

ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМФАКТОРА ПИОНА В ОБЛАСТИ \sqrt{s} ОТ 640 ДО 1400 МэВ

*Л.М.Курдадзе, М.Ю.Лельчук, Е.В.Пахтусова,
В.А.Сидоров, А.Н.Скринский, А.Г.Чилингаров,
Ю.М.Шатунов, Б.А.Шварц, С.И.Эйдельман*

В реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на накопителе ВЭПП-2М с детектором „ОЛЯ” был измерен электромагнитный формфактор пиона в энергетическом интервале 640 – 1400 МэВ. Получены параметры ρ -мезона и $\rho - \omega$ -интерференции. Показано, что при $\sqrt{s} > 1000$ МэВ формфактор пиона не описывается суммой ρ и ρ' (1600)-мезонов.

В настоящей работе продолжено изучение формфактора пиона на детекторе „ОЛЯ”, начатое работой ¹. Описание детектора дано в ². Предварительные результаты обработки части статистики (1060 – 1400 МэВ) опубликованы ранее ³. Основные принципы обработки экспериментальной информации в данной работе не претерпели существенных изменений.

Набор статистики осуществлялся при сканировании указанного интервала энергии с шагом примерно равным энергетическому разбросу в СЦМ (0,5 – 0,7 МэВ). Интеграл светимости, набранный в эксперименте, составил около 1500 нбн^{-1} , что примерно на порядок больше, чем было набрано на всех других детекторах в этом интервале энергии.

На первом этапе обработки отбирались события с двумя треками в координатных камерах, выходящими из области взаимодействия e^+e^- -пучков и удовлетворяющими условиям коллинеарности:

$$|\Delta\theta| < 7^\circ, \quad |\Delta\phi| < 5^\circ \quad (\sigma_{\Delta\phi, \Delta\theta} \sim 1^\circ).$$

Кроме того требовалось, чтобы по крайней мере одна из частиц достигала первого счетчика „сэндвича” (23 г/см^2). Это условие существенно подавляло фон от процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$. На этом же этапе обработки по большим удельным ионизационным потерям в сцинтилляционных счетчиках ⁴ исключались события процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$.

Отобранные таким образом $880 \cdot 10^3$ событий в соответствии с амплитудами сигналов сцинтилляционных счетчиков „сэндвича” с помощью метода корреляционных матриц ⁵, разделялись на события $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-, \mu^+\mu^-$ и события упругого рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. События процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ разделялись по пробегаем частиц в ливнево-пробежной системе. Во всем интервале энергии было выделено $N(e^+e^-) = 698 \cdot 10^3$, $N(\mu^+\mu^-) = 43 \cdot 10^3$ и $N(\pi^+\pi^-) = 139 \cdot 10^3$ событий.

Значения эффективности регистрации исследуемых процессов были вычислены с помощью программы моделирования эксперимента, описанной в ⁶. Радиационные поправки для изучаемых процессов определялись в соответствии с работой ⁷.

Основным источником фона для реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ является процесс $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$, сечение которого слабо зависит от энергии. Величина этого фона составляла 0,1% при $\sqrt{s} \sim m_\rho$ и возрастает до 25% при $\sqrt{s} = 1400 \text{ МэВ}$. Число событий этого процесса определялось по количеству отбракованных ранее событий с мягкими частицами и коэффициенту пересчета, найденному из моделирования. Вычиталась также малая примесь событий процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$. Величина этой примеси определялась по экспериментальным значениям сечения, полученным в нашем эксперименте ⁸.

Отношение числа $\mu^+\mu^-$ -событий к числу e^+e^- -событий, зарегистрированных в данном эксперименте, деленное на то же отношение, соответствующее КЭД, оказалось равным:

$$\frac{[N(\mu^+\mu^-)/N(e^+e^-)]_{\text{эксп.}}}{[N(\mu^+\mu^-)/N(e^+e^-)]_{\text{КЭД}}} = 1,02 \pm 0,01 \pm 0,03.$$

Указаны статистическая и систематическая ошибки. Хорошее согласие результата эксперимента с квантовой электродинамикой свидетельствует в пользу правильности метода обработки.

