе обработки и реконструкции данных, в частности:

- разработаны и реализованы учет и коррекция геометрических искажений в детекторе, таких как сдвиг и поворот оси  $e^+e^-$  пучков, сдвиг и поворот полусфер калориметра относительно дрейфовой камеры;
- расширен за счет новых процессов пакет кинематической реконструкции vdkine;
- разработана инфраструктура для описания физической структуры события и автоматической генерации алгоритмов кинематической реконструкции;

- в рамках научного сотрудничества начата эксплуатация компьютерного кластера (суперкомпьютера) ССКЦ СОРАН для реконструкции, обработки и моделирования; также для этой цели мы продолжаем использовать вычислительный кластер НГУ [11]; использование двух независимых площадок позволило увеличить общую надежность системы;
- к объекту кандидата в физическую частицу добавлена информация о срабатываниях мюонной системы (внешние сцинтилляционные счетчики и пропорциональные трубки) и системы идентификации (пороговые черенковские счетчики);
- добавлены объекты с информацией о нормированной ионизации ( $dE/dx$ ) в событие;
- успешно прошли сборка и первичное тестирование ПО СНД на архитектуре x86\_64 в режиме 32-бит совместимости, ОС Linux SL6;
- разработана инфраструктура контроля калибровок амплитуд дрейфовой камеры; найденные неправильные калибровки исправлены;
- разработана процедура получения абсолютной калибровки  $z$  в дрейфовой камере и ее применения;
- существенно улучшена процедура удаления артефактных треков при реконструкции камеры;
- реализована и протестирована процедура учета нефизических срабатываний в детекторе (наложений).

## 4 Анализ данных СНД

### 4.1 Статус анализа процесса $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$

Анализ процесса  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  по данным 2011 года был описан в препринте [1]. В настоящей работе анализируются все имеющиеся на настоящий момент данные, накопленные в 2011–2012 гг., изменена процедура вычитания космического фона, улучшены условия отбора событий  $n\bar{n}$  и подавление фона, в моделировании изменены сечения поглощения антинейтронов, при обработке моделирования учитываются наложения на события пучкового фона. Всего в анализе используется 18 точек в интервале энергии пучка 900 – 1000 МэВ, из них 11 точек – выше порога  $n\bar{n}$ . Интегральная светимость, накопленная выше порога, составляет  $\Delta L = 5.7 \text{ пб}^{-1}$ . Следует отметить, что для анализа отбирались только заходы со средней светимостью выше  $3 \times 10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

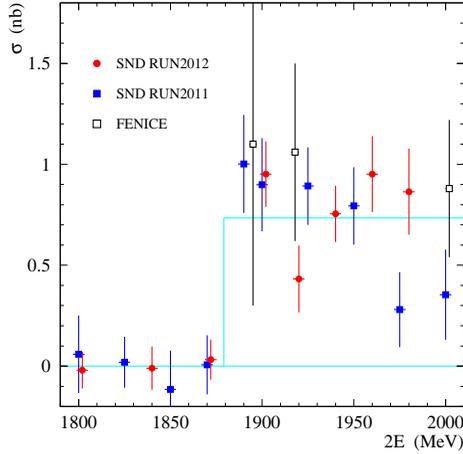


Рис. 10. Измеренное сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ . Разными символами показаны данные СНД 2011 и 2012 годов и данные детектора FENICE [5].

В результате применения условий отбора начальный массив из более чем  $10^9$  событий сократился до уровня  $\sim 5 \times 10^3$ . Эффективность регистрации  $\epsilon$  событий процесса  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  составила около 20%.

Сечение процесс в каждой точке по энергии определялось по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{N - xT}{\epsilon L(1 + \delta)}, \quad (1)$$

где  $N$  – число отобранных кандидатов  $n\bar{n}$ ,  $x$  – скорость счета космических событий,  $T$  – продолжительность экспериментальных заходов,  $\epsilon$  – эффективность регистрации,  $\delta$  – радиационная поправка,  $L$  – интегральная светимость. Измеренное сечение приведено на рис. 10 отдельно для сканирований 2011 и 2012 годов. Для сравнения показаны данные первого и единственного предыдущего измерения сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  в эксперименте FENICE [5]. Среднее значение сечения составляет  $0.73 \pm 0.08$  нб. Однако в точках по энергии ближайших к порогу сечение близко к 1 нб. Показанная на рис. 10 ошибка является статистической.

