

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

Г.Н. Абрамов, Е.Г. Авдеева, П.М. Астигеевич, М. Н. Ачасов,
В.М. Аульченко, А.Ю. Барняков, К.И. Белобородов, А.В. Бердюгин,
Д.Е. Беркаев, В.Е. Блинов, А.Г. Богданчиков, А.А. Ботов,
А.Д. Букин, Д.А. Букин, А.С. Валькович, А.В. Васильев,
В.М. Весенев, Е.П. Волкова, В.Б. Голубев, Т.В. Димова,
В.П. Дружинин, Л.В. Кардапольцев, А.Н. Кирпотин, Д.П. Коврижин,
И.А. Кооп, А.А. Король, С.В. Кошуба, Е.А. Кравченко,
А.Ю. Кульпин, А.П. Лысенко, К.А. Мартин, А.Е. Образовский,
А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, Е.А. Переведенцев, В.М. Попов,
Ю.А. Роговский, А.Л. Романов, С.И. Середняков, З.К. Силагадзе,
А.А. Сироткин, К.Ю. Сковпень, А.Н. Скринский, И.К. Сурин,
А.И. Текутьев, Ю.А. Тихонов, Ю.В. Усов, П.В. Филатов,
А.Г. Харламов, П.Ю. Шатунов, Ю.М. Шатунов, Д.Б. Шварц,
Д.А. Штоль, А.Н. Шукаев

ДЕТЕКТОР СНД: СОСТОЯНИЕ ДЕЛ
И ПЕРВЫЙ ОПЫТ РАБОТЫ
С ПУЧКАМИ ВЭПП-2000

ИЯФ 2009-19

НОВОСИБИРСК
2009

**Детектор СНД:
состояние дел и первый опыт работы с пучками ВЭПП-2000**

*Г.Н. Абрамов, Е.Г. Авдеева, П.М. Астигеевич, М. Н. Ачасов,
В.М. Аульченко, А.Ю. Барняков, К.И. Белобородов, А.В. Бердюгин,
Д.Е. Беркаев, В.Е. Блинов, А.Г. Богданчиков, А.А. Ботов, А.Д. Букин,
Д.А. Букин, А.С. Валькович, А.В. Васильев, В.М. Весенев, Е.П. Волкова,
В.Б. Голубев, Т.В. Димова, В.П. Дружинин, Л.В. Кардапольцев,
А.Н. Кирпотин, Д.П. Коврижин, И.А. Кооп, А.А. Король, С.В. Кошуба,
Е.А. Кравченко, А.Ю. Кульпин, А.П. Лысенко, К.А. Мартин,
А.Е. Образовский, А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, Е.А. Переведенцев,
В.М. Попов, Ю.А. Роговский, А.Л. Романов, С.И. Середняков,
З.К. Силагадзе, А.А. Сироткин, К.Ю. Сквпень, А.Н. Скринский,
И.К. Сурин, А.И. Текутьев, Ю.А. Тихонов, Ю.В. Усов, П.В. Филатов,
А.Г. Харламов, П.Ю. Шатунов, Ю.М. Шатунов, Д.Б. Шварц,
Д.А. Штоль, А.Н. Шукаев*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера,
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

Приводятся описание состояния дел на детекторе СНД и первого опыта работы с пучками ВЭПП-2000, а также предварительные результаты обработки экспериментов, выполненных ранее на ВЭПП-2М.

**The SND detector: the present status and first experience
of working with VEPP-2000 beams**

*G.N. Abramov, E.G. Avdeeva, P.M. Astigeevich, M.N. Achasov, V.M. Aulchenko,
A.Yu. Barnyakov, D.E. Berkaev, K.I. Beloborodov, A.V. Berdyugin, V.E. Blinov,
A.G. Bogdanchikov, A.A. Botov, A.D. Bukin, D.A. Bukin, A.S. Valkovich,
A.V. Vasiljev, V.M. Vesenev, E.P. Volkova, V.B. Golubev, T.V. Dimova,
V.P. Druzhinin, L.V. Kardapoltsev, A.N. Kirpotin, I.A. Koop, D.P. Kovrizhin,
A.A. Korol, S.V. Koshuba, E.A. Kravchenko, A.Yu. Kulpin, A.P. Lysenko,
K.A. Martin, A.E. Obrazovsky, A.P. Onuchin, E.V. Pakhtusova,
E.A. Perevedentsev, V.M. Popov, Yu.A. Rogovsky, A.L. Romanov,
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, P.V. Filatov,
A.G. Kharlamov, P.Yu. Shatunov, Yu.M. Shatunov, D.A. Shtol,
A.N. Shukaev, D.B. Shwartz*

Budker Institute for Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

Status report of the SND detector, description of the first experience of working with VEPP-2000 beams and preliminary results of data analysis from SND experiments at VEPP-2M are presented.

1 Введение

В начале 2009 г. коллайдер ВЭПП-2000 и детектор СНД были готовы к совместной работе с пучками электронов и позитронов. Пробный эксперимент состоялся в апреле 2009 г. в области энергии ϕ -мезонного резонанса. Целью этого эксперимента для СНД было измерение фоновых загрузок от пучков и настройка основных систем детектора. Набор статистики проводился в следующих точках по энергии: 505, 508, 509.1, 510.3, 511, 512.5 и 515 МэВ. Измерения проводились с токами электронов и позитронов от $5 \times 5 \text{ мА}^2$ до $15 \times 15 \text{ мА}^2$. Максимальная светимость составляла около $10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Средняя скорость записи была около 150 Гц, общее число записанных событий — около $3 \cdot 10^7$.

В этом препринте описывается работа систем СНД в первом эксперименте на ВЭПП-2000.

2 Детектор СНД

2.1 Вакуумная камера

Промежуток встречи детектора СНД представляет собой бериллиевую трубку диаметром 40 мм и длиной 259 мм с толщиной стенки 0.75 мм. Падающее на нее синхротронное излучение (СИ) с выхода дипольного магнита испытывает рэлеевское рассеяние в материале промежутка и при высокой энергии пучков может проникать через стенку вакуумной камеры и вызывать высокую частоту срабатываний проволочек трековой системы. Для защиты трековой системы от СИ вокруг промежутка встречи установлена дополнительная защита из одного слоя титановой фольги толщиной 60 мкм и двух слоев алюминиевой фольги с полной толщиной 200 мкм.

2.2 Трековая система

Трековая система предназначена для измерения координат треков заряженных частиц и их ионизационных потерь. Система состоит из девяти-слойной дрейфовой камеры с ячейкой струйного типа и пропорциональ-

ной камеры, расположенных в едином газовом объёме. Более подробное описание трековой системы и её проектных параметров приведено в [1, 2, 3, 4].

Во второй половине 2007 г. был проведён ремонт трековой системы, включавший в себя замену анодных проволок с малым натяжением и оптимизацию монтажа высоковольтных кабелей. По окончании ремонта весной 2008 г. с трековой системой СНД были возобновлены эксперименты по регистрации треков космических частиц. Схема экспериментов подробно описана в [5]. За периоды с апреля по июнь и с августа по ноябрь записано около 200 тыс. событий. В июне была подключена электроника катодных полосок. Около 100 тыс. событий космики записано с полностью укомплектованной электроникой.

Основываясь на записанных данных, было получено разрешение по z -координате (методом деления заряда) 1.5–2 мм, что лучше, чем в экспериментах 2007 г. (2 мм) и близко к проектному значению (1.5 мм).

В начале декабря 2008 г. был проведён эксперимент с β -изотопом ^{90}Sr , целью которого являлась абсолютная калибровка продольной координаты методом наведённого на катодные полоски заряда. Изотоп помещался в коллиматор и перемещался по внешней обечайке трековой системы с помощью прецизионного подвижного устройства. В результате измерений определено положение катодной структуры относительно корпуса трековой системы с точностью около 10 мкм.

15 декабря 2008 г. трековая система была установлена на промежуток встречи ВЭПП-2000. В январе–феврале 2009 г. было проведено подключение трековой системы к регистрирующей электронике.

В марте–апреле 2009 г. проведена серия тестовых заходов с детектором СНД на ВЭПП-2000. Трековая система использовалась для отбора коллинеарных событий. Всего было записано около 1 млн. треков. В целом, при работе с пучками ВЭПП-2000 трековая система показала удовлетворительную работу.

В конце апреля 2009 г. возобновлены эксперименты по регистрации космических частиц. Запуск электроники трековой системы осуществлялся от сигналов калориметра СНД, а с конца мая 2009 г. — от совпадения сигналов аэрогелевой, трековой и мюонной систем. Использование такой схемы запуска с временным разрешением запускающего сигнала $\sigma_t \approx 2$ нс позволяет провести калибровку зависимости координаты в R - φ плоскости от времени дрейфа и определить координатное разрешение трековой системы $\sigma_{R-\varphi}$.

На основе данных, записанных в экспериментах с пучками ВЭПП-2000 и космическими частицами были получены следующие значения

координатного, углового и энергетического разрешения трековой системы (рис. 1): $\sigma_{R-\varphi} \approx 100\text{--}200$ мкм, $\sigma_z \approx 1.5\text{--}2$ мм, $\sigma_\theta = 1.56^\circ \pm 0.16^\circ$, $\sigma_\varphi = 0.91^\circ \pm 0.01^\circ$, $\sigma_{dE/dx} / \langle dE/dx \rangle = 0.3$.

