

Измерение формфактора пиона в диапазоне энергий 1.04–1.38 ГэВ с детектором КМД-2

В. М. Аульченко⁺, Р. Р. Ахметшин⁺, В. Ш. Банзаров⁺, Л. М. Барков⁺, Н. С. Баштовой⁺, Д. В. Бондарев⁺,
А. Е. Бондарь⁺, А. В. Брагин⁺, А. А. Валишев⁺, Н. И. Габышев⁺, Д. А. Горбачев⁺, А. А. Гребенюк⁺,
Д. Н. Григорьев⁺, С. К. Дхаван^{□1)}, Д. А. Епифанов⁺, А. С. Зайцев⁺, С. Г. Зверев⁺, Ф. В. Игнатов⁺²⁾,
В. Ф. Казанин⁺, С. В. Карпов⁺, И. А. Кооп⁺, П. П. Кроковный⁺, А. С. Кузьмин⁺, И. Б. Логашенко^{+△},
П. А. Лукин⁺, А. П. Лысенко⁺, А. И. Мильштейн⁺, К. Ю. Михайлов⁺, И. Н. Нестеренко⁺, М. А. Никулин⁺,
А. В. Отбоев⁺, В. С. Охалкин⁺, Е. А. Переведенцев⁺, А. А. Полуин⁺, А. С. Попов⁺, С. И. Редин⁺,
Б. Л. Робертс^{△1)}, Н. И. Роот⁺, А. А. Рубан⁺, Н. М. Рыскулов⁺, А. Л. Сибидапов⁺, В. А. Сидоров⁺,
А. Н. Скринский⁺, В. П. Смахтин[◇], И. Г. Снопков⁺, Е. П. Солодов⁺, Д. А. Томпсон^{▽1)}, Г. В. Федотович⁺,
Б. И. Хазин⁺, В. В. Хьюз^{□1)}, А. Г. Шамов⁺, Ю. М. Шатунов⁺, Б. А. Шварц⁺, С. И. Эйдельман⁺,
Ю. В. Юдин⁺

⁺ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия

* Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

△ Boston University, Boston, MA 02215, USA

□ Yale University, New Haven, CT 06511, USA

▽ University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA 15260 USA

◇ Weizmann Institute of Science, 76100 Rehovot, Israel

Поступила в редакцию 9 ноября 2005 г.

Измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в диапазоне энергий 1.04 ÷ 1.38 ГэВ в системе центра масс на основе анализа 995 тысяч отобранных коллинеарных событий, которые включают в себя 860 тысяч событий e^+e^- , 82 тысячи $\mu^+\mu^-$ и 33 тысячи $\pi^+\pi^-$. Систематическая ошибка измерения формфактора пиона составила 1.2 ÷ 4.2 % при статистической ошибке 5 ÷ 13 %.

PACS: 13.25.-k, 13.40.Gp, 13.66.-a, 29.30.-h

Введение. Изучение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ дает важную информацию об электромагнитном формфакторе пиона, который описывает его внутреннюю структуру. Кроме того, точное измерение этого сечения необходимо для расчета величины аномального магнитного момента мюона $(g-2)_\mu$ [1] и его сравнения с прецизионными измерениями, одно из которых недавно выполнено в БНЛ, США [2]. Такое сравнение является важным тестом Стандартной Модели.

Эксперимент. Измерения были выполнены на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-2М [3] с универсальным детектором КМД-2 (криогенным магнитным детектором), совмещающим свойства магнитного спектрометра с хорошей калориметрией [4, 5]. Координаты, углы вылета и импульсы заряженных частиц измеряются координатной системой детектора, состоящей из дрейфовой и Z-камер, рас-

положенных внутри тонкого ($0.38X_0$) сверхпроводящего соленоида с магнитным полем 1 Тл. Цилиндрический и торцевой электромагнитные калориметры на основе скинтилляционных кристаллов CsI и BGO обеспечивают измерение энергии и углов вылета фотонов, а также позволяют разделять электроны и адроны. Пробежная система служит для идентификации мюонов.

Данная работа продолжает цикл прецизионных измерений адронных сечений с детектором КМД-2. Результаты измерения формфактора пиона в области энергий 0.61 ÷ 0.96 ГэВ были опубликованы в [6]. В настоящей работе представлены результаты измерения формфактора в диапазоне энергии 1.04 ÷ 1.38 ГэВ. Более подробное описание анализа данных приведено в [7].