Измеренное распределение по  $\cos \theta$ , где  $\theta$  – полярный угол вылета антинейтрона, показано на рис. 11. Используется переменный шаг по  $\cos \theta$ , но постоянный шаг  $9^\circ$  по  $\theta$ , чтобы исключить дифференциальную нелинейность из-за конечных размеров кристаллов калориметра. Экспери-

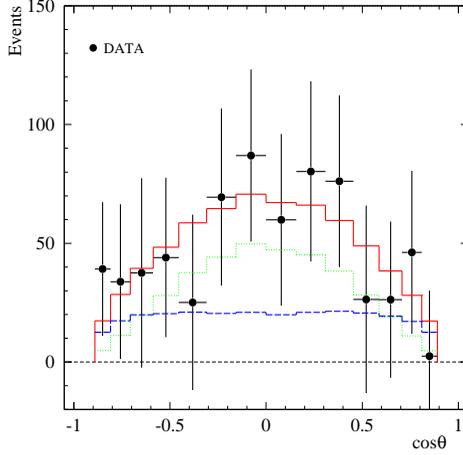


Рис. 11. Распределение экспериментальных событий процесса  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  по  $\cos\theta$ . Точки с ошибками – экспериментальные данные. Сплошная гистограмма – результат аппроксимации. Точечная гистограмма показывает вклад в распределение, пропорциональный  $G_E$ , а пунктирная – пропорциональный  $G_M$ . верхняя гистограмма – суммарный результат.

ментальное распределение аппроксимируется суммой гистограмм, соответствующих членам в дифференциальном сечении, содержащим электрический  $G_E$  и магнитный  $G_M$  формфакторы и пропорциональным  $1 - \cos^2\theta$  и  $1 + \cos^2\theta$ . Эти гистограммы, отнормированные на полученные при аппроксимации числа событий, и их сумма приведены на рис. 11. Учитывая дополнительный фактор в сечении  $4m_n^2/s$  перед членом, содержащим  $G_E$ , можно получить:

$$|G_E/G_M|^2 = 2.8 \pm 4.6 \quad (2)$$

Из этой формулы и рис. 11 видно некоторое преобладание вклада  $G_E$  над  $G_M$ . Это первое измерение величины  $|G_E/G_M|$  для нейтрона.

Основными источниками систематической неопределенности при измерении сечения являются ошибки в вычитании космического фона (0.1 нб), в эффективности регистрации (0.2 нб), в вычитании физического фона (0.1 нб), в светимости (0.03 нб). Полная систематическая ошибка составляет 0.25 нб или  $\sim 30\%$ .

Более подробно анализ процесса  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  будет описан в препринте [6].

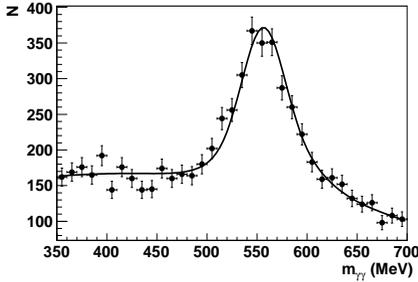


Рис. 12. Спектр двухфотонных инвариантных масс для экспериментальных событий в диапазоне  $2E = 1450\text{--}1550$  МэВ. Кривая показывает результат аппроксимации спектра суммой эффекта и фона.

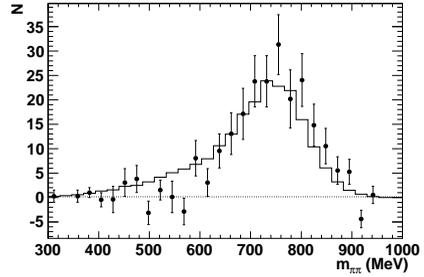


Рис. 13. Спектр инвариантных масс пионов при  $2E = 1500$  МэВ. Точки – экспериментальные данные, гистограмма – моделирование.