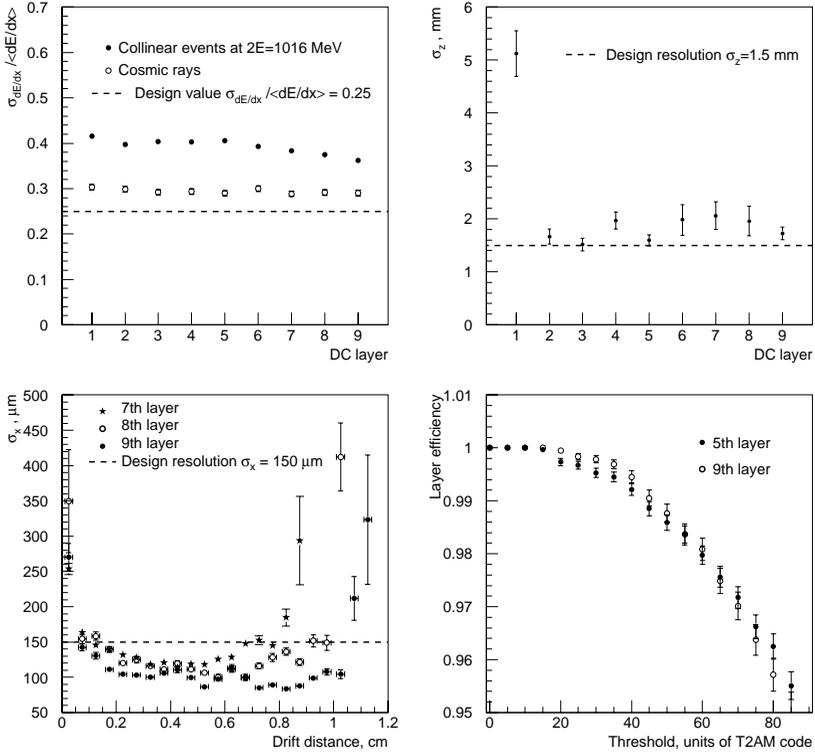


Рис. 1. а) отношение $\sigma_{dE/dx} / \langle dE/dx \rangle$ по слоям дрейфовой камеры для коллинеарных событий при энергии пучков ВЭПП-2000 $E = 508$ МэВ и космических треков; б) разрешение по продольной координате z по слоям дрейфовой камеры для космических треков; в) разрешение по координате в плоскости $R-\varphi$ в зависимости от длины дрейфа в 7–9 слоях дрейфовой камеры для космических треков; д) эффективность срабатывания 5 и 9 слоёв дрейфовой камеры для коллинеарных событий при энергии пучков ВЭПП-2000 $E = 508$ МэВ.

2.3 Газовая система

Газовая система предназначена для приготовления рабочих газовых смесей для трековой и мюонных систем СНД, снабжения этих систем рабочим газом в режиме непрерывного продува, контроля качества рабочего газа. Подробное описание системы приведено в [5].

Во второй половине 2007 г. была завершена сборка газовой системы: установлены газовые контроллеры Bronkhorst, произведено подключение электронных датчиков давления к системе медленного контроля СНД, установлена система видео-наблюдения за показаниями стрелочных приборов и состоянием масляных затворов. В 2008 г. газовая система была подключена к трековой системе СНД и использовалась в экспериментах по регистрации треков космических частиц и абсолютной калибровке продольной координаты с помощью β -изотопа, показав удовлетворительную работоспособность. Начиная с января 2009 г., помимо трековой системы СНД, к газовой системе подключена и мюонная система. В настоящее время газовая система работает в штатном режиме (поток газовой смеси 20 мл/мин для трековой системы и 60 мл/мин для мюонной системы).

Система контроля качества рабочего газа состоит из четырех мониторов газовой смеси. Каждый монитор представляет собой дрейфовую камеру и предназначен для измерения коэффициента газового усиления и длины поглощения ионизации в рабочем газе [5]. В настоящее время полностью выполнено поэлементное тестирование всех составляющих частей четырех мониторов, а также выполнена сборка двух мониторов. Оба монитора были протестированы на испытательном стенде. Один монитор в настоящее время установлен в электронной пультовой СНД и проходит проверку перед работой с трековой системой.

2.4 Система аэрогелевых черенковских счетчиков

Весной 2009 года система аэрогелевых черенковских счетчиков [6, 7] с показателем преломления аэрогеля $n = 1.13$ была установлена на детекторе СНД. Работоспособность системы проверялась на событиях с космическими частицами. Для этого были проведены заходы, в которых запись событий происходила при одновременном срабатывании аэрогелевой, трековой и мюонной систем. Записанные события используются как для калибровки дрейфовой системы в $r-\phi$ проекции, так и для исследования отклика счетчика, для чего с использованием трековой системы отбирались частицы, попавшие в счетчик. Предварительные результаты

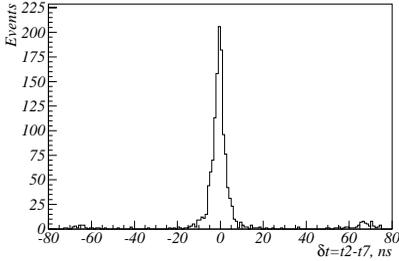


Рис. 2. Разность времен срабатывания второго и седьмого счетчиков.

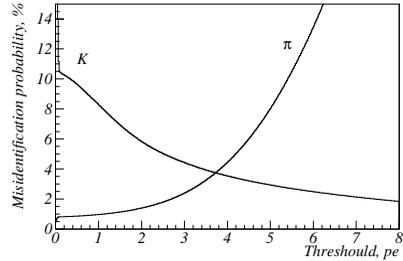


Рис. 3. Вероятность ложной идентификации π - и K -мезонов с энергией 1000 МэВ в зависимости от порога регистрации сигнала.

по временному разрешению счетчика показаны на рис. 2. На рисунке показана разность времен срабатывания второго и седьмого счетчиков системы. События с частицами прошедшими через пластины спектросместителя не отбрасывались при отборе событий. В настоящее время работа по настройке регистрирующей электроники аэрогелевых счетчиков продолжается.

В прошедшем сезоне было начато создание программ моделирования аэрогелевого черенковского счетчика. Описание геометрии и материалов счетчика близко к завершению. Моделирование отклика счетчика находится в стадии разработки. Моделирование отклика должно учитывать как черенковский свет, так и сцинтилляции при пролете заряженной частицы через активные элементы счетчика. Активными элементами являются аэрогель, пластина спектросместителя и тефлоновый отражатель. Калибровка вклада каждого источника света в каждом активном элементе будет произведена по экспериментальным данным. Светосбор счетчика будет калиброваться также по экспериментальным данным. На данный момент выполнено предварительное моделирование отклика счетчика с аэрогелем с показателем преломления $n = 1.13$ при перпендикулярном пролете заряженных π - и K -мезонов. Данное моделирование учитывает только черенковский свет из аэрогеля. Вклады от сцинтилляций в аэрогеле и сигналов из спектросместителя и тефлонового покрытия не учитываются. Моделирование выполнялось в составе всего детектора, что позволило учесть вещество как до, так и после счетчика. В моделирование было заложено, что ультрарелятивистская частица создает сигнал

со средней амплитудой 10 фотоэлектронов, что соответствует сигналу, полученному на тестовом счетчике при измерениях на космических мюонах. Моделирование позволило получить предварительные результаты для вероятности ложной идентификации π - и K -мезонов в зависимости от порога регистрации сигнала. На рис. 3 показаны вероятности ложной идентификации для частиц с энергией 1000 МэВ. Резкий рост ложной идентификации K -мезонов при низком пороге возникает вследствие шумов канала электроники. Ложная идентификация π -мезонов с вероятностью около 1% при низком пороге связана с ядерным неупругим взаимодействием π -мезонов как в веществе детектора, расположенном до аэрогелевого счетчика, так и в самом счетчике. Работы над программами моделирования продолжаются.

2.5 Калориметр

В настоящее время в калориметре детектора СНД работоспособно 98% счётчиков. Калориметр был откалиброван по космическим мюонам [8]. Сравнение результатов калибровки с результатами 1996 года показывает, что средний сигнал в первом и втором слоях калориметра не изменился, а в третьем слое уменьшился примерно в 1.5 раза. Изменение сигнала связано с заменой фотоприемников — вакуумных фототриодов (ВФТ) на третьем слое. Новые приборы имеют меньшее по сравнению с предыдущими произведение квантового выхода на коэффициент усиления. С другой стороны, для новых ВФТ не наблюдается уменьшение сигнала со временем, которое для старых приборов составляло около 3% в месяц [1]. Среднее изменение калибровочных коэффициентов за один месяц во всех трех слоях не превышает 1%. На рис.4 показан спектр энерговыделений электронов и фотонов с энергией около 500 МэВ в калориметре СНД. Характерная ширина распределения (ПШПВ/2.36) составляет 6.5%, что согласуется со значением 6%, наблюдавшимся в 1996 году. Таким образом, пока не выявлено существенных отклонений параметров калориметра от ранее достигнутых значений.

