

На правах рукописи

СИБИДАНОВ Алексей Леонидович

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ НА ДЕТЕКТОРЕ КМД-2
В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 370 – 520 МэВ**

**01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2008

Работа выполнена в Институте ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Хазин — доктор физико-математических наук.
Борис Исаакович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Голубев — кандидат физико-математических наук.
Владимир Борисович

Ачасов — доктор физико-математических наук.
Николай Николаевич

**ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ:** — ГНЦ РФ “Институт теоретической
и экспериментальной физики”,
г. Москва.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2008 г.
в “_____” часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.02
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан “_____” _____ 2008 г.

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

В.С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время общепринятой теорией, описывающей взаимодействия элементарных частиц, является так называемая Стандартная Модель (СМ). СМ предлагает описание взаимодействия частиц посредством сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. На данный момент весь набор экспериментальных данных в физике частиц удовлетворительно описывается в рамках СМ. В то же время, в рамках научной парадигмы, поиск отклонений от СМ становится одним из самых активных направлений исследований. Характерным примером является цикл экспериментов по измерению аномального магнитного момента мюона $a_\mu = (g - 2)/2$.

Величину a_μ в СМ можно представить в виде суммы: $a_\mu = a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{had}} + a_\mu^{\text{weak}}$, где a_μ^{QED} – квантовоэлектродинамический вклад, a_μ^{weak} – вклад слабых взаимодействий и a_μ^{had} – вклад сильных взаимодействий. Таким образом, отличие экспериментального значения от теоретического расчета будет указывать на существование взаимодействий вне рамок СМ.

Электрослабые вклады a_μ^{QED} и a_μ^{weak} вычислены по теории возмущений с высокой точностью, тогда как вклад сильного взаимодействия не может быть вычислен с необходимой точностью, поскольку для энергий меньше нескольких ГэВ требуется непertурбативные расчеты в рамках КХД.

Этот вклад можно определить на основе экспериментальных данных о сечении рождения адронов в реакции электрон-позитронной аннигиляции. Адронный вклад в величину a_μ , диаграмма которого показана на Рис. 1, выражается через дисперсионный интеграл:

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

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 (с.ц.м.). Так как ядро $\hat{K}(s)/s$ в интеграле усиливает вклад малых энергий, то точность вычисления этого интеграла в основном определяется систематической ошибкой измерений полного сечения процессов $e^+e^- \rightarrow$ адроны при энергиях $s < 4 \text{ ГэВ}^2$, которая, в свою

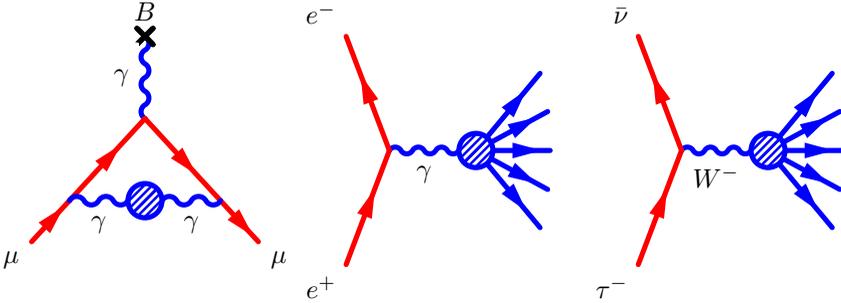


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана первого порядка для вклада адронной поляризации вакуума в аномальный магнитный момент мюона и связь с экспериментальными данными по электрон-позитронной аннигиляции и распадами τ -мезона.

очередь, в основном определяется систематической ошибкой измерения сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$.

Дополнительным источником экспериментальных данных о поведении сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в области низких энергий могут служить спектральные функции распада $\tau^- \rightarrow \pi^-\pi^0\nu_\tau$. Используя гипотезу сохранения векторного тока и изоспиновую симметрию, можно связать изовекторную компоненту процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ со спектральной функцией $v_{1,\pi-\pi^0}$. Детальные измерения спектральных функций в распадах τ -лептона были проведены детекторами ALEPH, OPAL и CLEO-II. В скором будущем появятся новые данные с детекторов BaBar и Belle. В данный момент существует расхождение в величине сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, полученного на встречных электрон-позитронных пучках и при пересчете из распадов τ -лептона. Это расхождение требует дополнительного исследования. Новые, более точные данные, как со стороны экспериментов по электрон-позитронной аннигиляции, так и распадов τ -лептона, помогут объяснить природу этого расхождения.