## 4.2 Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$

Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  измерялось по данным сканирования 2011 и 2012 годов. Отбирались события с двумя заряженными треками и с двумя или тремя фотонами. Для отобранных событий проводилась кинематическая реконструкция в гипотезе  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ . Далее анализировался спектр двухфотонных инвариантных масс, который аппроксимировался суммой функций, описывающих спектры эффекта и фона. Пример аппроксимации спектра инвариантных масс показан на рис. 12. На рис. 13 показан спектр инвариантных масс пионов, из которого следует, что в процессе  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  доминирует механизм  $e^+e^- \rightarrow \eta\rho$ . Зависимость сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  от энергии в сравнении с результатами предыдущих экспериментов показана на рис. 14. Видно, что результаты измерений SND и BABAR [2, 3] согласуются.

## 4.3 Статус анализа процесса $e^+e^- \rightarrow \eta K^+ K^-$

Анализ процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta K^+ K^-$  находится на начальной стадии. Для измерения процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta K^+ K^-$  предполагается отбирать события с двумя треками заряженных частиц и двумя и более фотонами. Условия отбора близки к условиям для процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ , описанным выше. Однако, взаимодействие каонов с веществом калориметра харак-

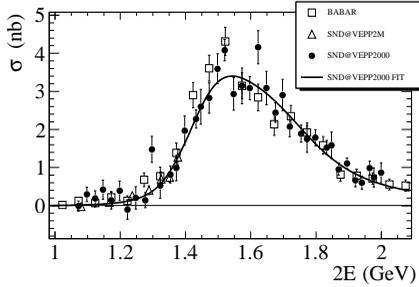


Рис. 14. Борновское сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ , измеренное СНД на ВЭПП-2000, СНД на ВЭПП-2М и в эксперименте ВАВАР. Кривая – результат аппроксимации сечения в модели векторной доминантности суммой вкладов резонансов  $\rho$ ,  $\rho'$ , и  $\rho''$

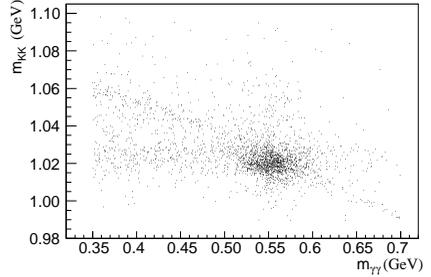


Рис. 15. Двумерное распределение по инвариантным массам систем  $\gamma\gamma$  и  $K^+K^-$  для моделированных событий  $e^+e^- \rightarrow \eta K^+K^-$ .

теризуется возникновением большого количества кластеров, которые реконструируются как ложные фотоны. Для того, чтобы отбирать события без потерь, верхняя граница на число фотонов должна быть меньше 10. Выбор пары фотонов от распада  $\eta$ -мезона предполагается осуществлять с помощью кинематической реконструкции в гипотезе  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\gamma\gamma$ .

Для моделирования процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta K^+K^-$  был разработан генератор первичных событий на основе механизма  $e^+e^- \rightarrow \eta\phi \rightarrow \eta K^+K^-$ , который по данным статьи [4] является доминирующим. На рис. 15 показано двумерное распределение по инвариантным массам систем  $\gamma\gamma$  и  $K^+K^-$  для моделированных событий  $e^+e^- \rightarrow \eta K^+K^-$  с энергией  $2E = 1.7$  ГэВ.

#### 4.4 Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

Процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  изучался на основе данных, записанных в 2011 году в области энергии  $\sqrt{s} = 1.05 \div 2.00$  ГэВ. Данные, соответствующие интегральной светимости около  $20 \text{ пб}^{-1}$ , были набраны в 40 энергетических точках. Для выделения изучаемых событий требовалось выполнение следующих условий: наличие двух центральных треков с полярным углом  $\theta$ , лежащим в пределах от  $30^\circ$  до  $150^\circ$ , и ровно двух фотонов с энергией больше 30 МэВ. Для отобранных событий проводилась кинематическая реконструкция.