Неисправности в калориметре связаны с выходом из строя как ВФТ, так и предусилителей (ЗЧУ). Последний полный ремонт калориметра был проведен в 2004 году. Для выполнения полноценных экспериментов необходимо проводить замену неисправных ВФТ и предусилителей раз в 2–3 года. Электроника калориметра была разработана и изготовлена почти 20 лет назад. Используемая схема подходит для новых экспериментов на ВЭПП-2000, но элементная база устарела, а монтаж не удобен при ремонте калориметра, т.к. чтобы заменить ВФТ или плату ЗЧУ в луч-

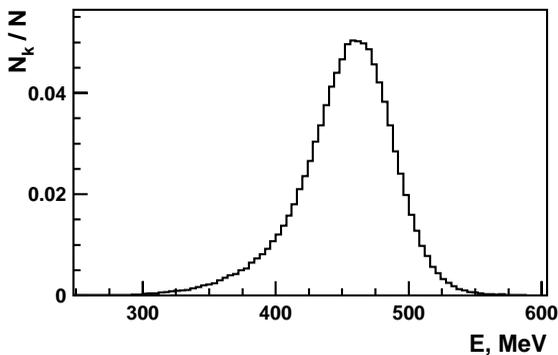


Рис. 4. Энерговыведение фотонов и электронов с энергией около 500 МэВ в калориметре СНД.

шем случае необходимо отпаять, а затем припаять несколько проводов и кабелей непосредственно на экспериментальной установке.

С учетом опыта многих лет работы с калориметром были разработаны предложения по новой электронике. Предполагается, что сигналы и напряжения питания будут передаваться по кросс-плате (многослойная печатная плата). При этом большинство монтажных соединений будет производиться посредством разъемов, что облегчит замену электроники и ВФТ даже в условиях ограниченного доступа к полусфере. В настоящее время ведется разработка прототипа новой электроники.

2.6 Пропорциональные трубки мюонной системы

Мюонная система предназначена для регистрации мюонов, вылетающих за пределы детектора, и подавления фона от космических частиц. На детекторе СНД мюонная система состоит из двух подсистем: системы пропорциональных трубок и системы пластиковых сцинтилляционных счетчиков.

Трубки сгруппированы в модули, каждый из которых включает 16 пропорциональных трубок. Вокруг детектора параллельно оси пучков расположены 14 модулей трубок и 14 счетчиков (баррельная часть). Кроме того, на каждом из торцов расположены по одному модулю, включающему 32 трубки и по два сцинтилляционных счетчика. Таким образом, мюонная система включает в себя 18 сцинтилляционных счетчиков и 288 пропорциональных трубок.

Диаметр анодных проволочек пропорциональных трубок равен 50 мкм. В качестве рабочего газа используется смесь 95.5% Ar + 4.5% CO₂, продувка производится непрерывно.

Каждый модуль трубок оборудован электроникой, на выходе которой формируются логические сигналы, соответствующие срабатыванию каждой отдельной трубки, а также совместный логический сигнал ИЛИ всех трубок модуля, необходимый для формирования аргументов первичного триггера детектора.

Тестирование модулей производилось путем измерения счетных характеристик трубок и времени дрейфа электронов в трубках. Счетная характеристика (рис.5) снималась с использованием радиоактивного источника ⁹⁰Sr. Плато счетной характеристики пропорциональных трубок составляет 2–2.2 кВ. Предпочтительный диапазон рабочего напряжения составляет 2.100–2.150 кВ. Временной спектр измерялся на испытательном стенде по космическим мюонам с помощью телескопа из двух сцинтилляционных счетчиков. Полная ширина спектра составила не более 600 нс.

На данный момент все элементы мюонной системы, кроме торцевой части, установлены на детектор. Система находится в рабочем состоянии, из 224 пропорциональных трубок неисправна одна.

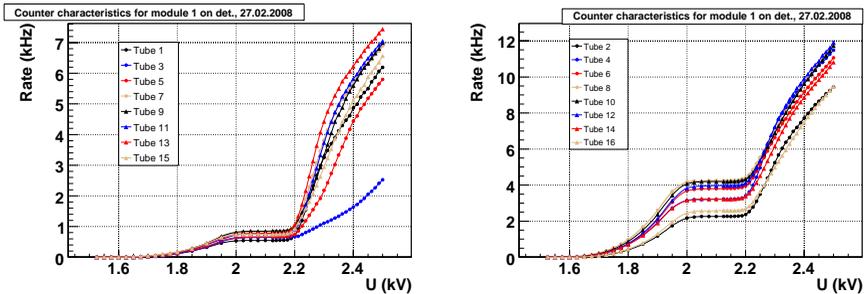


Рис. 5. Счетные характеристики модуля пропорциональных трубок для внутреннего (слева) и внешнего (справа) слоёв трубок

2.7 Сцинтилляционные счетчики мюонной системы

Сцинтилляционные счетчики использовались в эксперименте на СНД в 1995–2000 годах [9]. Для подготовки их к экспериментам на ВЭПП-2000 потребовалось провести тестирование всех ФЭУ и измерение парамет-

ров самих счетчиков. На специальном стенде [5] для каждого счетчика с использованием космических мюонов были измерены длина затухания и суммарное количество фотоэлектронов, выбитых из фотокатодов обоих ФЭУ. После проведения этих измерений все баррельные счетчики (14 штук) были установлены на детектор и подключены к электронике. Во время пробного сканирования, проведенного на ВЭПП-2000 в апреле 2009 года, использовалась только ДА-НЕТная и триггерная информация со счетчиков.

Кроме того, были проведены заходы на космических мюонах. Используя события от космических частиц и данные с калориметра, можно проверить эффективность срабатывания каждого сцинтилляционного счетчика. Для этого была написана специальная программа, которая предварительно была проверена на событиях моделирования. В результате было получено, что эффективность каждого счетчика близка к 100%. В дальнейшем эта программа будет использоваться для контроля работоспособности счетчиков.

После ремонта модулей электроники были получены амплитудные и временные спектры счетчиков (см. рис. 6). С помощью данных амплитудных спектров напряжения на ФЭУ были подобраны таким образом, чтобы средние величины амплитуд с противоположных концов счетчика стали примерно одинаковы. В дальнейшем планируется написание программ калибровки как амплитудных, так и временных каналов.

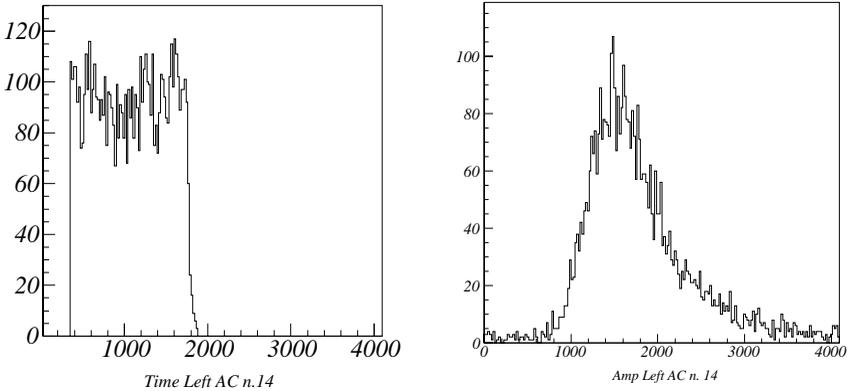


Рис. 6. Типичный амплитудный и временной спектр сцинтилляционного счетчика.

2.8 Электроника детектора

Электроника детектора СНД детально описана в [3, 10, 5]. В настоящее время статус разработки и производства блоков электроники следующий. Платы ПВВ (процессор ввода-вывода), Т2АМ (время и две амплитуды с проволочек дрейфовой камеры на Flash ADC, 4 канала), А24М (АЦП с пиковым детектором для калориметра на 24 канала), ПА24 (24 Flash ADC для полосок дрейфовой камеры), ДА-НЕТ платы трубок (32 канала битовой информации о срабатывании пропорциональных трубок) изготовлены, установлены в крейтах КЛЮКВА и проверены. Логика работы всех плат реализована на ПЛИС Altera, для которых написаны соответствующие микропрограммы, позволяющие оптимизировать чтение информации из этих плат. Микропрограммы загружаются в память информационных плат перед началом работы через процессор ввода-вывода по магистрали КЛЮКВА. Подавление нулей и оптимизация чтения данных в платах А24М, Т2АМ и ПА24 реализованы следующим образом. В информационных платах А24М измеренные пьедесталы каналов загружаются непосредственно в память самих плат через ПВВ. После оцифровки сигналов с калориметра логика платы формирует битовые маски сработавших каналов, устанавливая в "1" те биты, номера которых соответствуют номеру канала, в котором амплитуда сигнала превышает пьедестал. Перед чтением данных ПВВ считывает эти маски (две для каждой платы), подсчитывает количество единиц в маске и выполняет циклы чтения платы (количество циклов чтения равно числу установленных бит в маске). Плата передает в ПВВ только данные из тех каналов, в которых амплитуда сигнала превышает предустановленный порог. Номер канала вычисляется по установленному в "1" номеру бита в маске. Для оптимизации чтения информационных плат Т2АМ был разработан следующий алгоритм. После срабатывания порогового дискриминатора логика платы анализирует полный буфер данных (оцифрованные Flash ADC 64 слова) и "грубое время" (время в 25нс тактах оцифровки между приходом сигнала на плату и сигналом первичного триггера), вычисляя таким образом номер слова в буфере данных, с которого начинается сигнал. По предварительно записанной в плату информации о длине сигнала из полного буфера данных вырезается "окно", содержащее данные о полном сигнале и несколько слов перед сигналом (для коррекции пьедестала), которое в дальнейшем передается в ПВВ. Перед чтением данных ПВВ запрашивает у платы размер "окна" и выполняет циклы чтения (количество циклов чтения равно размеру "окна"). Если пороговый дискриминатор не сработал в качестве размера "окна" плата выдает 0 и

