

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

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

<sup>+</sup> 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  $6 \text{ пб}^{-1}$ . 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-

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

<sup>2)</sup> 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  $\rho_{tr}^\pm$  – 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  $|\Delta\varphi| = |\pi - |\varphi^+ - \varphi^-|| < 0.15$ ,  $\varphi^\pm$  – азимутальный угол трека, где  $|\Delta\theta| = |\pi - (\theta^+ + \theta^-)| < 0.25$ ,  $\theta^\pm$  – 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 ( $N_\pi$ ,  $N_\mu + N_e$ ) определялось с помощью минимизации функции максимального правдоподобия:

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

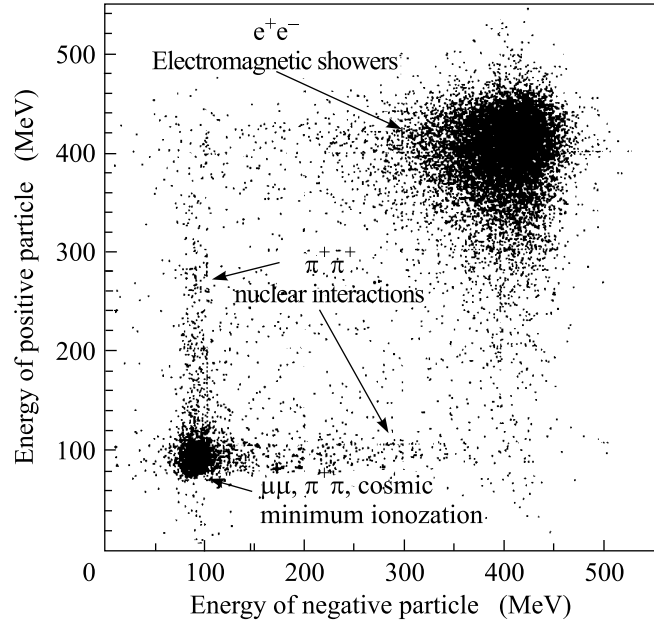


Рис.1. Распределение коллинеарных частиц по энерговыделению в калориметре

где  $f_i$  – функция плотности вероятности для событий данного типа ( $\pi$ ,  $\mu$ ,  $e$ , 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,  $\sigma_{ii}^0$  – борновское сечение в низшем порядке теории возмущений,  $\delta_{ii}$  – радиационная поправка,  $\varepsilon_{ii}$  – эффективность регистрации,  $\Delta_{3\pi, 4\pi, K^+K^-}$  – поправка на вклад фоновых процессов,  $\Delta_{\text{loss}}$  – поправка на потерю пионов на стенке вакуумной камеры и объеме дрейфовой камеры из-за ядерных взаимодействий. Величина  $\Delta_{\text{loss}}$  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	$3.596 \pm 0.163$	605.7	$1.069 \pm 0.082$
520.0	$2.598 \pm 0.134$	610.0	$0.989 \pm 0.075$
525.0	$2.262 \pm 0.112$	615.0	$1.069 \pm 0.088$
530.0	$2.185 \pm 0.135$	620.0	$0.988 \pm 0.081$
535.0	$2.295 \pm 0.130$	625.0	$0.794 \pm 0.064$
540.0	$1.884 \pm 0.119$	630.0	$0.696 \pm 0.063$
545.0	$2.120 \pm 0.110$	635.0	$0.719 \pm 0.057$
550.0	$1.704 \pm 0.120$	640.0	$0.693 \pm 0.052$
555.0	$1.641 \pm 0.106$	645.0	$0.571 \pm 0.042$
560.0	$1.449 \pm 0.146$	650.0	$0.640 \pm 0.046$
565.0	$1.683 \pm 0.103$	655.0	$0.570 \pm 0.050$
570.0	$1.531 \pm 0.088$	660.0	$0.483 \pm 0.054$
575.0	$1.374 \pm 0.150$	665.0	$0.460 \pm 0.040$
580.0	$1.386 \pm 0.087$	670.0	$0.524 \pm 0.062$
585.0	$1.197 \pm 0.115$	675.0	$0.347 \pm 0.049$
590.0	$1.200 \pm 0.088$	680.0	$0.357 \pm 0.040$
595.0	$1.014 \pm 0.093$	685.0	$0.424 \pm 0.078$
600.0	$0.983 \pm 0.079$	690.0	$0.338 \pm 0.032$

**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

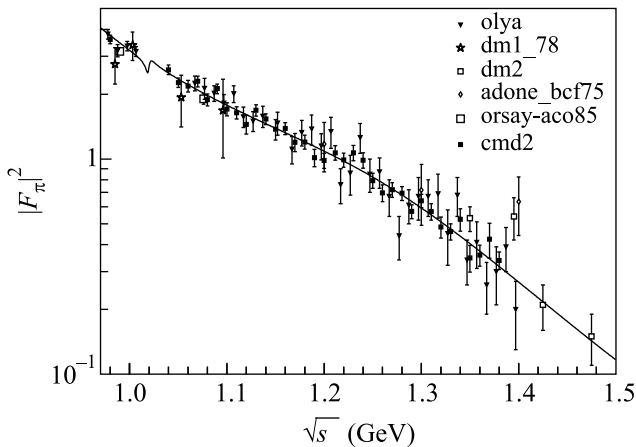


Рис.2. Сравнение экспериментальных данных по формфактору пиона  $|F_\pi|^2$ , полученных в этой работе, с другими экспериментами

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

тора от энергии хорошо описывается в рамках модели векторной доминантности суммой амплитуд  $\rho(770)$ ,  $\rho(1450)$ ,  $\rho(1700)$ ,  $\omega$  и  $\phi$  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  $\rho$  мезона в модели Гунариса–Сакураи [18],  $BW_\omega(s)$ ,  $BW_\phi(s)$  – параметризация  $\omega$ ,  $\phi$  резонансов, которые из-за малой ширины описывались релятивистской формой Брейта–Вигнера;  $\delta_\omega$ ,  $\delta_\phi$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – параметры модели, описывающие относительные вклады  $\rho$ – $\omega$ ,  $\rho$ – $\phi$  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).