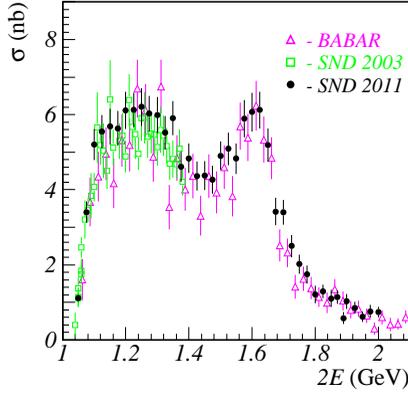


Рис. 16. Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , измеренное на ВЭПП-2000, в сравнении с результатами экспериментов СНД на ВЭПП-2М [7] и BABAR [8].

матическая реконструкция в предположении, что событие происходит от процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-2\gamma$ . На параметры, полученные в результате реконструкции, накладывались ограничения:  $\chi^2$  общей точки вылета треков меньше 60,  $\chi^2$  сохранения энергии и импульса меньше 40. Основным источником фоновых событий в изучаемом энергетическом диапазоне является процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ . Разделение эффекта и фона осуществлялось при аппроксимации спектра инвариантной массы двух фотонов суммой распределений, полученных в результате моделирования изучаемого и фонового процессов.

Для изучения систематической неопределенности в эффективности регистрации событий, полученной по моделированию, было проведено изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в области энергии  $\phi$ -мезонного резонанса. В этой области искомые события можно выделить с минимальной примесью фона с использованием существенно более мягких условий отбора. Были исследованы распределения по  $\chi^2$  кинематической реконструкции и определены соответствующие поправки к эффективности. Была также определена поправка, связанная со строгим ограничением на число фотонов.

Измеренное сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  приведено на рис. 16 вместе с данными предыдущих экспериментов: СНД на ВЭПП-2М [7] и BABAR [8]. Результаты всех трех экспериментов согласуются.

## 4.5 Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$

**Введение.** Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  в диапазоне энергии 1 – 2 ГэВ определяется рождением в  $e^+e^-$  аннигиляции векторных мезонов  $\rho$ ,  $\rho'$ ,  $\rho''$  с последующим их распадом в состоянии  $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ . Основными промежуточными механизмами распада являются  $\omega\pi^0$  и  $a_1\pi$ ,  $\rho^+\rho^-$ ,  $f_0\rho^0$ . В данной области энергии сечение  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  доминирует в полном сечении аннигиляции в адроны и вносит значительный вклад в поляризацию вакуума адронами.

**Отбор событий.** Предварительно отбирались события с двумя и более заряженными частицами и четырьмя и более фотонами. Наличие лишних частиц допускалось, чтобы избежать потери событий из-за наложений фотонов и треков от пучкового фона или возникновения ложных фотонов при ядерного взаимодействия пионов с веществом детектора.

Далее проводилась кинематическая реконструкция событий в предположении конечного состояния  $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  с требованием выполнения законов сохранения энергии и импульса. Никаких дополнительных предположений о промежуточном состоянии не вводилось. В событиях с тремя и более заряженными частицами или пятью и более фотонами при кинематической реконструкции проводился перебор всех возможных комбинаций и выбиралась комбинация, обеспечивающая минимальное значение параметра  $\chi^2$  кинематической реконструкции.

Отбирались события, для которых  $\chi^2$  кинематической реконструкции менее 100 и массы реконструированных  $\pi^0$ -мезонов лежат в диапазоне 80 – 200 МэВ.

**Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ .** Эффективность регистрации исследуемого процесса определялась по моделированию. Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  в каждой точке по энергии определялось по формуле:

$$\sigma(E) = \frac{N_{4\pi}(E)}{IL(E)\epsilon(E)(1 + \delta(E))}, \quad (3)$$

где  $N_{4\pi}$  – число зарегистрированных событий искомого процесса,  $IL(E)$  – интегральная светимость в данной точке,  $\epsilon$  – эффективность регистрации,  $\delta$  – радиационная поправка. Измеренное сечение изображено на рис. 17. Радиационная поправка вычислялась методом Монте-Карло и плавно меняется с энергией от 0.88 при 1 ГэВ до 1.14 при 2 ГэВ.