В экспериментах на электрон-позитронных коллайдерах измеряется видимое сечение рождения адронов $\sigma^{\text{visible}}(s)$. Чтобы получить Борновское сечение $\sigma^0(s)$, используемое при расчете дисперсионного интеграла (1), необходимо учесть излучение реальных и виртуальных фотонов начальными электронами и позитронами. Таким образом, одним из факторов, ограничивающих точность вычисления величины a_μ , является точность расчета радиационных поправок для процессов рождения адронов и мониторирующего сечения электрон-позитронного рассеяния.

Наиболее точное экспериментальное значение величины a_μ было получено в эксперименте E821 в Брукхейвенской Национальной лабора-

тории (БНЛ), относительная точность которого составила 0.54×10^{-6} . Это значение примерно на 3 стандартных отклонения выше теоретического, вычисленного в рамках СМ. Экспериментальный и теоретический вклады в ошибку разницы, примерно, одинаковы. В настоящее время обсуждается новый эксперимент, предусматривающий существенное улучшение точности величины a_μ . Для его интерпретации необходимо улучшить точность измерения сечения процесса рождения адронов в электрон-позитронной аннигиляции для вычисления вклада адронной поляризации вакуума в a_μ .

В конце 70-х – начале 80-х годов на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-2М в Институте ядерной физики в диапазоне энергий 360-1400 МэВ в с.ц.м. с детекторами КМД и ОЛЯ были измерены адронные сечения с высокой статистической точностью, в том числе и пионный форм-фактор. Однако, полная точность измерений ограничивалась систематическими ошибками экспериментов, которые варьировались от 2% до 26%.

Новый цикл измерений эксклюзивных адронных сечений на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-2М был проведен в течение 1992-2000 гг. в экспериментах с детекторами КМД-2 и СНД. Суммарный интеграл светимости, набранный обоими детекторами, составил 60 пб^{-1} . На Рис. 2 показаны адронные сечения, измеренные на детекторе КМД-2. Высокая

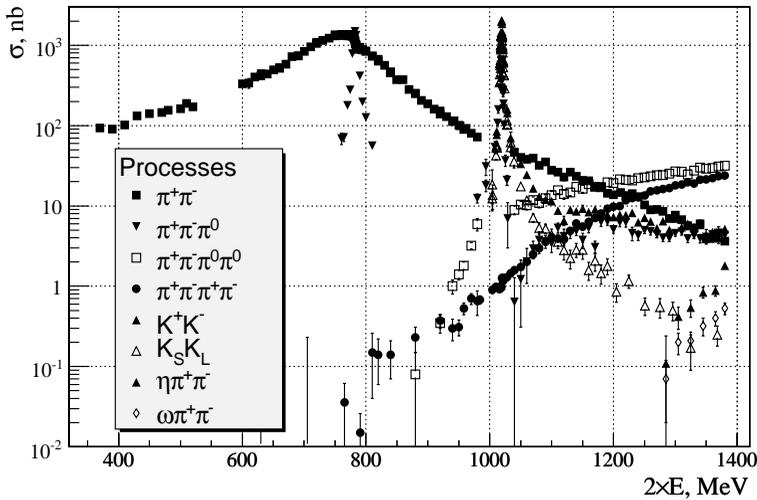


Рис. 2. Экспериментальные адронные сечения, измеренные на детектора КМД-2.

светимость коллайдера и оптимизация конструкции детекторов для регистрации адронных событий с высокой эффективностью, позволили измерить пионный формфактор с систематической точностью 0.6 % в районе ρ -мезона, 1-4 % выше ϕ -мезона на детекторе КМД-2 и 1.3 % в районе ρ -мезона на детекторе СНД.

