

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P2-87-485

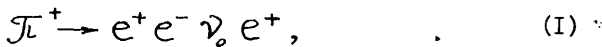
Е.З.Авакян*, С.Л.Авакян*, Г.Ганболд,
М.Динейхан

ЭЛЕКТРОСЛАБЫЕ ФОРМФАКТОРЫ
РАСПАДА $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- \nu_e e^+$

Направлено в журнал "Письма в ЖЭТФ"

*Ташкентский государственный университет

I. В последнее время появились экспериментальные данные о электромагнитных формфакторах псевдоскалярных и векторных мезонов в ЦЕРНе^{/1/} и Серпухове^{/2/}. Особенно интересно исследование далитцевского распада



который позволяет получить информацию как о электромагнитной, так и о слабой структуре пиона. Недавно группой SINDRUM^{/3/} зарегистрировано 79 событий этого распада и проведены детальные исследования, в которых получены значения векторного F_V и двух аксиально-векторных F_A и R формфакторов при нулевых импульсах:

$$\begin{aligned} F_V &= 0,029 \begin{matrix} +0,019 \\ -0,014 \end{matrix} \\ F_A &= 0,018 \begin{matrix} +0,015 \\ -0,012 \end{matrix} \\ R &= 0,063 \begin{matrix} +0,026 \\ -0,016 \end{matrix} \end{aligned} \quad (2)$$

Тем самым определены значения параметров

$$\begin{aligned} \gamma &\equiv F_A/F_V = 0,7 \pm 0,5, \\ \xi &\equiv R/F_V = 2,3 \mp 0,6. \end{aligned} \quad (3)$$

Кроме того, этот эксперимент уточнил знак γ - параметра.

С теоретической точки зрения, распад (I) в наиболее чистом виде дает информацию о слабой структуре пиона, что является хорошей проверкой теоретических моделей, описывающих динамику взаимодействия адронов в области кваркового конфайнмента. Векторные и аксиально-векторные формфакторы являются функциями двух независимых инвариантов K и Q , где K - импульс электрон-позитронной пары, Q - суммарный импульс позитрона и нейтрино, испускающихся из слабой вершины (см. рис. I). Исходя из гипотезы сохранения векторного тока, как показали Вакс и Иоффе^{/4/}, $F_V(k^2, Q^2)$ - формфактор, описывающий вклад векторного тока, можно связать с амплитудой распада

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$. Однако в этом подходе невозможно определить конкретную структуру формфактора $F_V(k^2, Q^2)$, а только устанавливаются

изотопические соотношения, позволяющие определить параметр $\gamma = 0,4$. Импульсная зависимость формфакторов определяется только в рамках модели векторной доминантности^{/5/} (МВД). Аксиально-векторные формфакторы F_A и R рассмотрены в рамках киральной теории^{/6/}, и значение параметра ξ связывается со среднеквадратичным радиусом пиона $\langle r_\pi^2 \rangle$ следующим образом:

$$\xi \equiv \frac{m_\pi}{3} \frac{f_\pi}{F_V} \langle r_\pi^2 \rangle = 2,6, \quad (4)$$

где m_π - масса и f_π - константа связи пионного поля. Кварковые модели^{/7/}, которые основаны на различных физических предположениях, не определяют импульсную зависимость кварковых блоков, а структура векторных и аксиально-векторных формфакторов определяется пропагатором промежуточных векторных мезонов, как в МВД. Эти модели ограничиваются главным образом рассмотрением распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$.

Поэтому нам представляется интересным рассмотреть распад (I) в рамках виртон-кварковой модели^{/8/} (ВКМ), представляющей собой самосогласованную схему квантово-полевого мешка. В этой модели при наличии всего лишь двух параметров, характеризующих кварковое поле, удалось описать^{/8/} широкий круг явлений низкоэнергетической физики адронов.

2. Инвариантный матричный элемент распада (I) в ВКМ определяется диаграммами Фейнмана, которые изображены на рис. I. Диаграммы рис. Iа описывают так называемое внутреннее тормозное излучение. Диаграммы на рис. Iб, в описывают структурно-зависимую часть амплитуды и определяют формфакторы. Амплитуда распада (I), удовлетворяющая условию градиентной и лоренц-инвариантности, записывается в стандартном^{/5/} виде (техника вычислений приведена в^{/8,9/}):