Для разделения промежуточных механизмов реакции использовалось распределение по инвариантной массе  $\pi^+\pi^-\pi^0$ , при этом выбиралась комбинация наиболее близкая по массе к  $\omega$ -мезону. В области энергии

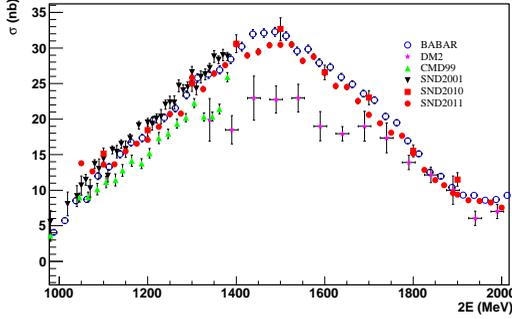


Рис. 17. Измеренное сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  в сравнении с данными предыдущих экспериментов.

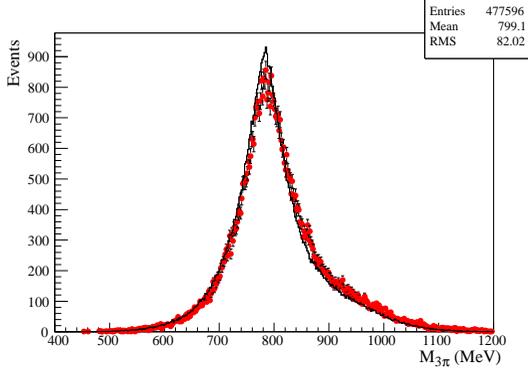


Рис. 18. Распределение по инвариантной массе  $\pi^+\pi^-\pi^0$ , ближайшей к  $\omega$ -мезону. Точки с ошибками – эксперимент, гистограмма – моделирование.

ниже 1.4 ГэВ распределение по данному параметру хорошо описывается моделированием (рис. 18). В этой области доминирует промежуточный механизм  $\omega\pi^0$ . Распределение по данному параметру для каждого из четырех механизмов реакции извлекалось из моделирования. Для выделения промежуточного механизма  $\omega\pi^0$  производилась аппроксимация экспериментального распределения по инвариантной массе  $\pi^+\pi^-\pi^0$  суммой четырех распределений с фиксированной формой, взятой из моделирования. Всего было четыре свободных параметра. Сечения процессов  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  с вычтенным вкладом промежуточного состояния  $\omega\pi^0$  изображены на рис. 19.

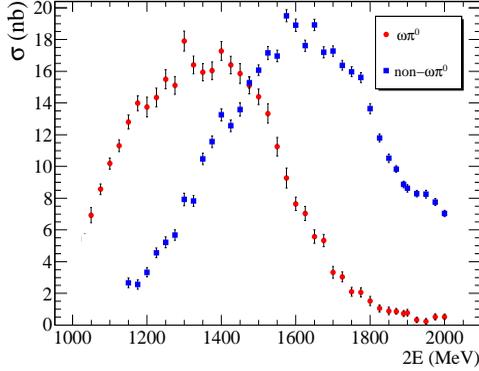


Рис. 19. Измеренные сечения реакций  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  с вычтенным вкладом промежуточного состояния  $\omega\pi^0$ .

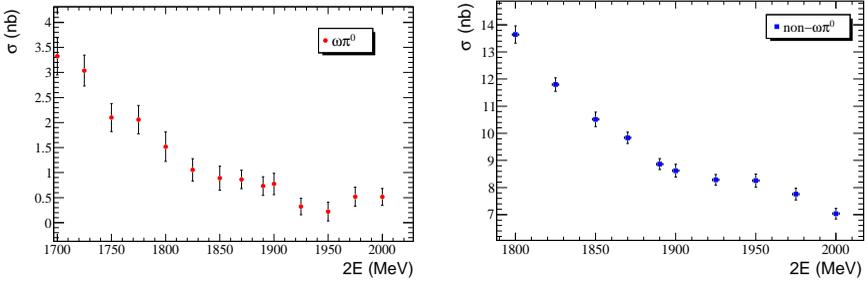


Рис. 20. Измеренные сечения реакций  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  (левый график) и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  с вычтенным вкладом промежуточного состояния  $\omega\pi^0$  (правый график)

В области энергии 1.9 – 2.0 ГэВ наблюдаются некоторая неоднородность в энергетическом поведении сечений как для промежуточного состояния  $\omega\pi^0$ , так и для состояний, отличных от  $\omega\pi^0$ . Энергетические зависимости сечений при энергии выше 1.8 ГэВ приведены на рис. 20.