В эксперименте была набрана интегральная светимость около 6 пб^{-1} . Для анализа отобрано 33 тысячи событий $\pi^+\pi^-$, набранных в 35 точках по энергии пучка от 520 МэВ до 690 МэВ с шагом 5 МэВ. Энергия пучка контролировалась по величине магнитного по-

¹⁾ S. K. Dhanan, B. L. Roberts, J. A. Thompson, V. W. Hughes.

²⁾ e-mail: ignatov@inp.nsk.su

ля в накопительном кольце ВЭПП-2М с точностью не хуже $\delta E/E \sim 10^{-3}$.

Отбор коллинеарных событий. Для выделения событий $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ применялись следующие условия:

- В дрейфовой камере найдена одна вершина с двумя треками частиц противоположного заряда.
- Вершина события находится вблизи места встречи пучков: $\rho_{vtx} = \min(\rho_{tr}^+, \rho_{tr}^-) < 0.15$ см, где ρ_{tr}^\pm – минимальное расстояние между треком частицы и осью пучков, $|Z_{vtx}| < 10$ см, где Z_{vtx} – положение вершины вдоль оси пучков.
- Условия на коллинеарность треков: где $|\Delta\varphi| = |\pi - |\varphi^+ - \varphi^-|| < 0.15$, φ^\pm – азимутальный угол трека, где $|\Delta\theta| = |\pi - (\theta^+ + \theta^-)| < 0.25$, θ^\pm – полярный угол трека.
- Ограничение на телесный угол регистрации события: $\theta_{\min} < (\pi + \theta^- - \theta^+)/2 < \pi - \theta_{\min}$, где $\theta_{\min} = 1.1$.
- Средний импульс ограничивался сверху, для уменьшения фона от космических частиц, и снизу, чтобы подавить события процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$:

$$E_{beam} + 150 \text{ МэВ/с} > (p^+ + p^-)/2 >$$

$$> \max(\sqrt{E_{beam}^2 - 494^2} \cdot 1.15 \text{ МэВ/с}, 300 \text{ МэВ/с}),$$
 p^\pm – импульсы положительно и отрицательно заряженных частиц.

Основными источниками фона для процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ являются реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ и космические частицы. Вклад физического фона в величину формфактора пиона вычислялся на основе экспериментальных сечений [8, 9] с учетом эффективности регистрации, определенной из полного моделирования. Общий вклад этих процессов не превышает 0.8% и учитывается как поправка к величине формфактора пиона, в соответствии с соотношением (2). Количество событий фона космических частиц определялось из распределения по расстоянию вершины события до места встречи пучков.

Разделение событий. Для определения числа событий каждого процесса использовались двумерные распределения по энерговыделению в CsI калориметре (рис.1). Число событий (N_π , $N_\mu + N_e$) определялось с помощью минимизации функции максимального правдоподобия:

$$\mathcal{L} = - \sum_{\text{events}} \ln \left(\sum_i N_i \cdot f_i(E^+, E^-) \right) + \sum_i N_i,$$

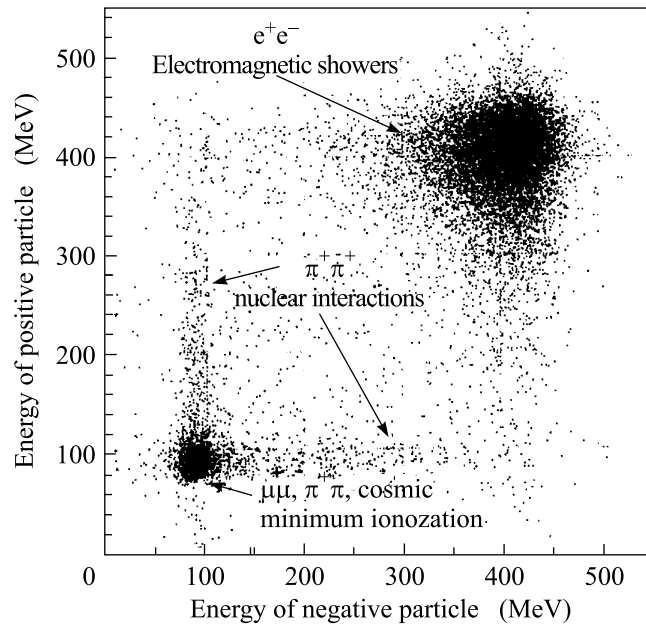


Рис.1. Распределение коллинеарных частиц по энерговыделению в калориметре

где f_i – функция плотности вероятности для событий данного типа (π , μ , e , cosmic). Электроны и позитроны порождают в калориметре электромагнитный ливень, поэтому они заметно отличаются по энерговыделению от других заряженных частиц. Энерговыделения мюонов, космических частиц и оставших только ионизационные потери пионов почти одинаковы, поэтому для вычисления количества мюонов использовалась дополнительная информация об отношении сечения рождения мюонов к сечению $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ на основе расчета по квантовой электродинамике с учетом разрешений и эффективностей регистрации в детекторе.