чтение данных не производится. Подавление нулей по времени происходит в ПВВ (если дискриминатор не сработал плата выдает во временном канале 0). В настоящее время размер буфера на чтение равен 25, т.е. на один канал приходится 54 слова данных (субадрес и 1 слово данных о времени и 2 субадреса и $2 \cdot 25$ слов амплитуд с двух концов проволочек дрейфовой камеры). В платах ПА24 реализован несколько другой алгоритм. Как и в А24М платах перед началом чтения в память ПА24 заносятся предварительно измеренные пороги. Логика платы анализирует полный буфер данных (оцифрованные Flash ADC 64 слова). Если величина одного из слов данных превышает порог, то канал помечается как сработавший. Поскольку на полосках сигнал наводится зарядом собранным на проволочках пропорциональной камеры, размер ячейки которой равен 3мм, разброс сигналов по времени невелик и составляет 60 нс. Это позволяет считывать из платы не весь буфер (64 слова), а только информацию о полезном сигнале (его положение в буфере данных фиксировано с точностью ± 2 слова данных по времени). Перед началом работы в плату заносятся два числа, 1-ое — отступ от начала буфера данных, 2-е — собственно размер "окна", в котором находится сигнал. Перед чтением данных ПВВ запрашивает у платы размер "окна" и, если в этом канале есть данные с превышением порога, выполняет соответствующее количество циклов чтения; в противном случае плата выдает 0 и чтение данных не производится. В настоящее время отступ от начала буфера равен 10, размер "окна" — 30, т.е. на один канал приходится 31 слово данных (субадрес канала и собственно 30 слов данных). Время чтения одного слова данных из информационных плат равно 100 нс для команд циклического чтения данных и 250 нс для команды чтения маски сработавших каналов и команды чтения размера "окна". За два года эксплуатации информационные платы Т2АМ и ПА24 продемонстрировали довольно высокую надежность: в платах Т2АМ (57 плат, по 4 канала в каждой) вышло из строя 2 канала; в платах ПА24 (12 плат, по 24 канала в каждой) — ни одного. ПВВ (процессоры ввода-вывода (15 плат) — ни одной не вышло из строя. В платах А24М — много каналов с большой интегральной нелинейностью, по причине одной из микросхем в УВХ (устройстве выборки и хранения данных).

2.9 Система сбора данных (online)

Продолжалось развитие системы сбора данных детектора СНД. В 2008-2009 гг. было реализовано чтение новых подсистем детектора, использующих платы ТП (сцинтилляционные счетчики мюонной системы и че-

ренковские счетчики аэрогелевой системы), чтение регистров (ДА-НЕТ) внешней системы. Введена в эксплуатацию новая версия проекта Т2А с подавлением не сработавших каналов. В последовательность подготовки к сбору данных была добавлена калибровка плат ПА24. Реализовано сохранение пересчетов в файлы, создана база данных для их хранения.

В первом квартале 2009 г. было проведено месячное сканирование с работающим ВЭПП-2000. Кроме решения физических задач в ходе эксперимента проводилась интеграционная проверка системы сбора данных, велся учет недостатков как самой системы, так и пожеланий операторов относительно интерфейса к ССД. Это позволило улучшить качество системы сбора данных. По наиболее актуальным замечаниям в систему вносились исправления во время эксперимента. Остальные замечания были зафиксированы и отсортированы по степени важности. Работы с наивысшим приоритетом запланировано завершить до начала следующих экспериментов на ВЭПП-2000.

Список основных изменений:

- переработан редактор конфигурации захода, добавлена возможность выбора предустановленной конфигурации ("template"); теперь несмотря на то, что оператор может редактировать только ограниченное подмножество параметров, при подтверждении изменений (команда set) устанавливается также скрытая от оператора часть конфигурации;
- номер конфигурации триггера теперь устанавливается отдельно от конфигурации остальной электроники и сохраняется в истории захода; сохраняется также энергия, при которой записывались данные;
- создана программа вывода журнала на алфавитно-цифровой терминал;
- изменено оформление лог-журнала с использованием стилей css;
- сервис звукового оповещения оператора реализован как независимый процесс с возможностью конфигурации;
- реализован набор средств для отладки ССД (сбор, распечатка пакетов, печать сырых событий, печать содержимого буфера при остановке по тайм-ауту и др.);
- добавлена распечатка статистики захода (число событий, среднее живое время, светимость и т.д.) по номеру захода.

Решено множество программных и интеграционных проблем, таких как: тайм-аут при паузе, ряд проблем с распределителем событий, исправлена локализация в журнале оператора, проблема кратковременно-го разрыва связи с сервером СУБД MySQL, исправлен ряд проблем с запуском и восстановлением контекста процессов, изменением размеров в отображении пересечеток и др.

Некоторые проблемы потребовали отдельного изучения. Например, исследовалась возможность оптимизации обмена данными между сервером СУБД и пользовательским интерфейсом, реализованном в виде сценариев PHP. Рассматривались два подхода к оптимизации. Первый подход — это уменьшение числа соединений за счет пере-использования открытых соединений между сервером HTTP и СУБД. Для программ на языке PHP это реализуется с помощью сохранения сессий. К сожалению, выяснилось, что этот механизм работает некорректно, в противоречии с документацией. Второй подход — это непосредственное кэширование данных. Рассматривались: вариант безтипового кэширования, где выборка из кеша происходит по параметрам запроса, и вариант, специализированный в интерфейсе по типам данных, который и был выбран для использования в дальнейшем.

Наблюдались систематические остановки сбора данных по тайм-ауту при чтении при больших загрузках (при большом среднем объеме события и высокой частоте). В этих ситуациях проводились исследования, в результате которых выявлялись причины и находились решения проблем.

Например, возникала ситуация, в которой в начале захода от ПВВ приходили фрагменты событий, не относящихся к заходу. Это явление было исследовано и ему было найдено следующее объяснение. ПВВ вычитывает события из оцифровывающей электроники, циклически выполняя последовательность команд, записанных в память SRAM. Если цикл чтения многофрагментарного события прервется, и будет загружен новый набор команд в SRAM, то ПВВ сначала завершит выполнение старого цикла чтения, а затем приступит к выполнению нового. К сожалению, в наборе команд ПВВ нет команды сброса старого цикла, а комбинациями из других (в том числе отладочных) команд симитировать сброс не удалось. Нашелся только один эффективный способ сброса — путем перезагрузки проекта ПВВ. Но такой способ представляется неприемлемым, так как он значительно увеличивает стартовое время захода и потенциально сокращает срок службы ПВВ (из-за избыточного числа перезаписей проекта).

Было найдено другое решение — вычитывание старых фрагментов

в общем потоке с последующей фильтрацией. Особенностью фильтрации при высоких нагрузках является то, что номер события пришедшего фрагмента в начале захода может отличаться от ожидаемого как по причине выполнения старого цикла команд ПВВ, так и по причине потерь фрагментов в сети Ethernet. В первом случае следует проигнорировать такой фрагмент, во втором — сделать перевызов предыдущих потерянных фрагментов. Для разделения этих двух ситуаций были изучены характерные особенности фрагментов, которые приходят от старого цикла ПВВ. Выяснилось, что для однозначной идентификации достаточно того, что эти фрагменты идут первыми в заходе и относятся к одному событию, у которого отсутствует начальный фрагмент. Фильтрация фрагментов от старого цикла ПВВ заканчивается с приходом начального фрагмента первого события.

В начале захода возникала также ситуация, когда все фрагменты событий были вычитаны, по ним построены события, но новых фрагментов почему-то не приходило. С помощью поочередного исключения из чтения отдельных крейтов, а затем и оцифровывающих плат, были выявлены вышедшие из строя платы оцифровки, неправильная работа которых приводила к блокировке чтения ПВВ. Это оказались платы ПА24, которые были затем отремонтированы.

Самая интересная ситуация возникала на сверхвысоких нагрузках, которыми сопровождался сброс пучков ВЭПП-2000. При этом резко возрастала частота событий одновременно с размером данных, начинали происходить потери фрагментов в сети Ethernet, что через некоторое время приводило к остановке набора событий по причине "исчерпан лимит времени на сборку события".

Анализ записи передаваемых по сети данных показал, что процесс Readout не может получить от ПВВ ожидаемый фрагмент события, несмотря на многочисленные перевызовы. Фрагмент, который приходил после перевызова, имел тот же адрес в буфере ПВВ, что и ожидаемый. Но это был фрагмент другого события: номер события, содержащийся в служебной информации фрагмента, значительно превышал ожидаемый номер. ПВВ предоставляет доступ к трем указателям на внутренний кольцевой буфер (рис.7): указатель чтения (RC), который указывает на текущий передаваемый в сеть фрагмент, указатель записи (WC), который указывает на место в буфере, куда будет записываться очередной фрагмент события, и ограничитель указателя записи (WB), который ограничивает продвижение указателя записи. Указатель WB передвигается вперед процессом Readout по мере получения фрагментов.

Мы предполагаем, что на высоких нагрузках в кольцевом буфе-



Рис. 7. Фрагменты в буфере ПБВ. RC – указатель чтения, WC – указатель записи, WB – ограничитель указателя записи WC. Указатели занимают правильное положение: WC находится между RC и WB.

ре ПБВ возможен "перескок" указателя записи WC через ограничитель WB (рис.8). Если после "перескока" через WB, WC затем "перескакивает" через RC, то это приводит к тому, что перезаписываются фрагменты, которые еще не были получены процессом Readout, а это уже приводит к сбоям набора данных.