Цель работы состояла в следующем:

- Разработка алгоритма калибровки дрейфовой камеры детектора КМД-2.
- Написание генератора для процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$ и $\pi^+\pi^-$ с излучением фотонов, для расчета видимых сечений с точностью лучше 0.2 % и возможностью наложить произвольные кинематические отборы на параметры частиц в конечном состоянии.
- Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в области энергий 370 – 520 МэВ.

Научная новизна работы

В диапазоне энергий от 370 до 520 МэВ измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$. Результаты согласуются с предыдущими измерениями и имеют лучшую статистическую и систематическую точность.

Написан генератор процессов основных каналов электрон-позитронной аннигиляции с учетом радиационных поправок, позволяющий рассчитывать видимые сечения аннигиляции в две частицы с точностью 0.2 %. Проведено сравнение с уже имеющимися программами и показано согласие результатов в пределах декларируемых точностей.

Научная и практическая ценность работы

Генератор процессов в e^+e^- столкновениях позволил значительно улучшить точность измерения сечений двухчастичных адронных каналов. Повышение точности измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, используемого для определения интеграла светимости, позволило также повысить точность измерения других каналов аннигиляции.

Полученные результаты по измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ позволяют улучшить точность вычисления различных физических величин, например, электромагнитного радиуса пиона.

Сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны применяются в различных расчетах на основе дисперсионных соотношений, в частности, эти сечения активно используются многими группами физиков при вычислении адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона и бегущей константы электромагнитного взаимодействия.

Апробация работы

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах в ведущих научных центрах. Кроме того, результаты работы докладывались на Сессии-конференции: “Физика фундаментальных взаимодействий” (Москва, декабрь 1998 и февраль 2004) и на Международных конференциях: e^+e^- in the 1-2 GeV range: Physics and Accelerator Prospects (Альгеро, Италия, сентябрь 2003), SIGHAD03 (Пиза, Италия, октябрь 2003), HADRON 2005 (Рио-де-Жанейро, Бразилия, август 2005), e^+e^- collisions from ϕ to J/ψ (Новосибирск, Россия, февраль-март 2006).

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех основных глав и заключения. Объем диссертации составляет 167 страниц, включая 90 рисунков и 13 таблиц. Список литературы включает 69 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении кратко сформулированы основные задачи работы. Обсуждены ее актуальность и результаты предыдущих аналогичных экспериментов. Описаны структура и содержание диссертации.

В первой главе приведены характеристики ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2М и детектора КМД-2, на котором в течение 1992–2000 гг. велся набор экспериментальных данных во всем доступном диапазоне энергий. Схема детектора приведена на Рис. 3. Столкновение пучков происходит внутри вакуумной камеры, изготовленной из бериллиевой трубки с толщиной стенки 700 мкм. Координаты, углы вылета и импульсы заряженных частиц измеряются 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.

Во второй главе подробно описаны механическая конструкция дрейфовой камеры и электроника съема сигналов. Приведен алгоритм восстановления треков в плоскости, содержащей ось пучков. Описаны электронные калибровки, регулярно проводившиеся с целью контроля параметров электроники и выявления нерабочих каналов для ремонта или замены.

