

На правах рукописи

ПОПОВ Александр Сергеевич

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^0$ С ДЕТЕКТОРОМ КМД

01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Хазин
Борис Исаакович — доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Блинов
Владимир Евгеньевич — кандидат физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск.

Кожевников
Аркадий Алексеевич — доктор физико-математических наук,
Институт математики им. С.Л. Соболева
Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск.

**ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ:** — ГНЦ “Институт теоретической
и экспериментальной физики”
им. А.И. Алиханова, г. Москва.

Защита диссертации состоится “ _____ ” _____ 2009 г.
в “ _____ ” часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.02
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук,

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Стандартная модель – общепринятая сегодня теория, описывающая взаимодействия элементарных частиц – сталкивается со значительными техническими трудностями при попытках последовательного описания сильных взаимодействий в области низких энергий. Феноменологический подход на основе теоретико-группового анализа с использованием фундаментальных законов теории поля часто допускает множество механизмов рождения и распада промежуточных состояний с одним или несколькими адронами. Для построения и проверки феноменологических моделей необходимо знать вероятности появления различных промежуточных адронных состояний в процессах рождения той или иной конфигурации конечных частиц. Кроме того, большой интерес представляют сами величины сечений, которые широко используются при построении теоретических моделей и расчетах фундаментальных констант, таких как адронный вклад в аномальный магнитный момент мюона $a_\mu = (g - 2)/2$ и константу связи фотоном при энергии, равной массе Z – бозона $\alpha(M_Z)$. Адронный вклад в величину a_μ можно определить только с использованием экспериментальных данных о сечении электрон-позитронной аннигиляции в адроны по следующей формуле:

$$a_\mu^{\text{had}(1)} = \frac{m_\mu^2}{12\pi^3} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{\sigma^0(s)\hat{K}(s)}{s} ds, \quad (1)$$

где $\hat{K}(s)$ – гладкая, монотонная, слабо меняющаяся функция, вычисленная в рамках квантовой электродинамики, $\sigma^0(s)$ – полное Борновское сечение процесса $e^+e^- \rightarrow$ адроны, а s – квадрат полной энергии в системе центра масс. Так как подынтегральная функция $\hat{K}(s)/s$ усиливает вклад малых энергий, то точность вычисления этого интеграла в основном определяется ошибкой измерения полного сечения процессов $e^+e^- \rightarrow$ адроны при низких энергиях, которая, в свою очередь, в основном определяется сегодня систематической ошибкой измерения сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$. Уже при существующей экспериментальной точности прямого измерения a_μ , которая составляет 0.54 ppm, становятся существенными вклады ошибок измерения процесса $e^+e^- \rightarrow 4\pi$ и др.

Дальнейшее улучшение почти в 4 раза точности измерения величины a_μ , планируемое в подготавливаемых экспериментах в Лаборатории им. Ферми (США) и JPARC (Япония), потребует более точных данных о сечениях рождения адронов в электрон-позитронной аннигиляции. В области энергий до 1.4 ГэВ процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ должен быть измерен с систематической точностью 0.3%, а другие каналы аннигиляции не хуже 1÷2%. Точность адронных сечений в диапазоне от 1.4 до 2 ГэВ должна быть не хуже 2-3%. Методы и оборудование, созданные в работах на основе которых написана данная диссертации, позволят решить эту задачу.

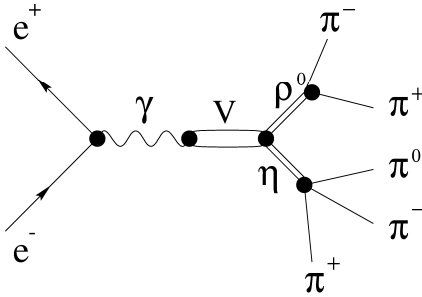


Рис. 1. Механизм реакции $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$.

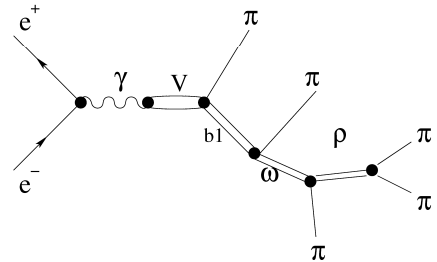


Рис. 2. Механизм реакции $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$.