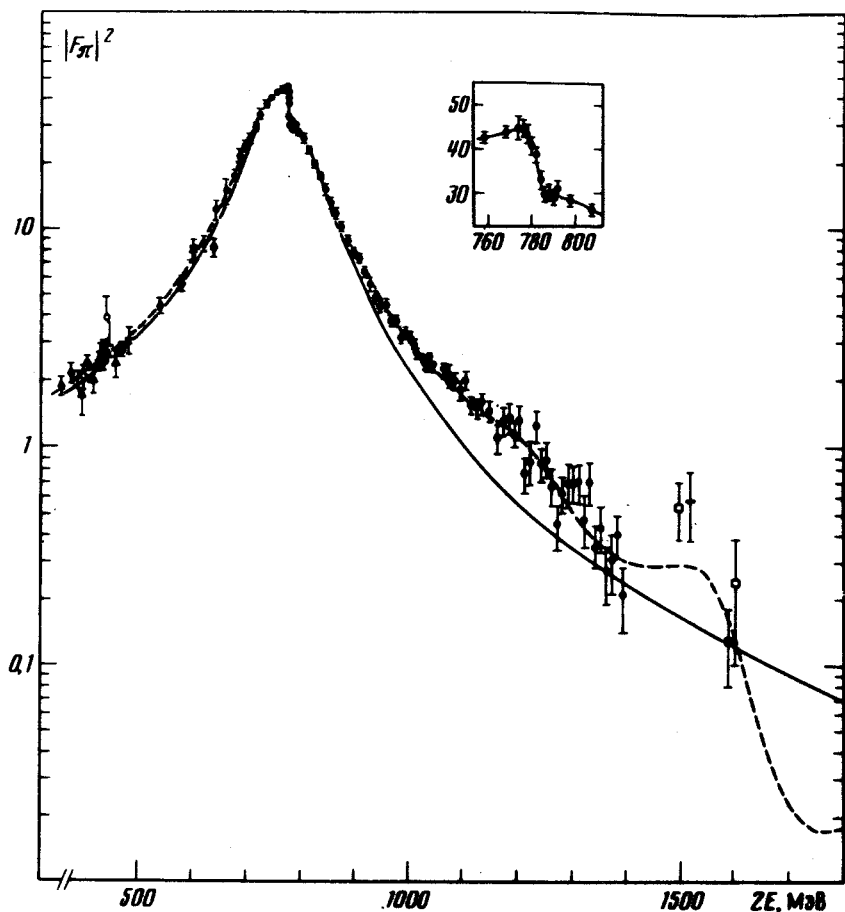
На рисунке представлены экспериментальные значения $|F_\pi|^2$ в зависимости от энергии. Значения $|F_\pi|^2$, полученные в данном эксперименте, находятся в согласии с предыдущими результатами нашей и других групп ^{1, 9-13}.

Анализ возможных источников систематических погрешностей в настоящей работе показал, что величина систематической ошибки в $|F_\pi|^2$ составляет около 4% при $\sqrt{s} = 800 \text{ МэВ}$ и возрастает до 15% при $\sqrt{s} = 1400 \text{ МэВ}$.

Для объяснения наблюдаемого превышения $|F_\pi|^2$ над „хвостом” ρ -мезона в настоящей работе было проведено сравнение ряда моделей, описывающих формфактор пиона, с экспериментальными данными. При этом в рассмотрение включались следующие данные: при $\sqrt{s} < 640 \text{ МэВ}$ — ^{10, 14-16}, в области $640 - 1400 \text{ МэВ}$ — результаты данной работы, в интервале $1400 - 1700 \text{ МэВ}$ — ^{12, 13, 17} и при $\sqrt{s} > 3000 \text{ МэВ}$ результат работ ^{18, 19}.