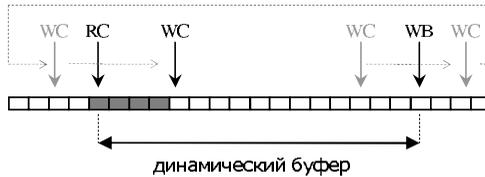


Рис. 8. "Перескок" указателя записи WC через ограничитель WB. WC достиг не только WB, но и RC. Серым цветом отмечены фрагменты, утерянные вследствие "перескока".

При низких нагрузках "перескока" WC через WB не наблюдалось. Было проверено предположение, что на невысоких нагрузках условие ограничения с помощью WB не применялось, т.е., WC попросту никогда не достигал WB. Предположение не подтвердилось: при отсутствии сдвига WB фрагменты переставали приходить, а чрезмерный сдвиг WB приводил к остановке сбора данных по той же причине, что и на высоких нагрузках, из-за перезаписи фрагментов.

Зависимость обработки ограничителя записи в ПБВ от загрузки породила гипотезу, согласно которой проверка ограничения проводится перед сдвигом WC, если только прошел какой-то период времени (T). Как следствие, когда частота записи фрагментов (f) невысока, сдвиг WC происходит реже T, и проверка делается на каждом сдвиге. Если же частота

фрагментов высока, то WC успевает сдвигаться несколько раз за период T, а проверка делается через f^*T фрагментов. Поскольку максимальная скорость сдвига WC ограничена скоростью чтения электроники (f_max), то WC может двигаться без проверки не более чем $f_max * T$ фрагментов. А это значит, что если WB сдвигать таким образом, чтобы между WB и RC оставался запас в $f_max * T$ фрагментов, то проблемы с перезаписью фрагментов можно избежать.

Для подтверждения гипотезы было решено изучить поведение ССД на высоких нагрузках при различном размере динамического буфера (расстояние между RC и WB). Требовалось путем уменьшения размера динамического буфера добиться того, что ССД перестанет останавливаться.

Для изучения поведения ССД на высоких нагрузках были проведены эксперименты при следующих условиях: запуск от генератора с частотой 5 КГц, для увеличения размера события в платы А24 и ПА24 были загружены нулевые пьедесталы, поток данных составил около 4 Кб/сек, живое время — 3–5%. Изменение динамического диапазона буфера ПВВ варьировалось в заходах от 256 до 10 блоков.

Физический размер буфера ПВВ составляет 256 блоков. Если, к примеру, размер динамического буфера будет составлять 200 блоков, тогда 56 блоков будут "зарезервированы" на "перескок".

В заходах при размере динамического буфера 200–256 фрагментов, происходили многочисленные перевызовы и заходы завершались из-за невозможности собрать событие, и чем больше был буфер, тем меньше времени проходило до остановки. Чтение с перевызовами, но без сбоев, наблюдалась при размере буфера в 100 блоков.

Таким образом, подтвердилось, что проблему можно избежать уменьшением динамического размера буфера.

Эксперименты были продолжены для поиска оптимального размера буфера для текущей конфигурации, при котором система будет способна выдерживать сверхвысокие загрузки, а живое время ССД при этом будет максимально. Наибольшее живое время наблюдалось при размере динамического буфера в 20 блоков, при этом потерь фрагментов в сети Ethernet не наблюдалось.

Оптимальный размер динамического буфера оказался на порядок меньше, чем физический размер буфера ПВВ. Этому можно дать следующее объяснение. Имеется только один способ перевызывать фрагмент от ПВВ — сдвинуть указатель RC на потерянный фрагмент (рис.9), и тогда через сеть Ethernet опять будут переданы все фрагменты, начиная с потерянного. Изучение истории сбора фрагментов показало, что

чаще всего теряется один или несколько последовательных фрагментов. А в такой ситуации эффективность перевызовов напрямую зависит от размера динамического буфера ПВВ.



Рис. 9. Пример перевызова одного потерянного фрагмента. Серым цветом отмечен потерянный фрагмент. После сдвига RC кроме потерянного фрагмента повторно придет массив уже полученных ранее фрагментов.

Так, например, если размер динамического буфера составляет 20 фрагментов, то один перевызов может привести к пересылке 19 ненужных фрагментов по сети, а если 200 фрагментов, то — к пересылке 199 ненужных фрагментов, при этом избыточная нагрузка на сеть будет больше в десять раз. А избыточная нагрузка, в свою очередь, влечет за собой новые потери фрагментов и новые перевызовы.

В итоге, эксперименты с размером динамического буфера позволили не только избежать проблемы с перезаписью в кольцевом буфере ПВВ, но и повысить эффективность сбора данных при высоких нагрузках.

2.10 Третичный триггер

Модули отбора третичного триггера подключаются в соответствии с конфигурацией, хранящейся в базе данных. Там же задана параметризация и коэффициенты деления отборов. В экспериментальном заходе начала 2009 третичный триггер не использовался, т.к. предполагался набор максимального количества событий, в том числе фоновых, для изучения. Отбор по количеству сработавших кристаллов калориметра использовался, однако, при наборе космики для калибровки детектора. Выработка условий третичного триггера для пучковых событий требует дополнительного изучения.

2.11 Система обработки данных (offline)

Подробное описание системы обработки данных дано в [3, 4]. Для моделирования в среде Geant4 на данный момент реализовано геометрическое описание и отклики калориметра, трековой и мюонной систем детектора. В моделирование триггера включены все данные подсистемы детектора.

В 2009 году был, в основном, реализован новый пакет отображения событий для детектора СНД представляющий собой оконное приложение реализованное на языке C++ с помощью графической библиотеки Qt 4.5. Пакет поддерживает основные двумерные проекции ($R-\varphi$, $R-z$, развертка калориметра), конфигурацию цифровых настроек, информация о номере захода и события, масштабирование и сдвиг, сохранение изображения в форматах EPS и SVG, сохранение текущей пользовательской сессии. В настоящее время отображаются только элементы детектора, такие как срабатывания проволочек дрейфовой камеры, кристаллов калориметра, полосок пропорциональной камеры и мюонной системы (трубки и счетчики). Пакет интегрирован в среду СУМО, и поэтому может работать как с записанными событиями, так и в online. Пример работы приложения приведен на рис.10.

Одновременно развивалась и гибридная реализация отображения событий (C++/Fortran), были добавлены срабатывания полосок, внешней системы, треков в камере, специализированный треков в калориметре, возможность отбора событий по формулам в настроечном (fwk) файле.

В настоящее время основные работы по модификации системы ведутся в следующих направлениях:

- модернизация системы сборки ПО с учетом накопленных пожеланий/предложений;
- модернизация существующей программы реконструкции частиц в калориметре с использованием опыта, накопленного в предыдущем эксперименте [9];
- отладка программы реконструкции треков в трековой системе;
- отладка геометрического описания и отклика подсистем детектора, физических процессов в камере, уточнение моделирования светосбора в калориметре и счетчиках мюонной системы;
- создание и отладка программ калибровок подсистем детектора;
- налаживание взаимодействия с базами данных констант и калибровок;
- оптимизация работы системы и увеличение скорости моделирования.

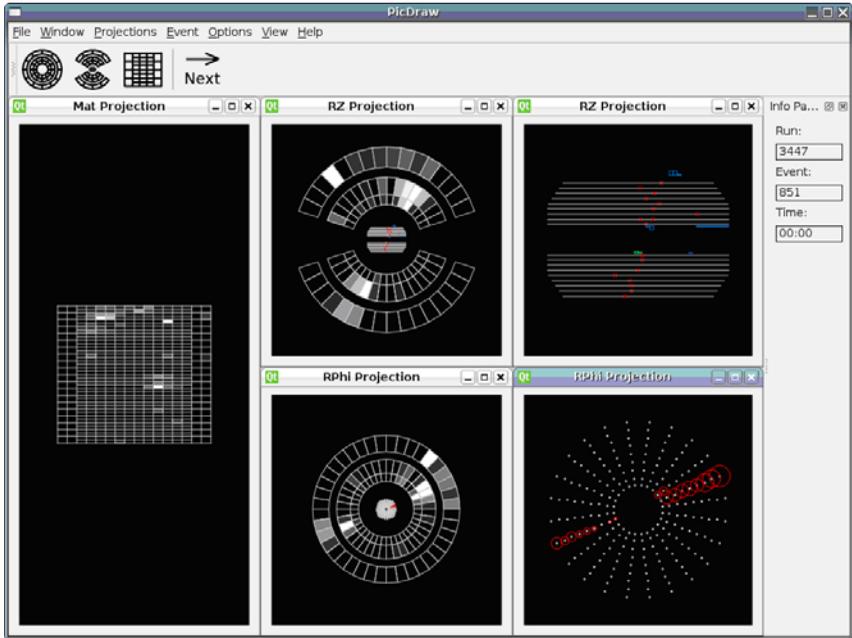


Рис. 10. Пример работы новой реализации пакета отображения событий.

2.12 Состояние дел по нейтронному проекту

Имеется две специфические особенности регистрации процесса $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$. Во-первых, во всем диапазоне ВЭПП-2000 рождающиеся антинейтроны — нерелятивистские, поэтому для их выделения можно использовать методику измерения времени пролета. Во-вторых, рождающиеся антинейтроны имеют заметную длину пробега в NaI(Tl) $\lambda_{\text{ann}} \sim 5 \div 10$ см, поэтому их аннигиляция происходит в глубине калориметра, и такое событие выглядит резко нецентральным и трудно распознаваемым (рис.11).

В предыдущих работах [3, 5, 10, 11, 12] была подробно проанализирована возможность измерения сечений процессов $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ и $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ с детектором СНД на ВЭПП-2000. В настоящей работе представлены последние результаты.