Помимо всего перечисленного, интерес также представляет изучение динамики рождения 5π . Естественно предположить, что механизм реакции $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ состоит в переходе виртуального фотона в промежуточных векторный мезон, который распадается на псевдоскаляр η и вектор ρ , как это показано на рисунке 1. Аналогично, можно ожидать, что динамика рождения состояния $\omega\pi^+\pi^-$ соответствует диаграмме, приведенной на рисунке 2, где в каждой вершине излучается по одному пиону в s волне. Можно ожидать четкий сигнал от b1 в спектре инвариантных масс 4 пионов, при энергиях в с.ц.и. выше 1.5 – 1.6 ГэВ, однако он не был обнаружен при анализе данных полученных методом ISR детектором ВаВаг. Доступная и исследованная область энергий для ВЭПП-2М, до 1.38 ГэВ в с.ц.и. не позволяет подтвердить или опровергнуть механизм $e^+e^- \rightarrow b1^\pm\pi^\mp \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$. Расширенный диапазон энергий и высокая светимость коллайдера ВЭПП-2000 позволят с высокой точностью изучить этот процесс в экспериментах с детектором КМД-3.

Цель работы состояла в следующем:

- Разработка алгоритма отбора событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^0$.
- Создание процедуры выделения промежуточных состояний $\omega\pi\pi$, $\eta\pi\pi$.
- Написание генератора для моделирования процессов $e^+e^- \rightarrow \omega\pi\pi$, $\eta\pi\pi$ и определения эффективности регистрации.
- Измерение сечения процессов $e^+e^- \rightarrow \omega\pi\pi$ и $e^+e^- \rightarrow \eta\pi\pi$ в области энергий 1280-1380 МэВ в системе центра масс. Для повышения достоверности результатов, последний процесс измерялся в двух каналах распада η мезона. Установка верхнего предела на сечение рождения состояния $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^0$ через другие промежуточные каналы.
- Проектирование и изготовление дрейфовой камеры нового детектора КМД-3.
- Доводка и испытания считывающей и триггерной электроники.
- Проверка работоспособности и измерение параметров дрейфовой камеры и всего комплекса электроники.

Научная новизна работы

В диапазоне энергий от 1280 до 1380 МэВ измерено сечение процессов $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$, причем последний процесс измерен в двух каналах распада η мезона. Результаты измерений согласуются между собой и с предыдущими измерениями, имея лучшую статистическую точность. Приведенные в диссертации результаты подтверждены работами по измерению сечений этих процессов методом ISR детектором ВаВаг.

Спроектирована и изготовлена дрейфовая камера нового детектора КМД-3. Камера имеет высокую сегментацию регистрирующих ячеек и высокую плотность обслуживающей электроники. Благодаря тому, что корпус камеры изготовлен из углепластика, минимизировано количество вещества перед калориметрическими системами детектора.

Научная и практическая ценность работы

Полученные в работе результаты по измерению сечений на момент публикации имели лучшую в мире статистическую и систематическую точность. Впервые показано, что реакция рождения пяти пионов идет через промежуточные состояния $\omega\pi$ и $\eta\pi\pi$.

Изготовлена новая дрейфовая камера с координатным разрешением в 2.5 раза лучшим, чем в камере КМД-2, что позволит в сильной степени улучшить качество физических результатов нового детектора КМД-3.

Апробация работы

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах в ведущих научных центрах. Кроме того, результаты работы докладывались на сессиях-конференциях отделения ядерной физики (ИТЭФ, Москва, 2000, 2002, 2005, 2006, 2007) и на международных конференциях:

ICHEP06 – INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH ENERGY PHYSICS (Moscow, Russia, 2006),

VCI07 – VIENNA CONFERENCE ON INSTRUMENTATION (Vienna, Austria, 2007),

INSTR08 – INTERNATIONAL CONFERENCE ON INSTRUMENTATION FOR COLLIDING BEAM PHYSICS (Novosibirsk, Russia, 2008),

TIPP09 – Technology and Instrumentation in Particle Physic (Tsukuba, Japan, 2009)

Структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти основных глав, заключения и приложений. Объем диссертации составляет 154 страницы, включая 120 рисунков и 10 таблиц. Список литературы включает 62 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении кратко сформулированы основные задачи работы, структура и содержание диссертации. Обсуждены её актуальность и результаты аналогичных предыдущих экспериментов. Указано на возможность наблюдения b_1 мезона на коллайдере ВЭПП-2000.