В первую очередь была рассмотрена модель с учетом ρ' (1600), существование которого и наличие распада $\rho' \rightarrow \pi^+\pi^-$ можно считать надежно установленным ²⁰. Была проведена подгонка экспериментальных данных при $m_{\rho'} = 1600 \pm 20 \text{ МэВ}$, $\Gamma_{\rho'} = 300 \pm 100 \text{ МэВ}$ и свободных $V_{\rho'\pi\pi}, \Gamma_{\rho'ee}$ и относительной фазе $\psi_{\rho'}$, однако при этом не удалось получить

удовлетворительного описания экспериментальных данных. Добавление еще одного резонанса — давно обсуждающегося в литературе ρ' (1250) — приводит к хорошему согласию кривой с экспериментальными точками.



Экспериментальные значения $|F_\pi|^2$, полученные в работах: \square — 17, \blacksquare — 12, $-$ — 13, \times — 10, \triangle — 15, \circ — 14, \diamond — 16, \bullet — данный эксперимент. Сплошная кривая проведена в соответствии с формулой Гаунариса — Сакураи при учете ρ - ω -интерференции. Пунктир — параметризация $F_\pi(s)$ с учетом ρ , ω , ρ' (1250), ρ'' (1600)-мезонов при оптимальных значениях параметров

Пионный формфактор параметризовался выражением вида

$$F_\pi(s) = F_\pi^0 (1 + \eta e^{i\theta} \rho \omega F_\pi^\omega) + \xi_1 e^{i\psi_1} F_\pi^{\rho'} + \xi_2 e^{i\psi_2} F_\pi^{\rho''},$$

где F_π^ρ — вклад ρ -мезона — вычислялся по формуле Гаунариса — Сакураи ²¹, а F_π^ω , $F_\pi^{\rho'}$, $F_\pi^{\rho''}$ — члены, соответствующие ω , ρ' (1250), ρ'' (1600)-мезонам, были взяты в соответствии с формулой Брейта — Вигнера. $m_\rho, \Gamma_\rho, \theta_{\rho\omega}, \eta, m_{\rho'}, \Gamma_{\rho'}, \xi_1, \xi_2$ — были свободными параметрами. Оптимальные значения параметров оказались следующими:

$$m_\rho = 775,9 \pm 1,0 \text{ МэВ},$$

$$m_{\rho'} = 1292 \pm 17 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_\rho = 148,8 \pm 2,3 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_{\rho'} = 218 \pm 46 \text{ МэВ},$$

$$B_{\omega\pi\pi} = 2,03 \pm 0,45 \%,$$

$$B_{\rho'\pi\pi} \Gamma_{\rho'ee} = 27_{-10}^{+15} \text{ эВ},$$

$$\theta_{\rho\omega} = 5,0 \pm 6,3^\circ,$$

$$\Gamma_{\rho ee} = 6,88 \pm 0,18 \text{ кэВ},$$

$$B_{\rho''\pi\pi} \Gamma_{\rho''ee} = 29_{-12}^{+16} \text{ эВ},$$

Относительные фазы ψ_1 и ψ_2 полагались равными 180° и $F_\pi(0) = 1$.

Следует заметить, что экспериментальные результаты настоящей работы, без привлечения данных в области 1400 – 1700 МэВ, дают лишь верхний предел на величину

$$B(\rho''(1600) \rightarrow \pi^+ \pi^-) \cdot \Gamma(\rho''(1600) \rightarrow e^+ e^-) < 40 \text{ эВ} \text{ (90 \% уровней достоверности),}$$

а при свободных ψ_1 и ψ_2 этот предел повышается до 240 эВ.

Другое объяснение поведения F_π было предложено в ²², где впервые отмечалось, что быстрый рост сечения многоадронных процессов в этой области энергии может обеспечить необходимое увеличение $|F_\pi|^2$. Различные варианты описания F_π с учетом многоадронных каналов, в пренебрежении, однако, вкладом $\rho''(1600)$, были рассмотрены в ²³⁻²⁵. К сожалению адекватное описание этого эффекта с учетом $\rho''(1600)$, а также с учетом связи канала $\pi^+ \pi^-$ с различными многоадронными каналами отсутствует. Тем не менее в настоящей работе была проведена подгонка с простой параметризацией $F_\pi(s)$ ²⁵, учитывающей влияние многоадронных каналов и использованной в эксперименте ¹⁰. Кроме того $F_\pi(s)$ аппроксимировался формулой подобной полученной в ²³, в которой, однако, был учтен $\rho''(1600)$ в канале $\pi^+ \pi^-$. Оказалось, что, как та, так и другая модели при оптимальных значениях параметров удовлетворительно описывают экспериментальные данные. Таким образом, вопрос о существовании $\rho'(1250)$ -мезона по-прежнему остается открытым.