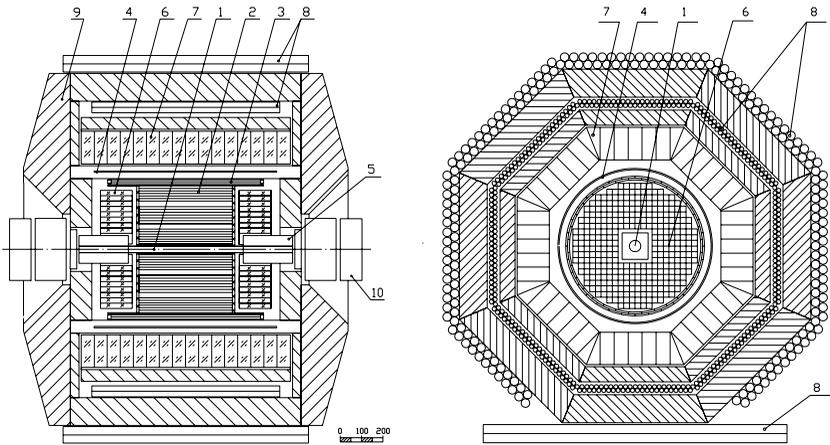


Рис. 3. Продольный и поперечный разрезы детектора КМД-2. 1 - вакуумная камера; 2 - дрейфовая камера; 3 - Z-камера; 4 - основной сверхпроводящий соленоид; 5 — компенсирующий соленоид; 6 - торцевой калориметр на основе ВГО; 7 - цилиндрический калориметр на основе CsI; 8 - пробегная система; 9 - ярмо магнита;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

Приведена процедура калибровки параметров электронных каналов сигнальных проволочек по событиям в дрейфовой камере детектора КМД-2 с помощью Z-камеры. Рис. 4 иллюстрирует, как меняются распределения по углу расколлинеарности событий упругого электрон-позитронного рассеяния в результате калибровки. Как видно из рисунка, разрешение по параметру $\Delta\theta$ последовательно улучшается, примерно, в 3 раза. На Рис. 5 показаны результаты применения этой процедуры для заходов эксперимента LOW-96.

В третьей главе приведены сечения процессов электрон-позитронной аннигиляции в лептоны и адроны с радиационными поправками, теоретическая точность которых лучше 0.2%. Чтобы получить такую точность были объединены два подхода:

- Учет усиленных вкладов от коллинеарной области, где излучается много фотонов, базируется на использовании структурных функций электрона(позитрона). Точность данного подхода для сечения Баба рассеяния составляет 0.1% в случае малых переданных импульсов, но при излучении жесткого фотона на большие углы точ-

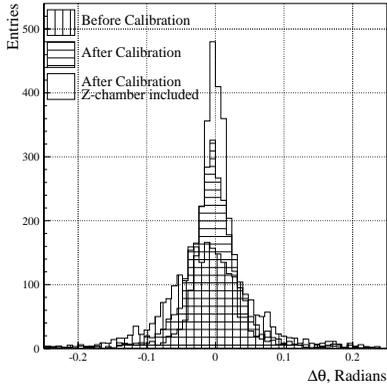


Рис. 4. Вертикальная штриховка - до калибровок параметров, горизонтальная - после калибровок, нештрихованная гистограмма - после включения в проведение трека точки из Z-камеры.

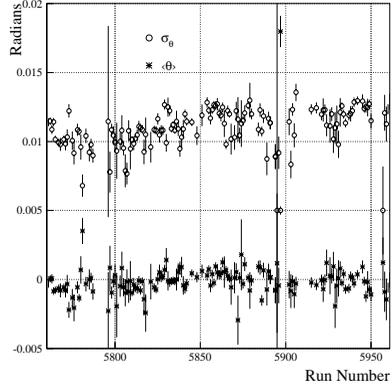


Рис. 5. Разрешение по углу расколлинеарности событий упругого электрон-позитронного рассеяния в заходах 1996 года с энергией в системе центра масс от 2×185 МэВ до 2×260 МэВ.

ность значительно ухудшается, т.к. структурная функция не содержит информация об угловых распределениях фотонов.

- Использование точного сечения в первом порядке теории возмущений по α/π . Точность такого подхода оценивается неучтенными вкладами следующих порядков по константе α/π и составляет $\sim 1\%$. Поскольку сечение представлено в дифференциальном виде, существует возможность применения произвольных кинематических отборов.

Объединив два этих подхода, создан Монте-Карло генератор (MCGPJ - Monte-Carlo Generator Photon Jets), моделирующий рождение частиц в e^+e^- столкновениях.