В первой главе приведены характеристики ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2М и детектора КМД-2, с помощью которых в течение 1997г. велся набор статистики в анализируемом диапазоне энергий. Схема детектора приведена на рис. 3. Столкновение пучков происходит внутри вакуумной камеры, изготовленной из бериллиевой трубки со стенкой толщиной 700 мкм. Координаты, углы вылета и импульсы заряженных частиц измерялись в магнитном спектрометре, состоящем из дрейфовой и Z-камер и тонкого ($0.38X_0$) сверхпроводящего соленоида с магнитным полем 1 Тл. Цилиндрический и торцевой электромагнитные калориметры, изготовленные из сцинтилляционных кристаллов

CsI и BGO, обеспечивают измерение энергий и углов вылета фотонов и идентификацию частиц по спектру энерговыделений. Пробежная система служит для разделения мюонов и адронов.

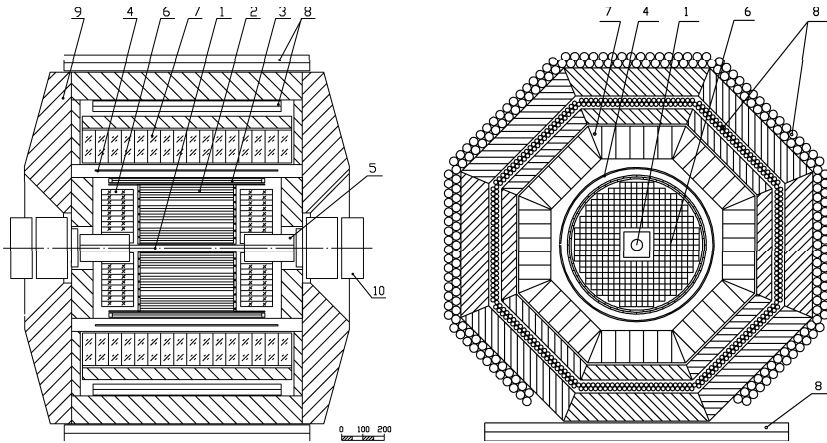


Рис. 3. Продольный и поперечный разрезы детектора КМД-2. 1 – вакуумная камера; 2 – дрейфовая камера; 3 – Z-камера; 4 – основной сверхпроводящий соленоид; 5 – компенсирующий соленоид; 6 – торцевой калориметр на основе BGO; 7 – цилиндрический калориметр на основе CsI; 8 – пробежная система; 9 – ярмо магнита; 10 – квадрупольные линзы ВЭПП-2М.

Во второй главе описана методика измерения сечений исследуемых процессов в области энергий от 1.280 до 1.38 ГэВ в системе центра масс с детектором КМД-2. В процессе сканирования указанного диапазона энергий был набран интеграл светимости 3.5 пб^{-1} , что соответствует примерно 275 событиям рождения пяти пионов. Набор велся в 10 точках по энергии, однако из-за малого количества событий и большого комбинаторного фона в каналах 5π , некоторые энергетические точки были объединены. События 5π делились на классы $\omega\pi\pi$ и $\eta\pi\pi$ путем аппроксимации спектров масс $\pi^+\pi^-\pi^0$ определенными из моделирования кривыми, описывающими эти спектры для конечных состояний $\omega\pi\pi$, $\eta\pi\pi$ и фона. На рисунке 4 показан такой спектр для энергии в с.ц.и. 1380 МэВ. Каждому событию 5π на рисунке соответствуют четыре возможные комбинации $\pi^+\pi^-\pi^0$.

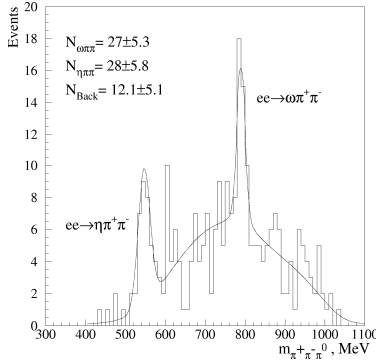


Рис. 4. Распределение по инвариантной массе $m_{\pi^+\pi^-\pi^0}$ при энергии 1380 МэВ в системе центра масс.