$$M = e^2 \frac{G_F}{\sqrt{2}} \cos \theta_c \frac{f_\pi}{k^2} \ell_\alpha^{em} \left\{ m_e (\bar{\nu}(p)(1+\gamma_5) \left(\frac{2Q_\alpha + k_\alpha}{2Q_\alpha + k^2} - \frac{2P_{1\alpha} + k_\alpha}{2P_{1\alpha} + k^2} \right) \right. \\ \times e^-(p_1) + \frac{1}{m_\pi^2} \left[-i \varepsilon_{\alpha\rho\sigma\tau} k^\rho Q^\sigma F_\nu(k^2, Q^2) + (Q_\alpha k_\rho - g_{\alpha\rho} k Q) \right. \\ \left. \left. \times F_A(k^2, Q^2) + (k_\alpha k_\rho - g_{\alpha\rho} k^2) R(k^2, Q^2) \right] \ell_\rho^{em} \right\}, \quad (5)$$

где q, p, p_1, p_2 и p_3 - четырехмерные импульсы пиона, нейтрино, позитронов и электрона соответственно; $K = p_2 + p_3$; $Q = q - k$;

$$\ell_\alpha^{em} = (\bar{e}^-(p_3) \gamma_\alpha e^-(p_1)); \quad \ell_\rho^{em} = (\bar{\nu}(p) \gamma_\rho (1-\gamma_5) e^-(p_2)),$$

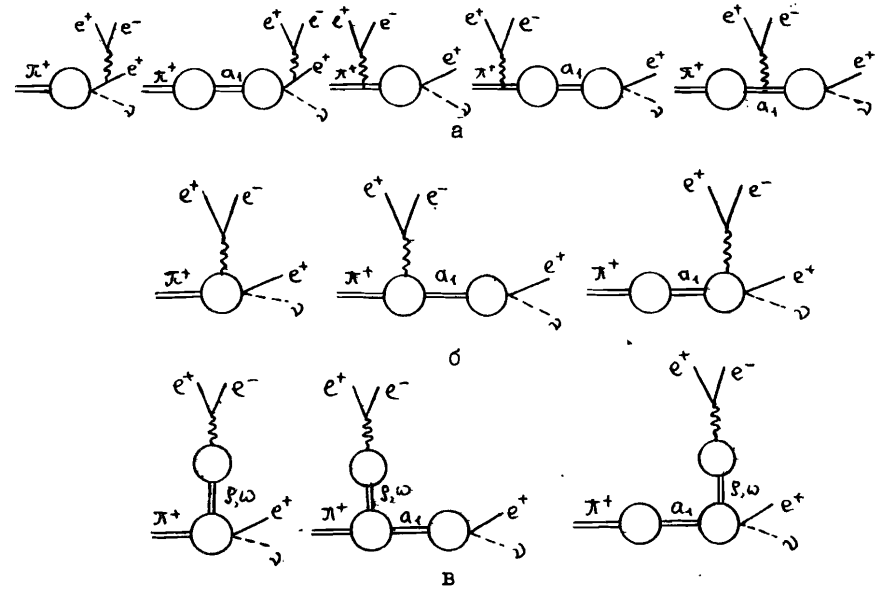


Рис. I

$G_F = 10^{-5}/m_p^2$ - константа Ферми; m_π, m_p и m_e - масса пиона, протона и электрона соответственно; θ_c - угол Кабиббо; константа пиона f_π определяется вкладом диаграмм, изображенных на рис. Iа, и оказалась равной

$$f_\pi = \frac{12 \sqrt{h_p}}{L \pi} \left(1 + \frac{48 h_A}{M_A^2} N_2 \right) N_2 = 138 \text{ МэВ}.$$

Здесь $h_p = 0,054$, $h_A = 0,11$ - константа связи для псевдоскалярных и аксиально-векторных мезонов; $N_1 = \int du u v(u) = 0,88$ и $N_2 = \int du a(u) = 0,62$ - структурные интегралы соответствующих кварковых блоков в ВКМ^{/9/}; $M_A = L m_A / 2$, где $L = 5,48 \text{ ГэВ}^{-1}$ - параметр модели.