При таком объединении потребовалось ввести вспомогательные параметры $\Delta\varepsilon$ и θ_0 . Где $\Delta\varepsilon$ - граница между мягкими фотонами и одним жестким фотоном, а θ_0 - граница между коллинеарной областью (содержащей основной вклад от лидирующих логарифмов) и излучением жесткого фотона на большой угол (вычислен точно в первом порядке теории возмущений по α/π). На Рис. 6 представлена зависимость полного сечения $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ от величины внутреннего параметра $\Delta\varepsilon$. Видно, что

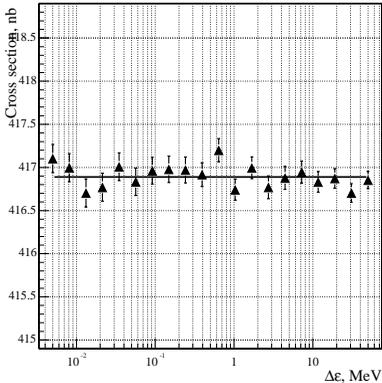


Рис. 6. Зависимость полного сечения $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ от величины вспомогательного параметра $\Delta\varepsilon$.

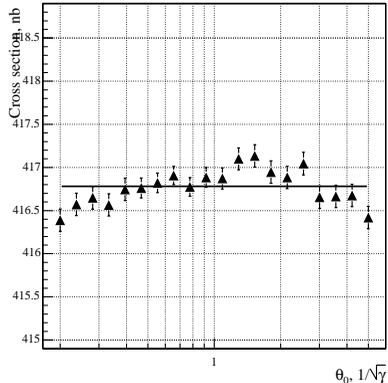


Рис. 7. Зависимость полного сечения $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ от величины вспомогательного параметра θ_0 .

относительный разброс сечений находится внутри декларируемой точности $< 0.2\%$ при изменении параметра $\Delta\varepsilon$ почти в 10^4 раз. Относительные вариации полного сечения в зависимости от величины параметра θ_0 показаны на Рис. 7 при значении $\Delta\varepsilon/\varepsilon = 1\%$. Видно, что систематические отклонения не превышают $\pm 0.1\%$ от среднего значения.

Вклад поляризации вакуума в пропагатор виртуального фотона учтен во всех амплитудах для лептонных каналов электрон-позитронной аннигиляции и не учитывается в адронных каналах по общепринятому соглашению, т.к. включается в описание параметров промежуточных резонансов. При этом пионы и каоны рассматривались как точечные объекты.

Было проведено сравнение с уже имеющимися первичными генераторами частиц BNWIDE (точность 0.5%) и BABAYAGA (точность 0.5%) для событий Баба рассеяния. Расхождение сечений не превышало заявленных точностей.

В четвертой главе представлены результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в диапазоне энергий от 370 до 520 МэВ в с.д.м. с детектором КМД-2. Анализируемые экспериментальные данные были набраны в октябре-ноябре 1996 г. в 10 точках по энергии. Интеграл светимости составил 56 нб^{-1} .

В эксперименте использовались два независимых триггера – “заряженный” и “нейтральный”. “Заряженный” триггер базировался на ин-

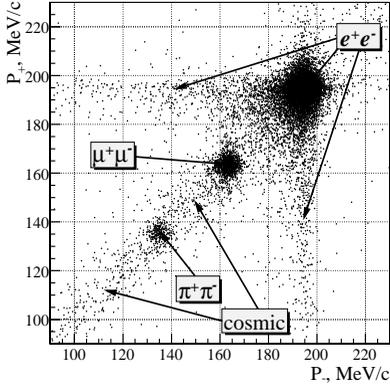


Рис. 8. Двумерное импульсное распределение экспериментальных данных на энергии 2×195 МэВ.

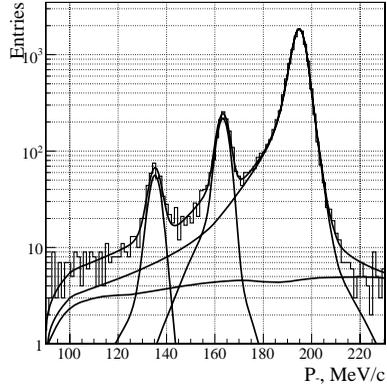


Рис. 9. Проекция двумерной аппроксимации импульсного распределения экспериментальных событий.

формации с трековой системы – запуск оцифровывающей электроники происходил при наличии хотя бы одного трека в дрейфовой камере, а “нейтральный” триггер использовал информацию об энергии и положении кластеров в цилиндрическом калориметре CsI.