Определение формфактора пиона. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, проинтегрированное по телесному углу регистрации, определяется выражением

$$\sigma_{\pi^+\pi^-} = \sigma_{\pi^+\pi^-}^0 \cdot |F_\pi|^2 = \frac{\pi\alpha^2}{3s} \left(1 - \frac{4m_\pi^2}{s}\right)^{3/2} \frac{3 \cos \theta_{\min} - \cos^3 \theta_{\min}}{2} \cdot |F_\pi|^2, \quad (1)$$

где $\sigma_{\pi^+\pi^-}^0$ – сечение, вычисленное в предположении отсутствия внутренней структуры пиона. В величину формфактора также включается вклад поляризации вакуума в фотонный пропагатор.

В каждой точке по энергии величина формфактора вычисляется как

$$|F_\pi|^2 = \frac{N_{\pi^+\pi^-}}{N_{e^+e^-} + N_{\mu^+\mu^-}} \times \frac{\sigma_{e^+e^-}^0 (1 + \delta_{e^+e^-}) \varepsilon_{e^+e^-} + \sigma_{\mu^+\mu^-}^0 (1 + \delta_{\mu^+\mu^-}) \varepsilon_{\mu^+\mu^-}}{\sigma_{\pi^+\pi^-}^0 (1 + \delta_{\pi^+\pi^-}) \varepsilon_{\pi^+\pi^-} (1 - \Delta_{\pi \text{ loss}})} - \Delta_{3\pi, 4\pi, K^+K^-}, \quad (2)$$

где $N_{\pi^+\pi^-}/(N_{e^+e^-} + N_{\mu^+\mu^-})$ – найденное в процессе минимизации отношение числа зарегистрированных пионов к числу мюонов и электронов, σ_{ii}^0 – борновское сечение в низшем порядке теории возмущений, δ_{ii} – радиационная поправка, ε_{ii} – эффективность регистрации, $\Delta_{3\pi, 4\pi, K^+K^-}$ – поправка на вклад фоновых процессов, Δ_{loss} – поправка на потерю пионов на стенке вакуумной камеры и объеме дрейфовой камеры из-за ядерных взаимодействий. Величина Δ_{loss} определялась из моделирования сравнением количества отбираемых пионов с учетом и без учета ядерных взаимодействий. Величина поправки составила $0.8 \div 1.2 \%$.

При отборе коллинеарных событий использовалась только информация с дрейфовой камеры, поэтому, отобрав нужные (тестовые) события по калориметру CsI и проверив, есть ли в дрейфовой камере восстановленные треки, можно определить эффективность реконструкции события. Эффективность реконструкции составила $97 \div 98 \%$. Согласно формуле (2), при определении формфактора пиона играет роль только разница эффективностей регистрации разных процессов, которая между электронами и мюонами составила $0.16 \pm 0.09 \%$.

При расчете радиационных поправок к процессам $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ использовалась разработанная в работе [10] методика, основанная на формулах из работ [11, 12]. В них учитывается вероятность излучения многих фотонов вдоль конечных и начальных частиц, излучение одного фотона на большой угол и вклад поляризации вакуума в фотонный пропагатор. Так как поляризацию вакуума принято включать в определение формфактора, то для процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ ее вклад не включался в радиационную поправку. Согласно работе [10], точность расчета радиационных поправок оценивается в 0.2% для всех процессов. Количество отбираемых коллинеарных событий зависит от углового и импульсного разрешений дрейфовой камеры. Для их учета в программе расчета радиационных поправок углы вылета и импульсы частиц дополнительно разыгрывались в соответствии с экспериментальным значением разрешения, после чего накладывались критерии отбора. Для процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ учитывались энергетические потери электронов и позитронов, связанные с тормозным излучением на

стенке вакуумной камеры, и первых 10 см дрейфовой камеры.

В табл.1 приведены полученные значения формфактора для каждой энергетической точки.