#### 4.6 Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$

По данным с интегральной светимостью около  $25 \text{ пб}^{-1}$ , записанным в интервале энергий 1050 – 2000 МэВ в 2011 году, было проведено предварительное изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ .

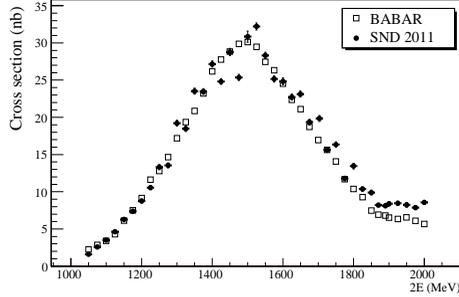


Рис. 21. Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ , полученное в данной работе, в сравнении с результатами эксперимента BABAR.

Отбирались события с 4-мя и более заряженными частицами и менее чем с двумя фотонами. Для четырех треков проверялась гипотеза, что они вылетают из места встречи пучков. Вычислялись  $\chi^2$  этой гипотезы в плоскости  $R - \phi$  ( $\chi_r^2$ ) и в плоскости  $R - Z$  ( $\chi_z^2$ ), на которые накладывались условия:  $\chi_r^2 \leq 8$  и  $\chi_z^2 \leq 20$ . Для подавления пучкового фона отбрасывались события с  $z$ -координатой вершины  $|Z_{vert}| > 10$  см. Также накладывались условия на полное энергосодержание в калориметре ( $< 1.75E$ ) и на энергию каждой частицы ( $< 0.75E$ ).

Перечисленные выше условия отбора проходят также события фоновых процессов  $e^+e^- \rightarrow 6\pi$ ,  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$  и  $e^+e^- \rightarrow K_s K^+\pi^- \rightarrow K^+\pi^+\pi^-\pi^-$ . Ожидаемое число фоновых событий рассчитывалось по моделированию с использованием экспериментальных данных по сечениям этих процессов и вычиталось.

Предварительный результат по сечению процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  в сравнении с данными эксперимента BABAR приведен на рис. 21.

#### 4.7 Статус анализа процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$

Завершается анализ процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  по данным с интегральной светимостью  $\sim 32 \text{ пб}^{-1}$ , накопленным в интервале энергии 1.07 – 2.00 ГэВ в 2010–2012 гг.

Процесс  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  изучается в семифотонном конечном состоянии т.е. в моде распада  $\eta$  мезона  $\eta \rightarrow 3\pi^0$ . Для анализа отбирались события, в которых зарегистрировано семь или более фотонов и нет заряженных частиц. Накладывались следующие условия на полное энергосодержание

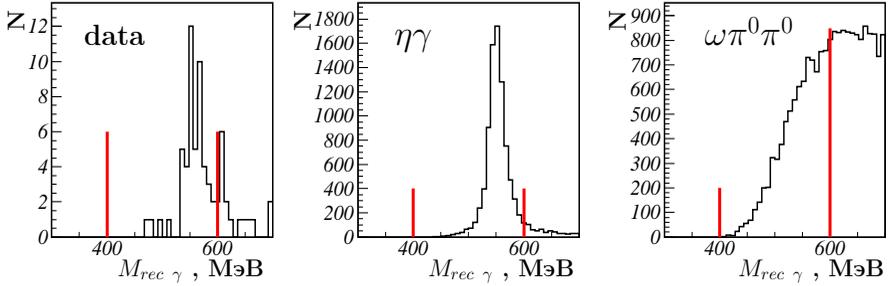


Рис. 22. Распределение по массе отдачи наиболее энергичного фотона в событии для отобранных экспериментальных событий (data), и событий моделирования процессов  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  ( $\eta\gamma$ ) и  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0\pi^0$  ( $\omega\pi^0\pi^0$ ).