Разделение отобранных коллинеарных событий основано на информации об импульсах частиц, измеренных в трековой системе детектора. Двумерное распределение P_+ от P_- при энергии $\sqrt{s} = 2 \times 195$ МэВ показано на Рис. 8. Видны четко выраженные области, где концентрируются электроны, мюоны и пионы, а также сгущение событий вблизи диагонали гистограммы, обусловленное фоном космических частиц.

Количество частиц каждого типа определяется при минимизации функции максимального правдоподобия:

$$\mathcal{L} = - \sum_{\text{events}} \ln \left(\sum_i w_i \cdot f_i(P_-, P_+) \right), \quad \sum_i w_i = 1, \quad (2)$$

где $f_i(P_-, P_+)$ – плотность вероятности для конечных состояний типа i (электроны, мюоны, пионы и космический фон) иметь измеренные импульсы P_- и P_+ в трековой системе, а $w_i = N_i/N_{\text{tot}}$ – доля событий каждого типа.

На Рис. 9 представлена, в качестве примера, проекция двумерной аппроксимации импульса частицы с отрицательным зарядом при энергии пучков 2×195 МэВ.

Таблица 1. Вклады в систематическую ошибку.

Источник ошибки	Оценка
Метод разделения событий	0.4 %
Телесный угол	0.2 %
Эффективность реконструкции	0.2 %
Потери пионов	0.2 %
Радиационные поправки	0.3 %
Калибровка энергии ускорителя	0.3 %
Тормозное излучение	0.05 %
Сумма	0.7 %

В Таблице 1 приведены различные вклады в систематическую ошибку измерения формфактора пиона. Ошибка метода разделения событий определялась как разница количества событий, полученных в результате применения этого метода, и событий, заложенных в моделирование. Оценка ошибки в измерении телесного угла определяется точностью измерения продольной координаты трека в Z -камере детектора, которая по этому параметру имеет разрешение на порядок лучшее, чем дрейфовая камера. Эффективность реконструкции измерялась отдельно для каждого типа частиц и составила в среднем 96-97%. При определении формфактора важна только средняя разница между эффективностями, которая и бралась как оценка систематической ошибки. Потери пионов от ядерных взаимодействий в веществе детектора и распады в объеме дрейфовой камеры определялись из полного моделирования детектора КМД-2. Точность ядерных сечений для низкоэнергетичных пионов в пакете FLUKA, использовавшемся в моделировании, определяет систематическую ошибку величины потерь пионов. Точность определения энергии ускорителя составляет $\Delta E/E \sim 10^{-3}$, что дает вклад в точность измерения формфактора пиона 0.3%. Тормозное излучение на вакуумной трубе и веществе детектора приводит к тому, что электроны могут потерять значительную долю энергии и часть событий Баба не попадет в условия отбора. Точность этой поправки ограничивается знанием количества вещества, с которым взаимодействуют электроны.

После процедуры разделения событий и учета поправок, в каждой энергетической точке были получены экспериментальные значения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ и формфактора пиона, а также величина сечения рождения пары пионов для вычисления дисперсионного интеграла (1). Эти значения представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, электромагнитный форм-фактор заряженного пиона $|F_\pi|^2$ и сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ для вычисления дисперсионного интеграла (1). Показаны только статистические ошибки.

E , МэВ	$\sigma_{\mu\mu}^{\text{Born}}$, нб	$ F_\pi ^2$	$\sigma_{\pi\pi(\gamma)}^0$, нб
185	605 ± 16	2.05 ± 0.12	92.5 ± 5.6
195	523 ± 17	1.83 ± 0.12	89.6 ± 5.9
205	476 ± 19	1.98 ± 0.14	100.8 ± 7.0
215	468 ± 14	2.52 ± 0.11	130.6 ± 5.9
225	412 ± 17	2.69 ± 0.15	139.4 ± 7.6
235	373 ± 16	2.83 ± 0.14	145.2 ± 7.4
240	329 ± 21	3.02 ± 0.20	153.5 ± 10.3
250	343 ± 25	3.24 ± 0.24	161.3 ± 11.8
255	336 ± 26	3.83 ± 0.25	187.8 ± 12.5
260	327 ± 25	3.52 ± 0.21	170.3 ± 10.3