Таблица 1

Экспериментальные значения формфактора пиона $|F_\pi|^2$. Приведена только статистическая ошибка

E, МэВ	$ F_\pi ^2$	E, МэВ	$ F_\pi ^2$
490.0	3.596 ± 0.163	605.7	1.069 ± 0.082
520.0	2.598 ± 0.134	610.0	0.989 ± 0.075
525.0	2.262 ± 0.112	615.0	1.069 ± 0.088
530.0	2.185 ± 0.135	620.0	0.988 ± 0.081
535.0	2.295 ± 0.130	625.0	0.794 ± 0.064
540.0	1.884 ± 0.119	630.0	0.696 ± 0.063
545.0	2.120 ± 0.110	635.0	0.719 ± 0.057
550.0	1.704 ± 0.120	640.0	0.693 ± 0.052
555.0	1.641 ± 0.106	645.0	0.571 ± 0.042
560.0	1.449 ± 0.146	650.0	0.640 ± 0.046
565.0	1.683 ± 0.103	655.0	0.570 ± 0.050
570.0	1.531 ± 0.088	660.0	0.483 ± 0.054
575.0	1.374 ± 0.150	665.0	0.460 ± 0.040
580.0	1.386 ± 0.087	670.0	0.524 ± 0.062
585.0	1.197 ± 0.115	675.0	0.347 ± 0.049
590.0	1.200 ± 0.088	680.0	0.357 ± 0.040
595.0	1.014 ± 0.093	685.0	0.424 ± 0.078
600.0	0.983 ± 0.079	690.0	0.338 ± 0.032

Систематическая ошибка. Основные вклады в систематическую ошибку приведены в табл. 2. Рост систематической ошибки с энергией связан с тем, что ошибка в числе мюонов дает прямой вклад в ошибку числа пионов, а отношение числа мюонов к числу пионов изменяется от 1 до 7 при изменении энергии в с.д.м. от 1 ГэВ до 1.38 ГэВ. Суммарная величина систематической ошибки составляет $1.2 \div 4.2 \%$ и не превышает трети от статистической ошибки в каждой экспериментальной точке.

Одна из проверок методики разделения была проведена с использованием событий моделирования e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ и $\pi^+\pi^-$. При анализе данных моделирования учитывались поправки: на потерю пионов из-за ядерного взаимодействия, энергетические потери электронов на стенке вакуумной камеры, разрешение дрейфовой камеры при расчете радиационных поправок, вычислялась эффективность регистрации (разница эффективностей регистрации e^+e^- и $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$ в моделировании составила $\varepsilon_{MIP} - \varepsilon_{e^+e^-} = 0.189 \pm 0.004 \%$). Отличие величины получаемого формфактора от используемого в модели-

Таблица 2

Вклад различных факторов в систематическую ошибку $|F_\pi|^2$. Приведенный интервал соответствует сканируемому диапазону энергий

Источник ошибки	Величина ошибки $\sqrt{s} = 1.04 \div 1.38$ ГэВ
Телесный угол регистрации	0.2 ÷ 0.5 %
Эффективность регистрации	0.5 ÷ 2 %
Потеря пионов	0.2 %
Тормозное излучение e^+e^-	0.05 ÷ 1.7 %
Радиационные поправки	0.5 ÷ 2 %
Фоновые события	0.6 ÷ 1.6 %
Калибровка энергии	0.7 ÷ 1.1 %
Процедура разделения частиц	0.2 ÷ 1.5 %
Статистическая ошибка в точке	1.2 ÷ 4.2 %
	5 ÷ 13 %

ровании изменялось от 0.2 до 1.5% в зависимости от энергии. Величина расхождения при самой большой энергии – 1.5%, из которых 1% приходится на процедуру разделения, а оставшиеся 0.5% характеризуют систематическую точность учета перечисленных поправок.

Обсуждение результатов. На рис.2 приведены полученные результаты, которые хорошо согласуются с данными предыдущих экспериментов, проведенных на детекторах OLYA [13], DM1 [14], DM2 [15], VCF [16], ACO [17]. Детально формфактор в этой области энергии был измерен лишь в эксперименте

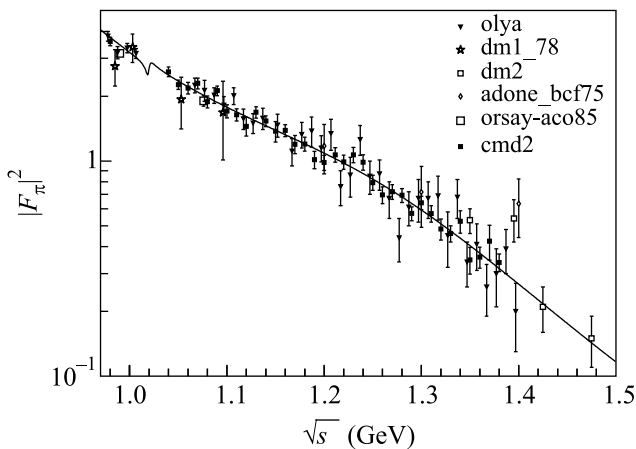


Рис.2. Сравнение экспериментальных данных по формфактору пиона $|F_\pi|^2$, полученных в этой работе, с другими экспериментами