Одной из встретившихся проблем было наличие “лишних” кластеров в калориметре, для правильной отбраковки которых пришлось применять двухступенчатую кинематическую реконструкцию к событиям, в которых было зарегистрировано четыре заряженных трека и больше двух фотонов. На первом этапе требовалось только выполнение законов сохранения энергии и импульса. Перебирались все комбинации пар фотонов, отбиралась та из них, которой соответствовал лучший χ^2 . Для улучшения разрешения по инвариантной массе $\pi^+\pi^-\pi^0$, на втором этапе накладывалось дополнительное требование равенства инвариантной массы отобранной пары фотонов массе нейтрального пиона. Основным источником систематической ошибки является неточность моделирования разрешений детектора КМД-2, вследствие чего ответ зависит от некоторых отборов, в частности по χ^2 . Границы выбирались достаточно мягкими, чтобы при их изменении ответ менялся слабо. Еще одним источником систематики являлась нестабильность эффективности реконструкции треков в дрейфовой камере КМД-2, в связи с чем оценка систематической ошибки составила $\sim 20\%$. В сильной степени по этой причине, для подтверждения достоверности методики получения сечений, процесс образования конечного состояния $\eta\pi\pi$ был измерен независимой методикой в канале распада $\eta \rightarrow \gamma\gamma$. Как видно из рисунка 5, полученные результаты хорошо согласуются. Измеренное сечение образования состояния $\omega\pi\pi$ показано на рисунке 6.

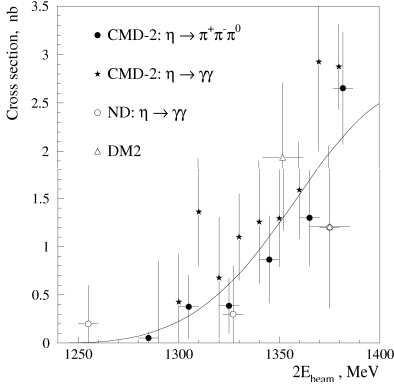


Рис. 5. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$.

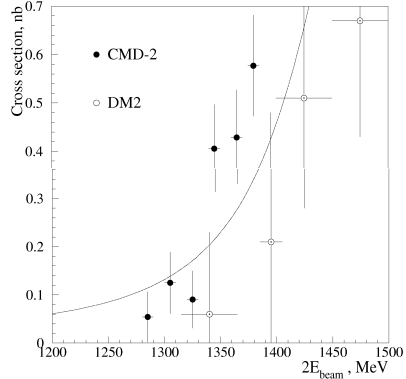


Рис. 6. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$.

Третья глава целиком посвящена дрейфовой камере детектора КМД-3. Подробно рассмотрены физические задачи нового детектора и связанные с ними особенности его конструкции. В следующих разделах описаны пути решения встретившихся при разработке и производстве дрейфовой камеры проблем. Прежде всего, это выбор основного материала элементов конструкции и расчет прогибов фланцев при натяжении проволочек, выбор конфигурации и расчет высоких напряжений на охранных проволочках и высоковольтном экране.

В четвертой главе описан основной элемент считывающей электроники дрейфовой камеры – плата Т2Q. Так как ДК формирует часть триггерных сигналов для системы сбора данных, в эту главу вошли описания работ по основным ее элементам: интерфейсам первичного триггера ИШГД, блокам приема-передачи данных БШД, блоку заряженного триггера.