в калориметре  $E_{tot}$  и суммарный импульс фотонов  $P_{tot}$ :

$$0.7 < E_{tot}/2E < 1.2, \quad P_{tot}/2E < 0.3/c, \quad E_{tot}/2E - cP_{tot}/2E > 0.7.$$

Для отобранных событий проводилась кинематическая реконструкция, использующая измеренные углы, энергии фотонов и законы сохранения энергии и импульса. В результате реконструкции уточнялись энергии фотонов и определялись величина  $\chi^2$ , характеризующее достоверность гипотезы о процессе, для которой проводилась кинематическая реконструкция. Проверялись три гипотезы и вычислялось три параметра:

- $e^+e^- \rightarrow n\gamma$  ( $n \geq 7$ ),  $\chi_{n\gamma}^2$ ;
- $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ ,  $\chi_{\pi^0\pi^0\gamma}^2$ ;
- $e^+e^- \rightarrow 3\pi^0\gamma$ ,  $\chi_{3\pi^0\gamma}^2$ .

Дальнейший отбор проводился со следующими ограничениями:

$$\chi_{n\gamma}^2 < 30, \quad \chi_{\pi^0\pi^0\gamma}^2 > 20, \quad \chi_{3\pi^0\gamma}^2 < 50.$$

Для отобранных событий строились распределения по массе отдачи  $M_{rec}$  наиболее энергичного фотона (рис. 22). Окончательный отбор событий осуществлялся по условию  $400 < M_{rec} < 600$  МэВ.

Измеренное сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  приведено на рис. 23. Сечение аппроксимировалось в модели векторной доминантности с учетом вкладов векторных резонансов  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\rho'$  и  $\rho''$ . Свободными параметрами аппроксимации были массы и ширины  $\rho'$ ,  $\rho''$  резонансов и сечения

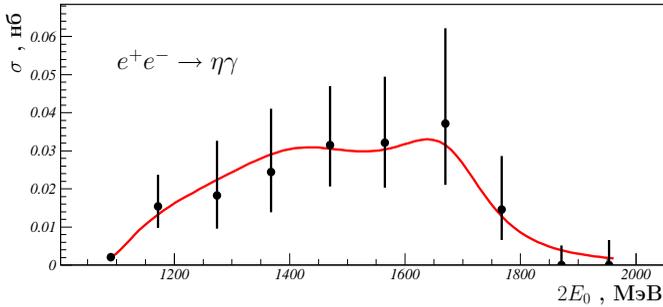


Рис. 23. Измеренное в данной работе сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  и результат аппроксимации сечения моделью, описанной в тексте.

процессов  $e^+e^- \rightarrow \rho' \rightarrow \eta\gamma$  ( $\sigma_{\rho'}$ ) и  $e^+e^- \rightarrow \rho'' \rightarrow \eta\gamma$  ( $\sigma_{\rho''}$ ) в максимумах резонансов. К сожалению, из-за небольшой статистики фазы амплитуд резонансов  $\rho'$  и  $\rho''$  не определяются при аппроксимации. Для них были использованы значения  $0^\circ$  или  $180^\circ$ . Параметры  $\rho$ ,  $\omega$  и  $\phi$  резонансов были взяты из наших предыдущих работ.

Аппроксимация, дающая наименьший  $\chi^2/ndf$ , была получена при значениях  $\varphi_{\rho'} = 180^\circ$  и  $\varphi_{\rho''} = 0^\circ$ . Для сечений в максимуме были получены значения:

$$\sigma_{\rho'} = (55.7_{-9.7}^{+11.2} {}_{-1.8}^{+7.1} \pm 1.6) \text{ pb},$$

$$\sigma_{\rho''} = (47.4_{-21.6}^{+72.1} {}_{-18.1}^{+4.8} \pm 1.3) \text{ pb},$$

где первая ошибка – статистическая, вторая – модельная, третья – систематическая. График сечения, соответствующий этим параметрам, приведен на рис. 23.

## 5 Заключение

В сезоне 2012–2013 гг. продолжались эксперименты с детектором СНД. Данные с интегральной светимостью около  $21 \text{ pb}^{-1}$  были набраны в энергетических областях  $\phi$ -,  $\rho$ - и  $\omega$ -резонансов. Все подсистемы детектора: трековая система, аэрогелевый черенковский счетчик, калориметр и мюонная система работали нормально. Большая часть данных записана с аэрогелевым счетчиком с показателем преломления  $n = 1.05$ , специально разработанным для этого эксперимента и позволяющим проводить  $e/\pi$ -разделение. Для обработки данных и моделирования эффективно использовались вычислительные кластеры НГУ и ССКЦ СО РАН.