Была усовершенствована методика измерения временного разрешения счетчика на кристалле NaI(Tl) с фототриодом. Были изготовлены

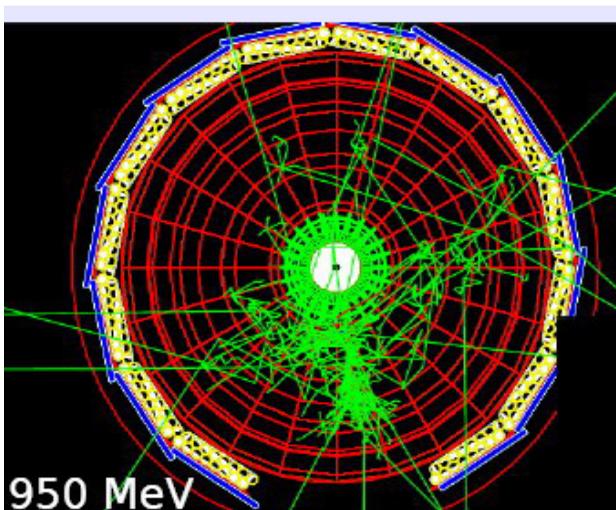


Рис. 11. Моделированное событие $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ в детекторе СНД. Линии соответствуют трекам вторичных заряженных частиц и фотонов.

новые запускающие сцинтилляционные счетчики с ФЭУ с МКП с временным разрешением 0.8 нс, что позволило уточнить экспериментальное временное разрешение счетчика NaI(Tl). Получено временное разрешение 1.7 нс при энергосвободении 70 МэВ. Предыдущий результат, полученный с использованием запускающих счетчиков с временным разрешением 1.8 нс составлял 1.9 нс. Моделирование предсказывает, что при повышении выделяющейся в кристалле энергии может быть достигнуто временное разрешение лучше 1 нс.

В плане работ по созданию серийного флэш-АЦП для СНД был изготовлен модуль в стандарте КЛЮКВА, включающий в себя 24 канала 12-разрядных флэш-АЦП с тактовой частотой 40 МГц. Логика модуля построена на основе микросхемы ALTERA CYCLONE C1. В настоящее время разработчики модуля проводят его испытания и настройку; на осень запланированы физические измерения временного и амплитудного разрешения.

Продолжалась работа по проверке моделирования взаимодействия антинейтронов с веществом (водород) с использованием пакета Geant4. Сравнивались экспериментальные данные по полному сечению взаимодействия антинейтронов, полученные с детектором OBELIX на LEAR с

моделированием в Geant4 (рис.12). Сравнение показывает, что при импульсах менее 150 МэВ/с (кинетическая энергия 12 МэВ), моделирование дает резко завышенное сечение. Превышение при меньших импульсах — не более 20%. Поскольку область импульсов менее 150 МэВ/с представляет наибольший интерес, а моделирование является необходимым для обработки экспериментальных данных, нам предстоит решить эту проблему.

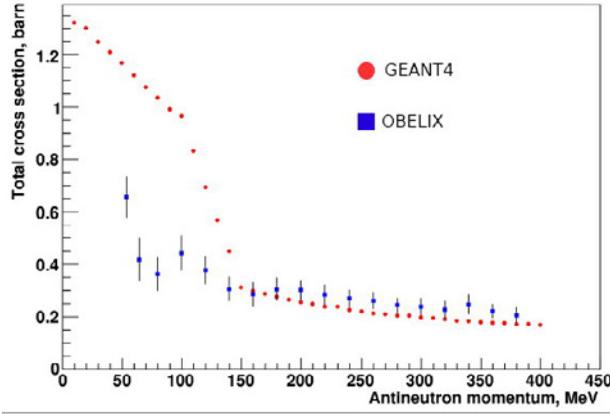


Рис. 12. Сравнение полных сечений взаимодействия антинейтронов на водороде для моделирования Geant4 и эксперимента OBELIX

2.13 Моделирование $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$

На e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2000 предполагается измерить с высокой точностью сечения всех возможных эксклюзивных процессов e^+e^- аннигиляции в адроны в диапазоне энергий $2E_b = 0.3 - 2.0$ ГэВ. Для измерения этих сечений необходима возможность моделирования всех процессов e^+e^- аннигиляции, происходящих в исследуемом интервале энергий. В области энергий выше 1.2 ГэВ, где рождаются возбужденные состояния векторных мезонов ρ , ω и ϕ , число возможных адронных конечных состояний исчисляется десятками. Динамика большинства этих процессов исследована слабо. Для некоторых процессов экспериментальная информация отсутствует вообще. Поэтому для моделирования процессов e^+e^- аннигиляции в этой области хотелось бы иметь генератор собы-

тий, позволяющий легко менять физическую модель процесса, а также добавлять новые процессы.

Для решения этой задачи был разработан и реализован генератор рождения адронов в e^+e^- аннигиляции. Основной особенностью этого генератора событий является то, что лептонная ($e^+e^- \rightarrow \gamma^*$) и адронная ($\gamma^* \rightarrow \text{hadrons}$) части матричного элемента описываются отдельно в виде соответствующих тензоров и сворачиваются в самой программе. Это позволяет быстрее добавлять новые процессы и лучше контролировать физическую модель.

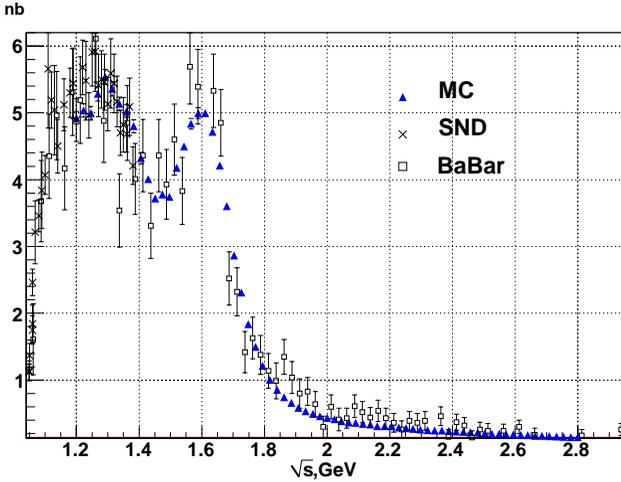


Рис. 13. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области ω' и ω'' мезонов, треугольники – моделирование, крестики – данные полученные на детекторе СНД [19], квадратики – данные полученные на детекторе ВаБар [20].

На данный момент включены процессы рождения следующих адронных состояний:

- $\pi^+\pi^-$ [13],
- $\pi^+\pi^-\pi^0$ [14], $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ [15, 16],
- $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ [15, 16],
- $\pi^0\pi^0\gamma$ [17, 18].

Для иллюстрации, на рис. 13 приведено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ в области ω' и ω'' мезонов, рассчитанное при помощи моделирования и измеренное на детекторе ВаВар. Так же в генераторе учтены радиационные поправки за счет излучения дополнительных фотонов из начального состояния [21, 22]. Код программы интегрирован с программой моделирования событий на детекторе СНД.

3 Анализ данных СНД-ВЭПП-2М

3.1 Анализ процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$

Измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$ в полном диапазоне энергии ВЭПП-2М ($2E=0.36-1.38$ ГэВ) в случае больших полярных углов вылета всех конечных частиц ($20^\circ < \theta_i < 160^\circ$) и больших пространственных углов между направлениями вылета всех конечных частиц ($\alpha_{ij} > 9^\circ$), результат измерения не противоречит теоретическому расчёту (рис. 14).

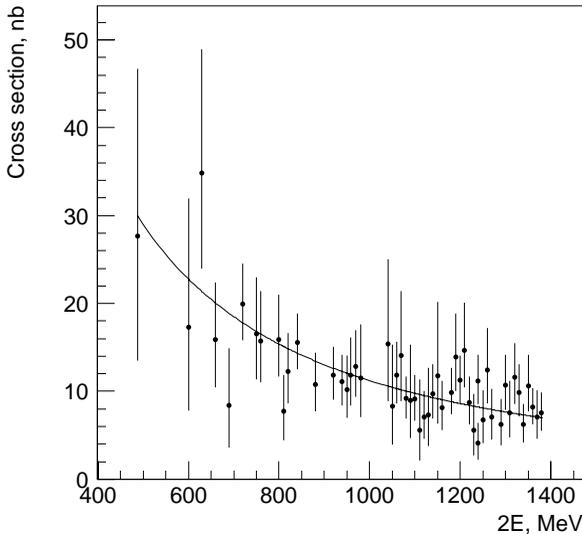


Рис. 14. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$, измеренное детектором СНД в полном диапазоне энергии ВЭПП-2М, предварительный результат. Сплошной линией показан результат аппроксимации теоретической зависимостью.

Статистическая ошибка измерения 3.8 %. Оценка систематической ошибки: 7.7 %, основной вклад вносит различие в распределениях по полярному углу вылета конечных частиц для данных эксперимента и моделирования.

Для улучшения точности измерения сечения первичное моделирование процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$ будет выполнено с помощью пакета ComPHEP, использующего точное выражение для квадрата матричного элемента и учитывающего радиационные поправки. Также будет проведена оптимизация условий отбора.

3.2 Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$

Был проведён анализ процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ в области энергий ниже 1 ГэВ в системе центра масс. Ранее этот процесс изучался на детекторах КМД [23] и BABAR [24].

В работе использовались экспериментальные данные, набранные в 1998 и 2000 годах в интервале энергий 600-970 МэВ. Суммарная статистика соответствует интегральной светимости 8.7 пб^{-1} .