Оптимальные значения параметров ρ -мезона и $\rho - \omega$ -интерференции зависят от способа описания $F_\pi(s)$. Для рассмотренных в данной работе моделей максимальный разброс значений параметров характеризуется следующими величинами:

$$\Delta m_\rho \approx 1 \text{ МэВ}, \quad \Delta \Gamma_\rho \approx 2 \text{ МэВ}, \quad \Delta B_{\omega\pi\pi} \approx 0,15 \%, \quad \Delta \Gamma_{\rho ee} \approx 0,3 \text{ кэВ}.$$

Важным физическим параметром, связанным с формфактором пиона, является его среднеквадратичный радиус $\langle r_\pi^2 \rangle$, который может быть вычислен по полученным оптимальным значениям параметров и оказывается равным: $\langle r_\pi^2 \rangle = 0,423 \pm 0,004 \pm 0,015 \text{ Ф}^2$. Первая из приведенных погрешностей включает статистическую и систематическую ошибки эксперимента, а вторая определяется разбросом значений $\langle r_\pi^2 \rangle$ при выборе одной из рассмотренных моделей.

В заключение авторы хотят выразить благодарность коллективу ВЭПП-2М за хорошую работу комплекса, а также А.И.Вайнштейну и И.Б.Хрипловичу за полезные обсуждения.

Литература

1. Bukin A.D. et al. Phys. Lett., 1978, 73B, 226.
2. Sidorov V.A. Proc. of 1979 Int. Symp. on Lepton and Photon Interactions, p.490, Batavia, 1979.
3. Кооп И.А. и др. Препринт ИЯФ-79-67, Новосибирск, 1979.
4. Ivanov P.M. et al. Phys.
5. Букин А.Д. и др. Препринт ИЯФ 77-92, Новосибирск, 1977.
6. Букин А.Д., Эйдельман С.И. Препринт ИЯФ 77-101, Новосибирск, 1977.
7. Eidelman S.I., Kuraev E.A. Phys. Lett., 1978, 80B,
8. Курдадзе Л.М. и др. Препринт ИЯФ 79-79, Новосибирск, 1979.
9. Benaksas D. et al. Phys. Lett., 1972, 39B, 289.
10. Quenzer A. et al. Phys. Lett., 1978, 76B, 512.
11. Cosme G. et al. Препринт ОРСЭ LAL-1287, 1976.
12. Bollini D. et al. Lett. Nuovo. Cim., 1975, 14, 418.
13. Barbiellini G. et al. Lett. Nuovo. Cim., 1973, 6, 557.
14. Вассерман И.Б. и др. ЯФ, 1979, 30, 999.
15. Вассерман И.Б. и др. ЯФ, 1981, 33, 709.
16. Аникин Г.В. и др. Препринт ИЯФ 83-12, Новосибирск, 1983.

17. *Esposito B. et al. Lett. Nuovo. Cim.*, 1980, 28, 337; *Esposito B. et al. Phys. Lett.*, 1981, 67B, 239.
18. *Braunschweig W. et al. Phys. Lett.*, 1976, 63B, 487.
19. *Vanucci F. et al. Phys. Rev.*, 1977, D15, 1814.
20. *Paul E.* „Proc. of the 1981 Symp on Lepton and Photon Inter.“, p. 301, Bonn 1981.
21. *Gounaris G., Sakurai J. Phys. Rev. Lett.*, 1968, 21, 244.
22. *Байер В.Н., Фадин В.С. Письма в ЖЭТФ*, 1972, 15, 219.
23. *Bonneau G., Martin F. Nuovo Cim.*, 1973, 13A, 413.
24. *Budnev N.M. et al. Phys. Lett.*, 1977, 70B, 365.
25. *Costa B. de Beauregard et al. Phys. Lett.*, 1977, 67B, 213.

Институт ядерной физики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
5 мая 1983 г.