Продолжался анализ ранее записанных данных. Для энергетического диапазона 1.05 – 2.00 ГэВ получены предварительные результаты по сечениям процессов  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ ,  $\eta\pi^+\pi^-$ ,  $\pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ ,  $\eta\gamma$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, базовых проектов ИЯФ СО РАН П.15.2.1, П.15.2.2 и П.15.2.3, проекта Отделения физических наук ОФН.1.1.2, программа 3.1 фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 1, грантов РФФИ 11-02-00276-а, 12-02-00065-а, 12-02-01250-а, 12-02-31488 мол-а, 12-02-31692 мол-а, 13-02-00375-а, 13-02-00418-а. РФФИ 11-02-00276-а, гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых ученых кандидатов наук МК-4345.2012.2 и научной школы НШ 5320.2012.2.

## Список литературы

- [1] В.М. Аульченко и др. // Препринт ИЯФ 2012-14, Новосибирск, 2012.
- [2] M.N. Achasov, et al. // JETP Lett. **92**, 84 (2010).
- [3] B. Aubert, et al. (BABAR Collaboration). // Phys. Rev. D **76**, 092005 (2007).
- [4] B. Aubert, et al. (BABAR Collaboration). // Phys. Rev. D **77**, 092002 (2008).
- [5] A. Antonelli, et al. (FENICE Collaboration). // Phys. Lett. **B313**, 283 (1993); Nucl. Phys. B **517**, 3 (1998).
- [6] В.М. Аульченко и др. // Препринт ИЯФ 2013-11, Новосибирск, 2013.
- [7] M.N. Achasov, et al. // Phys. Rev. D **66**, 032001 (2002).
- [8] B. Aubert, et al. (BABAR Collaboration). // Phys. Rev. D **70**, 072004 (2004).
- [9] A. Senchenko, et al. VEPP-2000 collider control system. // In: Proceedings of PCaPAC2012, Kolkata, India (2012) p.263.
- [10] E.V. Abakumova, et al. // Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 140402.
- [11] A. Suharev, et al. // Proceedings of Science (ISGC 2012) 013.

*В.М. Аульченко, М.Н. Ачасов, А.Ю. Барняков, К.И. Белобородов,  
А.В. Бердюгин, Д.Е. Беркаев, А.Г. Богданчиков, А.А. Ботов,  
А.В. Васильев, В.М. Весенев, В.Б. Голубев, К.А. Гревцов,  
Т.В. Димова, В.П. Дружинин, И.М. Землянский, Л.В. Кардапольцев,  
А.С. Касаев, А.Н. Кирпотин, Д.П. Коврижин, И.А. Кооп,  
А.А. Король, С.В. Кошуба, Е.А. Кравченко, А.Ю. Кульпин,  
А.С. Купич, А.П. Лысенко, К.А. Мартин, Н.А. Мельникова,  
Н.Ю. Мучной, А.Е. Образовский, А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова,  
Е.А. Переведенцев, К.В. Пугачев, Ю.А. Роговский, Е.В. Рогозина,  
А.Л. Романов, А.И. Сенченко, С.И. Середняков, З.К. Силагадзе,  
А.А. Сироткин, К.Ю. Скопень, А.Н. Скринский, И.К. Сурин,  
А.И. Текутьев, Ю.А. Тихонов, Ю.В. Усов, А.Г. Харламов,  
Ю.М. Жаринов, Ю.М. Шатунов, П.Ю. Шатунов, Д.Б. Шварц,  
Д.А. Штоль, А.Н. Шукаев*

**Эксперименты с детектором СНД на  $e^+e^-$  коллайдере  
ВЭПП-2000**

*V.M. Aulchenko, M.N. Achasov, A.Yu. Barnyakov, et al.*

**Experiments with the SND detector  
at the  $e^+e^-$  collider VEPP-2000**

ИЯФ 2013-13

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 24.06.2013 г.

---

Сдано в набор 25.06.2013 г.

Подписано в печать 26.06.2013 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-издл.

Тираж 135 экз. Бесплатно. Заказ № 13

---

Обработано на РС и отпечатано на

ротапринте ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.