В пятой главе описаны процедуры калибровок по физическим событиям и реконструкции треков в дрейфовой камере детектора КМД-3, а также приведены полученные разрешения и параметры камеры, полученные на основе анализа событий космического излучения и при моделировании некоторых физических процессов. Координатное разрешение для событий космического излучения составляет $90 \div 110$ мкм в поперечной плоскости и $2 \div 3$ мм в продольной, как показано на рисунках 7(a) и 7(b). Для треков пересекших всю камеру, точность измерения удель-

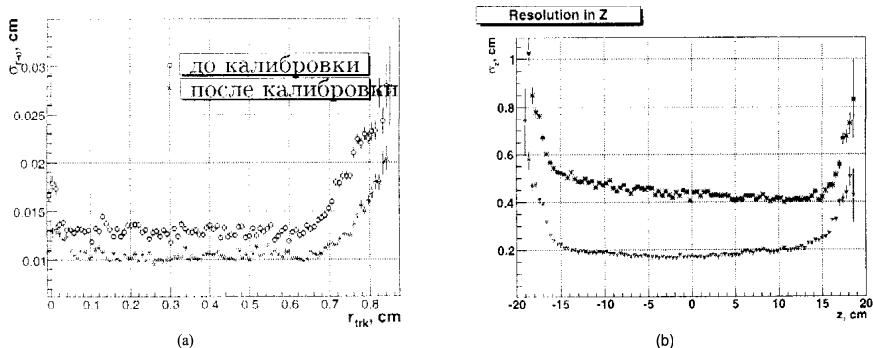


Рис. 7. Координатные разрешения: (а) Координатное разрешение в поперечной плоскости до (кружочки) и после (звездочки) калибровки изохрон.; (б) Координатное разрешение в продольной плоскости.

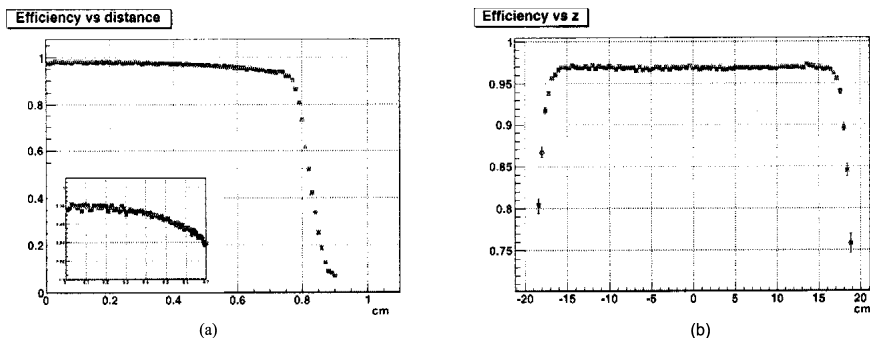


Рис. 8. Усредненные по всем проволочкам эффективности срабатывания: (а) эффективность в зависимости от длины дрейфа R , усредненная по всем Z ; (б) эффективность в зависимости от Z координаты, усредненная по всем R .

ных ионизационных потерь лучше 15%. Эффективности срабатывания ячеек в зависимости от места пролета трека показаны на рисунках 8(а) и 8(б). Практически для всего сечения ячейки эта эффективность близка к 100%. Соответствующее этим параметрам импульсное разрешение, определенное из моделирования, приведено на рисунке 9. Угловые разрешения в продольной и поперечной плоскостях составляют ~ 2 мрад.

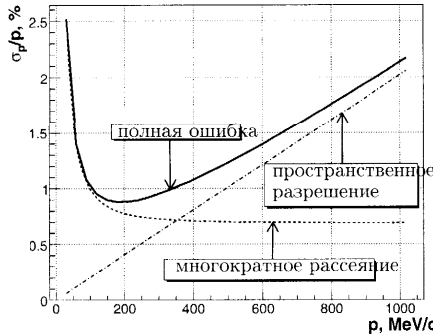


Рис. 9. Ошибка определения импульса для мюонов.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Обработаны данные детектора КМД-2, записанные в диапазоне энергии в с.ц.и. от 1280 до 1380 МэВ. Получены сечения процессов $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$, причем сечение $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ измерено в двух каналах распада η -мезона — $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ и $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с хорошо согласующимися результатами. Полученные в работе сечения процессов $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$ согласуются с данными других экспериментов. Статистическая точность полученных результатов составляет $25 \div 50\%$ в зависимости от энергии, что лучше точности предыдущих измерений в этой области энергий (см. рис. 6 и 5). Оценка систематической ошибки составляет $\sim 20\%$, что сравнимо с имеющейся статистической точностью измерений. Основные источники систематики в сильной степени будут устранены в детекторе КМД-3, благодаря новому цилиндрическому калориметру на основе жидкого ксенона (далее LXe) и модернизированному торцевому калориметру на основе кристаллов BGO (далее BGO) с полупроводниковыми фотоприемниками. Высокое координатное разрешение LXe существенно улучшит как эффективность пришивки заряженных кластеров к треку, так и разрешение по инвариантной массе нейтрального пиона. Улучшенные фотоприемники и электроника калориметра BGO позволит уменьшить количество мертвых и шумящих зон калориметра, что приведет к уменьшению количества “лишних” фотонов. Новая, точно сегментированная дрейфовая камера с аксиальной ячейкой и современной электроникой, обеспечивает более чем двукратное улучшение импульсного и угловых разрешений по сравнению с ка-