Полученное отношение $R_\mu = \sigma_{\mu\mu}^{\text{exp}}/\sigma_{\mu\mu}^{\text{theory}}$ показано на Рис. 10. Разница экспериментального значения и его теоретического расчета, в среднем по всем энергиям, составила $2.0 \pm 1.3_{\text{stat}} \pm 0.7_{\text{sys}} \%$. К сожалению, ограниченная экспериментальная статистика в этом диапазоне энергий не позволила проверить теоретические расчеты с лучшей точностью. На данный момент это первое прямое сравнение экспериментальных данных и теоретических расчетов на уровне 1 % в области низких энергий.

Для сравнения с другими экспериментами в этой области энергий и определения величины электромагнитного радиуса пиона $\langle r_\pi^2 \rangle$, зависимость формфактора от энергии описывалась совместно с другими данными КМД-2. Для описания экспериментальных данных использовалась модель из работы КМД-2 по измерению формфактора пиона в районе ρ -мезона. При этой параметризации ρ и ρ' мезонов представлены в модели Гунариса-Сакураи.

На Рис. 11 приведены значения пионного формфактора, полученные в данной работе и в предыдущих экспериментах в этом диапазоне энергий. Среднее отклонение точек данной работы от аппроксимирующей функции составило $\Delta = -0.65 \pm 1.87 \%$. Для измерения КМД это отклонение равно $\Delta = 5.1 \pm 3.4 \%$, для измерения СНД – $\Delta = 0.35 \pm 2.64$ ОЛЯ – $\Delta = 3.7 \pm 11.6 \%$, для измерения с детектора DM1 – $\Delta = -1.9 \pm 14.5 \%$, для измерения с детектора TOF – $\Delta = -9.5 \pm 7.1 \%$ и для измерения с де-

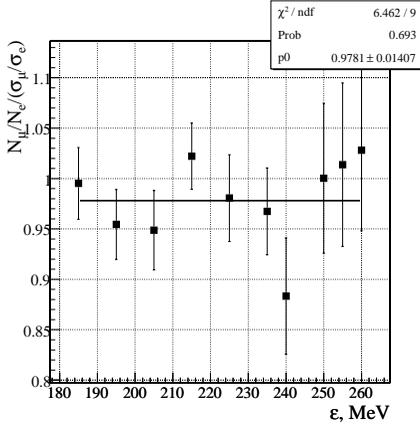


Рис. 10. Отношение экспериментального сечения рождения пары мюонов к его теоретическому предсказанию R_μ .

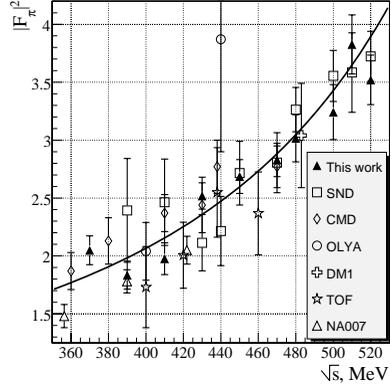


Рис. 11. Сравнение результатов данной работы с другими экспериментами. Кривая - аппроксимация данных КМД-2.

тектора NA07 – $\Delta = -11.5 \pm 3.1 \%$. Данные экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках находятся в хорошем согласии друг с другом – среднее расхождение не превышает 1.5 стандартных отклонения, тогда как с экспериментом NA07 оно достигает почти 4 стандартных отклонений, что может указывать на неучтенные систематические ошибки в этой работе.

На основе аппроксимации формфактора была получена величина среднеквадратичного электромагнитного радиуса пиона $\langle r_\pi^2 \rangle$:

$$\langle r_\pi^2 \rangle = 0.4219 \pm 0.0010 \pm 0.0012 \text{ фм}^2,$$

где первая ошибка – статистическая, а вторая – систематическая. Это значение хорошо согласуется с результатом, полученным в совместной работе детекторов ОЛЯ и КМД – $\langle r_\pi^2 \rangle = 0.422 \pm 0.003 \pm 0.013 \text{ фм}^2$. Также есть хорошее согласие с результатами эксперимента NA07 из пространственноподобной области – $\langle r_\pi^2 \rangle = 0.439 \pm 0.008 \text{ фм}^2$.