на детекторе ОЛЯ с систематической погрешностью 10 ÷ 15 %. Экспериментальная зависимость формфак-

тора от энергии хорошо описывается в рамках модели векторной доминантности суммой амплитуд $\rho(770)$, $\rho(1450)$, $\rho(1700)$, ω и ϕ мезонов [6]:

$$|F_\pi(s)|^2 = \left| \left(BW_{\rho(770)}^{\text{GS}}(s) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(1 + \delta_\omega \frac{s}{m_\omega^2} BW_\omega(s) + \delta_\phi \frac{s}{m_\phi^2} BW_\phi(s) \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \beta BW_{\rho(1450)}^{\text{GS}}(s) + \gamma BW_{\rho(1700)}^{\text{GS}}(s) \right) / (1 + \beta + \gamma) \right|^2, \quad (3)$$

где $BW_\rho^{\text{GS}}(s)$ – параметризация ρ мезона в модели Гунариса–Сакураи [18], $BW_\omega(s)$, $BW_\phi(s)$ – параметризация ω , ϕ резонансов, которые из-за малой ширины описывались релятивистской формой Брейта–Вигнера; δ_ω , δ_ϕ , β и γ – параметры модели, описывающие относительные вклады ρ – ω , ρ – ϕ интерференций и состояний $\rho(1450)$ и $\rho(1700)$. Для определения параметров модели необходимо использовать все доступные данные по формфактору в диапазоне энергий $\sqrt{s} = 0.36 \div 3.7$ ГэВ, что будет сделано в публикации с анализом всей информации, набранной детектором КМД-2 в диапазоне энергий от 0.37 до 1.38 ГэВ.

Заключение. В работе измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в диапазоне энергий 1.04 ÷ 1.38 ГэВ в системе центра масс с лучшей в мире точностью. Систематическая ошибка измерения составила 1.2 ÷ 4.2 % при статистической ошибке 5 ÷ 13 %. Измеренное сечение хорошо согласуется с результатами предыдущих экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты # 03-02-16477, # 03-02-16280, # 03-02-16843, # 04-02-16217, # 04-02-16223, # 04-02-16434.

1. M. Davier and W. J. Marciano, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **54**, 115 (2004).
2. G. W. Bennett et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 161802 (2004).
3. В. В. Анашин, И. Б. Вассерман, В. Г. Вещеревич и др., Препринт ИЯФ **84-114**, Новосибирск, 1984.
4. Г. А. Аксенов, В. М. Аульченко, Л. М. Барков и др., Препринт ИЯФ **85-118**, Новосибирск, 1985.
5. E. V. Anashkin, V. M. Aulchenko, S. E. Baru et al., ICFA Instrum. Bulletin **5**, 18 (1988).
6. R. R. Akhmetshin et al., Phys. Lett. B **527**, 161 (2002); R. R. Akhmetshin et al., Phys. Lett. B **578**, 285 (2004).
7. В. М. Аульченко, Р. Р. Ахметшин, В. Ш. Банзаров и др., Препринт ИЯФ **2005-29**, Новосибирск, 2005.
8. R. R. Akhmetshin et al., Phys. Lett. B **489**, 125 (2000).
9. R. R. Akhmetshin et al., Phys. Lett. B **466**, 392 (1999).

10. A. B. Arbuzov, G. V. Fedotovitch, F. V. Ignatov et al., Preprint INP **04-70**, Novosibirsk, 2004.
11. A. B. Arbuzov, E. A. Kuraev, V. A. Astakhov et al., JHEP **10**, 006 (1997).
12. A. B. Arbuzov, E. A. Kuraev, G. V. Fedotovitch et al., JHEP **10**, 001 (1997).
13. L. M. Barkov et al., Nucl. Phys. B **256**, 365 (1985).
14. A. Quenzer et al., Phys. Lett. B **76**, 512 (1978).
15. D. Bisello et al., Phys. Lett. B **220**, 321 (1989).
16. D. Bollini et al., Lett. Nuovo Cim. **14**, 418 (1975).
17. G. Cosme et al., Preprint LAL-1287, Orsay, 1976.
18. G. J. Gounaris and J. J. Sakurai, Phys. Rev. Lett. **21**, 244 (1968).