мерой детектора КМД-2. Это улучшит разрешение по инвариантным массам комбинаций конечных частиц, позволяя отказаться от многих отборов при анализе событий и тем самым снижая систематическую ошибку. Кроме того, высокое разрешение позволит легко измерять эффективность восстановления треков по событиям процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ восстанавливая недостающий импульс потерянного трека. Это обстоятельство значительно уменьшит систематическую ошибку, связанную с моделированием.

2. На основе поставленных перед новым детектором физических задач спроектирована дрейфовая камера и разработана технология ее изготовления. Обеспечена механическая точность сборки деталей не хуже 200 мкм в поперечной плоскости и 500 мкм в продольной. Натянуто более 3500 полевых и сигнальных проволочек, с приемлимой потерей натяжения на прогиб фланцев. В настоящее время камера установлена в детектор.
3. Проведены запуск и доводка считывающей и триггерной электроники детектора, произведены и проверены все требуемые для ДК блоки. Написаны необходимые программы по конфигурированию, чтению и калибровке плат Т2Q, ИПТД, ИПТЗ и трекфайндера. В настоящее время вся электроника работает в штатной конфигурации.
4. В многочисленных тестах на космических частицах проверена работоспособность и измерены параметры ДК, найдены и устранены недоработки в считывающей электронике и электронике системы сбора данных.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. D.V. Chernyakov, D.A. Gorbachev, ..., A.S.Popov et al., "The performance of the drift chamber for the CMD-2 detector", Nucl. Instrum. Meth. A **419** (1998) 370.
2. Ф.В. Игнатов, П.А. Лукин, ..., А.С.Попов и др., "Дрейфовая камера КМД-2", Препринт ИЯФ 1999-64, Новосибирск, 1999.
3. R.R. Akhmetshin, E.V. Anashkin, ..., A.S.Popov et al., "Status of experiments and recent results from CMD-2 detector at VEPP-2M". - Nucl. Phys. A675: 424C-431C, 2000.

4. R.R. Akhmetshin, E.V. Anashkin, ..., A.S.Popov et al., "Study of the process $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0$ with CMD-2 detector". - Phys. Lett. B489: 125-130, 2000.
5. R.R. Akhmetshin, ..., A.S.Popov et al., Total cross section of the process $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ in the C.M. energy range 980-MeV to 1380-MeV. - Phys. Lett. B595: 101-108, 2004.
6. R.R. Akhmetshin, E.V. Anashkin, ..., A.S.Popov et al., "Status of experiments and recent results from CMD-2 detector at VEPP-2M". - Nucl. Phys. A675: 424C-431C, 2000.
7. V.M. Aulchenko, R.R. Akhmetshin, ..., A.S.Popov et al., "CMD-2M Detector Project". - BUDKER-INP-2001-45, 2001. 57pp.
8. D.A. Drozhzhin, ..., A.S. Popov, et al., Current status of the CMD-3 time-of-flight system. - Nucl. Instrum. Meth. A598: 203-204, 2009.
9. F. Grancagnolo, G. Fiore, ..., A.S.Popov et al., "Drift chamber for the CMD-3 detector". - Nucl. Instrum. Meth. A598: 105-106, 2009.

ПОПОВ Александр Сергеевич

Изучение процесса

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^0$ с детектором КМД

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 17.10.2009 г.

Подписано к печати 17.10.2009 г.

Формат 60×90 1/16 Объем 0,7 печ.л., 0,6 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 35

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.