Основными фоновыми процессами являются следующие реакции: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$, а также пучковый фон и фон от космических частиц.

Использовались следующие условия отбора событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$:

1. Число заряженных частиц равно 4.
2. Нет срабатывания внешней системы.
3. Срабатывает первичный триггер (число треков ≥ 2 , число кластеров в калориметре ≥ 2 , порог на энерговыделение 110-140 МэВ).
4. Расстояния от оси пучков до трека частицы $R_i < 1 \text{ см}$ для всех частиц.
5. Координаты Z ближайшей к оси пучков точки трека $Z_i < 10 \text{ см}$ для всех частиц.
6. Энерговыделение заряженных частиц в калориметре больше нуля.
7. Разность между Z-координатами трека $|Z_i - Z_j| < 3 \text{ см}$ для каждой пары частиц.
8. $\Delta\phi$ угол между первыми двумя частицами $\Delta\phi > 10^\circ$.
9. $\Delta\theta$ угол между первыми двумя частицами $\Delta\theta > 10^\circ$.
10. Полярный угол вылета хотя бы одной частицы $55^\circ < \theta_i < 125^\circ$.

11. Реконструированная энергия $E_{\pi rec}^i > 145$ МэВ (масса пиона с добавкой минимальной энергии, необходимой для прохождения стенки вакуумной камеры и внутренней стенки дрейфовой камеры).
12. Полярные углы вылета частиц $27^\circ < \theta_i < 153^\circ$ для всех четырёх частиц.

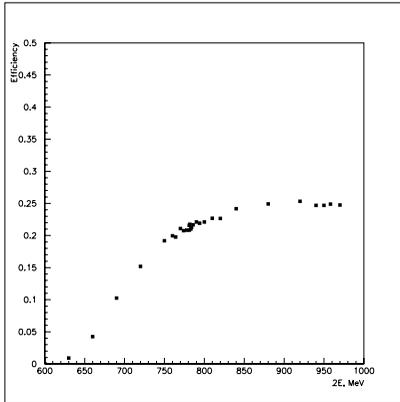


Рис. 15. Эффективность регистрации процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ в модели $a_1\pi$.

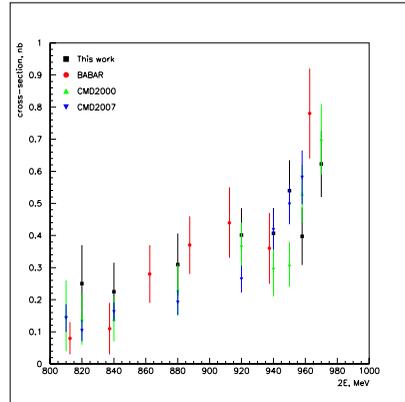


Рис. 16. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$, полученное в данной работе, в сравнении с другими экспериментами

Эффективность регистрации событий с данными условиями отбора, определенная методом Монте-Карло, показана на рис.15. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ приведено на рис.16.

3.3 Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$

Отбирались события, с двумя заряженными и двумя нейтральными частицами с полным энергосбором в калориметре $(0,5 \div 0,9)\sqrt{s}$, с ограничением на углы вылета заряженных частиц $22,5^\circ \div 157,5^\circ$ и на углы вылета нейтральных частиц $36^\circ \div 144^\circ$. Для подавления космического фона накладывались условия: расстояние точки вылета от оси не более 1 см, Z -координата точки вылета в пределах -5 см \div 5 см. Накладывалось ограничение на параметр «качества» фотонов, использующий поперечное распределение энергии $\xi < 0$. Для таких событий производилась кинематическая реконструкция в гипотезе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma\gamma$ без

предположений о промежуточных состояниях и отбирались события с $\chi^2_{\pi^+\pi^-\gamma\gamma} < 20$. Подсчет числа экспериментальных событий производился путем аппроксимации спектров уточненных реконструкцией инвариантных масс фотонов суммой функций, описывающих пик от эффекта и подложку от фона. Эффективность регистрации событий определялась на основе моделирования программой UNIMOD.

Полученные результаты приведены на рис. 17, 18.

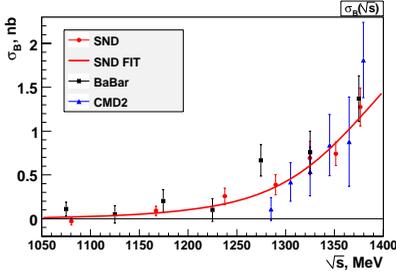


Рис. 17. Борновское сечение для процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ по данным СНД. $\chi^2 = 3.37/6$, $P = 76\%$.

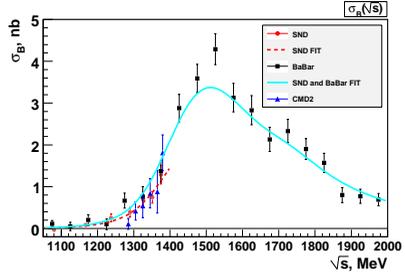


Рис. 18. Борновское сечение для процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^-$ по данным СНД и ВаБар [25]. Данные ВаБар ниже $\sqrt{s} = 1400$ МэВ в аппроксимации не использованы. χ^2 аппроксимации: $\chi^2 = 32.56/18$, $P = 1.8\%$.

3.4 Процесс $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0$

Проводился заключительный этап поиска процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0$. Для выделения заряженных каонов применялась методика идентификации, разработанная для процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ [26], π^0 мезоны регистрировались по распаду на два γ -кванта. При энергии коллайдера ВЭПП-2М достоверных кандидатов в события искомого процесса обнаружено не было, поэтому установлены верхние пределы на следующие сечения:

$$E = 1.37 \text{ ГэВ} : \sigma(e^+e^- \rightarrow K^*(892)K \rightarrow K^+K^-\pi^0) < 0.091 \text{ нб},$$

$$E = 1.38 \text{ ГэВ} : \sigma(e^+e^- \rightarrow K^*(892)K \rightarrow K^+K^-\pi^0) < 0.083 \text{ нб},$$

$$E = 1.2 \div 1.29 \text{ ГэВ} : \sigma(e^+e^- \rightarrow \phi\pi \rightarrow K^+K^-\pi^0) < 0.078 \text{ нб},$$

$$E = 1.3 \div 1.38 \text{ ГэВ} : \sigma(e^+e^- \rightarrow \phi\pi \rightarrow K^+K^-\pi^0) < 0.070 \text{ нб}$$

на уровне достоверности 95%.

3.5 Процесс $e^+e^- \rightarrow K^\pm K_S \pi^\mp \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^- \pi^\mp$

В данной работе представлены результаты изучения процесса $e^+e^- \rightarrow K^\pm K_S \pi^\mp$ с последующим распадом $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$. Основным фоновым процессом в области ~ 1.4 ГэВ является $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$.

Благодаря наличию 4 заряженных частиц в конечном состоянии удается восстановить энергии частиц, используя только направления треков. Используя данные энерговыделения в камере, калориметре, восстановленные энергии частиц был создан параметр K/π разделения который использовался для подавления фона от процесса 4π . Для анализа отбирались центральные события с четырьмя или более заряженными треками, полярный угол которых более 36° . Энерговыделение в калориметре менее $0.7 \cdot E_{beam}$. В событии для одной из частиц параметр K/π разделения должен быть более 0.

Для отобранных событий проводился анализ двухмерных распределений зависимости E_{K^\pm} и E_{π^\mp} от M_{K_S} . Полученные распределения полностью описываются вкладом фонового процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$. Поэтому был установлен верхний предел на энергии 1.38 ГэВ для процесса $e^+e^- \rightarrow K^\pm K_S \pi^\mp - 65 \text{ пб } 95\%CL$.

3.6 Взаимодействие в конечном состоянии в процессе $e^+e^- \rightarrow K \bar{K}$

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$, измеренное детектором СНД [26], в области энергии 1.05-1.20 ГэВ показывает малое (около 10%), но статистически достоверное расхождение с предсказанием векторной доминантности, если фаза интерференции между ϕ и ρ мезонами имеет фиксированное значение 180° , которое следует из SU(3) кварковой модели. При этом в канале $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ [27] расхождение отсутствует (см. рис.19).

Если во время аппроксимации фазу $\phi - \rho$ интерференции сделать свободным параметром, она сдвигается значительно ($\sim 60^\circ$). Подобное явление наблюдалось и в канале $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$, где отличие фазы от 180° интерпретируется как динамический эффект, связанный со взаимодействием в конечном состоянии [28]. Естественно предположить, что наблюдаемое расхождение в канале $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$ тоже объясняется взаимодействием в конечном состоянии. Пример диаграмм, соответствующих такому взаимодействию, показан на рис.20.

В настоящее время проведен расчет вклада подобных диаграмм в сечении процесса $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$. Ведется подготовка к подгонке экспериментальных сечений с учетом этих вкладов.