В Заключение приведены основные результаты работы:

1. Разработана программа электронных калибровок для мониторингования параметров дрейфовой камеры.
2. Развита методика калибровки параметров дрейфовой камеры по физическим событиям, которая привела к существенному улучшению углового разрешения для заряженных частиц.
3. Создан генератор для моделирования процессов электрон-позитронной аннигиляции с радиационными поправками, точность которых лучше 0.2%. Повышение точности достигнуто за счет учета излучения фотонных струй в коллинеарной области.
4. Сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ измерено в диапазоне энергий 370 – 520 МэВ в с.д.м. с лучшей в мире статистической и систематической точностью в экспериментах со встречными электрон-позитронными пучками. Систематическая точность измерения составила 0.7%.
5. Измерено сечение рождения пары мюонов и проведена проверка расчетов радиационных поправок для определения величины отношения сечений рождения мюонов и электрон-позитронного рассеяния с процентной точностью в области низких энергий. Разница между предсказанием КЭД и экспериментом составила $2.0 \pm 1.3 \pm 0.7\%$.
6. Используя все данные по формфактору пиона, полученные на детекторе КМД-2, вычислена величина электромагнитного радиуса – $\langle r_\pi^2 \rangle = 0.4219 \pm 0.0010 \pm 0.0012 \text{ фм}^2$.
7. На основании полученных данных об e^+e^- аннигиляции в два пиона вычислен вклад адронной поляризации вакуума в аномальный магнитный момент мюона, соответствующий диапазону энергий 370 – 520 МэВ – $a_\mu^{\pi\pi, LO} = (51.51 \pm 1.04 \pm 0.36) \times 10^{-10}$.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] D.V. Chernyak, D.A. Gorbachev, ..., A.L. Sibidanov *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.Л. Сибидапов и др., “Дрейфовая камера КМД-2”, Препринт ИЯФ 1999-64, Новосибирск, 1999.

- [3] A.B. Arbuzov, G.V. Fedotovitch, ..., A.L. Sibidanov. "Monte-Carlo generator for the processes $e^+e^- \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, \pi^+\pi^-$ and $K^+K^-, K_L K_S$ with precise radiative corrections at low energies", Preprint Budker INP 2004-070, Novosibirsk, 2004.
- [4] В.М. Аульченко, Р.Р. Ахметшин, ..., А.Л. Сибидапов и др., "Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на детекторе КМД-2 в диапазоне энергий 370-520 МэВ", Препринт ИЯФ 2006-43, Новосибирск, 2006.
- [5] A.B. Arbuzov, G.V. Fedotovitch, ..., A.L. Sibidanov *et al.*, "Monte-Carlo generator for e^+e^- annihilation into lepton and hadron pairs with precise radiative corrections", Eur. Phys. J., **C 46** (2006) 689.
- [6] A.L. Sibidanov, "Precise measurement of hadronic cross sections with CMD-2 detector", AIP Conf. Proc., **814** (2006) 478.
- [7] G.V. Fedotovitch and A.L. Sibidanov, "Monte Carlo generator with radiative corrections for the processes $e^+e^- \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$ and $\pi^+\pi^-$ at low energies", Nucl. Phys. Proc. Suppl., **131** (2004) 9.
- [8] G.V. Fedotovitch and A.L. Sibidanov, "Monte-Carlo Generator For Two-Body Final States With Precise Radiative Corrections", Nucl. Phys. Proc. Suppl., **162**, (2006) 63.
- [9] В.М. Аульченко, Р.Р. Ахметшин, ..., А.Л. Сибидапов и др., "Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на детекторе КМД-2 в диапазоне энергий 370-520 МэВ", Письма в ЖЭТФ, том **84**, вып.8 (2006), с.491-495.