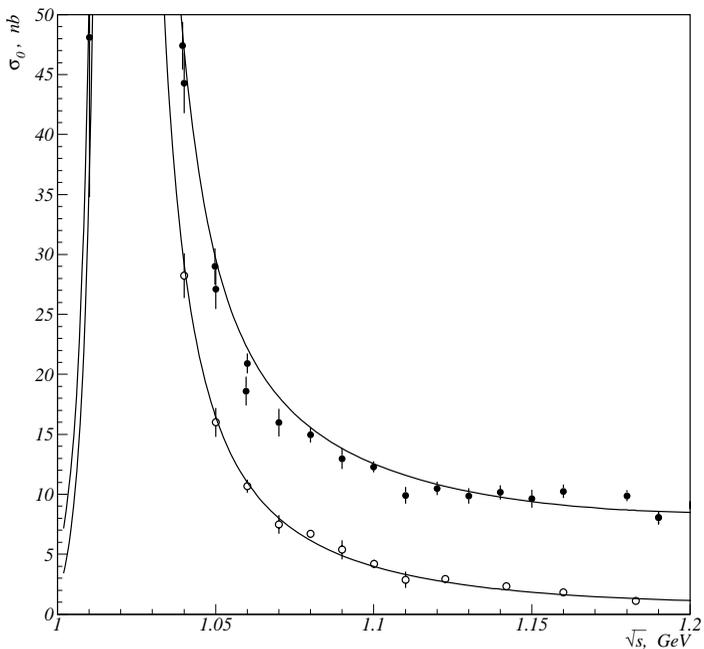


Рис. 19. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$, измеренное детектором СНД, в интервале энергии 1.05–1.20 ГэВ. Черные кружки соответствуют процессу $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$, белые кружки — процессу $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$.

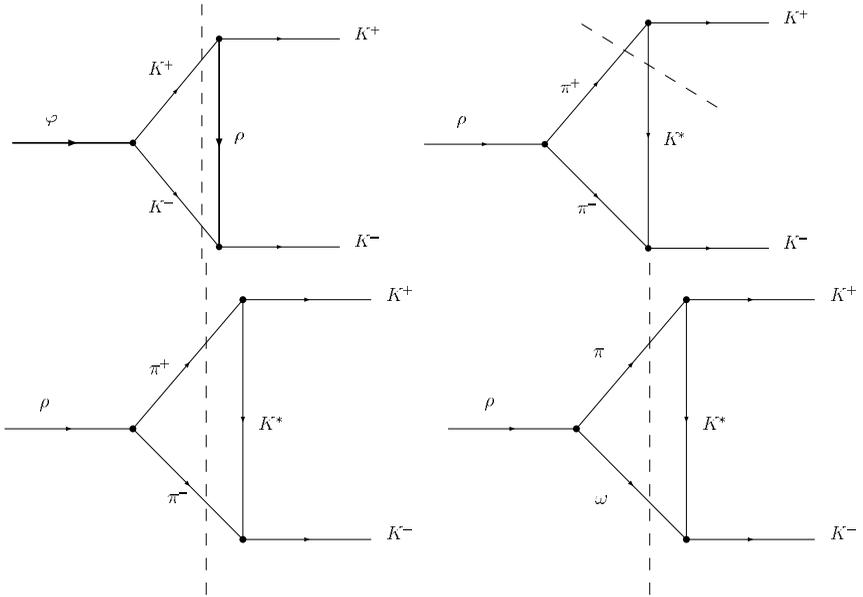


Рис. 20. Примеры взаимодействия в конечном состоянии для процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$.

4 Заключение

В 2008-2009 годах проводилась установка всех систем детектора в их штатное положение на коллайдере ВЭПП-2000, подключение их к электронике и тестирование на космических частицах. В апреле 2009 года проведен пробный экспериментальный заход при энергии коллайдера $2E$ около 1020 МэВ. В результате этого захода были изучены фоновые загрузки, проверена работа системы сбора данных и электроники. Было обнаружено и устранено значительное количество недостатков системы сбора данных, проявляющихся в реальных экспериментальных условиях. В настоящее время все системы детектора установлены на коллайдере ВЭПП-2000 и находятся в рабочем состоянии.

Продолжается обработка данных, накопленных с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2М. В препринте приведены предварительные результаты анализа данных по процессам $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$, $\eta\pi^+\pi^-$, $K\bar{K}\pi$.

Работа частично поддержана грантом Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-5655.2008.2, грантами РФФИ 08-02-00328-а, 08-02-00634-а, 08-02-00660-а, 07-02-00104-а и программой отделения физических наук РАН “Нейтронные исследования структуры вещества и фундаментальных свойств материи.”

Список литературы

- [1] Г.Н. Абрамов, и др. Препринт ИЯФ 2001-29.
- [2] V.M. Aulchenko, et al. Nucl. Instr. and Meth. A, **494**, 246 (2002).
- [3] Г.Н. Абрамов и др. Препринт ИЯФ 2003-45, Новосибирск, 2003.
- [4] Г.Н. Абрамов и др. Препринт ИЯФ 2004-46, Новосибирск, 2004.
- [5] Г.Н. Абрамов, П.М. Астигеевич, В.М. Аульченко и др. Препринт ИЯФ 2007-20, Новосибирск, 2007.
- [6] K.I. Beloborodov, et al. Nucl. Instr. and Meth. A, **494**, 487 (2002).
- [7] A.Yu. Barnyakov, et al. Proceedings of SNIC 2006, eConf C0604032 (2006) 0192.
- [8] M.N. Achasov, et al. Nucl. Instr. and Meth. A, **401**, 179 (1997).
- [9] M.N. Achasov, et al. Nucl. Instrum. Meth. A, **449**, 125 (2000).
- [10] Г.Н. Абрамов и др. Препринт ИЯФ 2005-35, Новосибирск, 2005.
- [11] A.A. Botov, et al. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **162**, 41 (2006).

- [12] *В.Б. Голубев и др.* Ядерная Физика, **72N4**, 1 (2009).
- [13] *R.R. Akhmetshin, et al.* [CMD-2 Collaboration], Phys. Lett. B, **527**, 161 (2002). - [arXiv:hep-ex/0112031].
- [14] *H. Czyz, A. Grzelinska, J.H. Kuhn and G. Rodrigo.* Eur. Phys. J. C, **47**, 617 (2006). - [arXiv:hep-ph/0512180].
- [15] *H. Czyz and J. H. Kuhn.* Eur. Phys. J. C, **18**, 497 (2001). - [arXiv:hep-ph/0008262].
- [16] *R. Decker, M. Finkemeier, P. Heiliger and H. H. Jonsson.* Z. Phys. C, **70**, 247 (1996). - [arXiv:hep-ph/9410260].
- [17] *M.N. Achasov, et al.* Nucl. Phys. B, **569**, 158 (2000). - [arXiv:hep-ex/9907026].
- [18] *Y.S. Oh and H.C. Kim.* Phys. Rev. D. **68**, 094003 (2003). - [arXiv:hep-ph/0307286].
- [19] *M.N. Achasov, et al.* Phys. Rev. D, **66**, 032001 (2002). - [arXiv:hep-ex/0201040].
- [20] *B. Aubert, et al* [BABAR Collaboration], Phys. Rev. D, **70**, 072004 (2004). - [arXiv:hep-ex/0408078].
- [21] *M. Caffo, H. Czyz and E. Remiddi.* Phys. Lett. B **327**, 369 (1994).
- [22] *M. Caffo, H. Czyz and E. Remiddi.* Nuovo Cim. A, **105**, 277 (1992).
- [23] *R.R. Akhmetshin, et al.* Phys. Lett. B, **475**, 190 (2000). - [arXiv:hep-ex/9912020].
- [24] *B. Aubert, et al.* [BABAR Collaboration]. Phys. Rev. D, **71**, 052001, 2005.
- [25] *B. Aubert, et al.* [BABAR Collaboration], Phys. Rev. D, **76**, 092005 (2007); [Erratum-ibid. D **77**, 119902 (2008)]. - [arXiv:0708.2461 [hep-ex]].
- [26] *M.N. Achasov, et al.* Phys. Rev. D, **76**, 072012 (2007). - [arXiv:0707.2279 [hep-ex]].
- [27] *M.N. Achasov, et al.* J. Exp. Theor. Phys., **103**, 720 (2006). - [arXiv:hep-ex/0606057].
- [28] *N.N. Achasov and A.A. Kozhevnikov.* Phys. Rev. D, **61**, 054005 (2000). - [arXiv:hep-ph/9906520].

Г.Н. Абрамов, Е.Г. Авдеева, П.М. Астигеевич, М. Н. Ачасов,
В.М. Аульченко, А.Ю. Барняков, К.И. Белобородов, А.В. Бердюгин,
Д.Е. Беркаев, В.Е. Блинов, А.Г. Богданчиков, А.А. Ботов,
А.Д. Бужин, Д.А. Бужин, А.С. Валькович, А.В. Васильев,
В.М. Весенев, Е.П. Волкова, В.Б. Голубев, Т.В. Димова,
В.П. Дружинин, Л.В. Кардапольцев, А.Н. Курпотин, Д.П. Ковержин,
И.А. Кооп, А.А. Король, С.В. Кошуба, Е.А. Кравченко,
А.Ю. Кульпин, А.П. Лысенко, К.А. Мартин, А.Е. Образовский,
А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, Е.А. Переведенцев, В.М. Попов,
Ю.А. Роговский, А.Л. Романов, 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, П.В. Филатов,
А.Г. Харламов, П.Ю. Шатунов, Ю.М. Шатунов, Д.Б. Шварц,
Д.А. Штоль, А.Н. Шукаев

**Детектор СНД:
состояние дел и первый опыт работы с пучками ВЭПП-2000**

G.N. Abramov, E.G. Avdeeva, P.M. Astigeevich, et al.

**The SND detector: the present status and first experience
of working with VEPP-2000 beams**

ИЯФ 2009-19

Ответственный за выпуск А.В. Васильев
Работа поступила 9.07.2009 г.

Сдано в набор 23.07.2009 г.

Подписано в печать 18.08.2009 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2.2 печ.л., 1.8 уч.-изд.л.

Тираж 180 экз. Бесплатно. Заказ № 19

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.