Диаграммы рис. Iб, в определяют векторный и аксиальные формфакторы распада (I). ВКМ позволяет определить структуру каждого кваркового блока. В результате расчетов оказалось

$$F_V(k^2, Q^2) = F_V(0,0) \left[1 + \frac{k^2}{m_\pi^2} (0,021 + 0,633 \left(\frac{m_\pi}{m_A} \right)^2 - \right. \\ \left. - 2 \left(\frac{m_\pi}{m_\omega} \right)^2 \right) + \frac{Q^2}{m_\pi^2} (0,021 + 0,633 \left(\frac{m_\pi}{m_A} \right)^2) \right],$$

$$F_A(k^2, Q^2) = F_A(0,0) \left[1 + \frac{k^2}{m_\pi^2} \left(0,0364 + 0,91 \left(\frac{m_\pi}{m_A} \right)^2 - 1,57 \left(\frac{m_\pi}{m_\rho} \right)^2 + 36,64 \frac{m_\pi^2}{m_A^2} \frac{m_\pi^2}{m_\rho^2} \right) + \frac{Q^2}{m_\pi^2} \left(0,0121 + 3,64 \frac{m_\pi^2}{m_A^2} \right) \right], \quad (6)$$

$$R(k^2, Q^2) = R(0,0) \left[1 + \frac{k^2}{m_\pi^2} \left(0,013 - 0,14 \frac{m_\pi^2}{m_\rho^2} + 28,56 \frac{m_\pi^2}{m_\rho^2} \frac{m_\pi^2}{m_A^2} \right) + \frac{Q^2}{m_\pi^2} \left(0,0065 + 0,214 \frac{m_\pi^2}{m_A^2} + 0,29 \frac{m_\pi^2}{m_\rho^2} + 4 \frac{m_\pi^2}{m_A^2} \frac{m_\pi^2}{m_\rho^2} \right) \right].$$

Здесь

$$\begin{aligned} F_V(0,0) &= 0,041, \\ F_A(0,0) &= 0,023, \\ R(0,0) &= 0,087. \end{aligned} \quad (7)$$

В выражениях (6) члены, пропорциональные $m_\pi^2/m_A^2, m_\pi^2/m_\rho^2, \dots$, являются вкладом от диаграммы с промежуточными векторными и аксиально-векторными мезонами. Мы ограничились только членами, линейными по k^2/m_π^2 и Q^2/m_π^2 , так как более высокие степени этих величин оказались несущественными в кинематически разрешенной области распада (I).

3. Рассмотрим наклон формфакторов. Для этого выражение (6) запишем в следующей форме:

$$F(x_V, x_A) = F(0,0) (1 + \lambda_V x_V + \lambda_A x_A), \quad (8)$$

где $x_V = k^2/m_\pi^2$; $x_A = Q^2/m_\pi^2$, а параметры λ_V, λ_A называются наклонами векторных и аксиально-векторных формфакторов соответственно. Полученные результаты приведены в таблице.

Таблица

Параметры наклона Формфакторы	λ_V	λ_A
F_V	-0,04	0,03
F_A	0,01	0,06
R	0,02	0,02

Экспериментальные данные о наклоне векторных и аксиально-векторных формфакторов не получены. В работе /5/ вычислен наклон векторных формфакторов для распада

$$\lambda_V = \lambda_A = -0,03.$$

Из таблицы видно, что полученные значения параметров наклона значительно меньше единицы, поэтому импульсная зависимость векторных и аксиально-векторных формфакторов несущественна.

Векторный $F_V(k^2, Q^2)$ и аксиальный $F_A(k^2, Q^2)$ формфакторы определяют параметр γ . Из (7) получаем

$$\gamma = 0,56. \quad (9)$$

Формулы (2), (7) и (9) показывают, что наш результат полностью согласуется с данными группы SINDRUM в рамках экспериментальных ошибок. Экспериментальная группа SIN/IO, исследуя распад $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$, получила для параметра γ

$$\gamma = 0,522 + 0,059,$$

что хорошо согласуется с (9). Однако экспериментальный результат группы LAMPF /11/ оказался равным

$$\gamma = 0,39 + 0,06$$

и занижен по сравнению с (9). Все эти экспериментальные данные подтверждают то, что знак параметра γ положителен.

Аксиально-векторный формфактор $R(k^2, Q^2)$ определяет параметр ξ . Из (2), учитывая (7), имеем

$$\xi = 2,1. \quad (10)$$

Из выражений (7), (9) и (10) видно, что наши результаты удовлетворительно согласуются с существующими экспериментальными данными.

Авторы выражают благодарность Г.В.Ефимову, М.А.Иванову, В.Е.Любовицкому за обсуждения.

Литература

1. Fischer J. et al. Phys.Lett., 1978, 73B, p.359.
2. Викторов В.А. и др. ЯФ, 1980, 32, с.980; Phys.Lett., 1980, 84B, p.46.
3. Egli S. et al. Phys.Lett., 1986, 175B, p.97.
4. Vaks V.G. and Ioffe B.L. Nuovo Cim., 1958, 10, p.342. Muller V.P. Z.Phys., 1963, 172, p.229; Z.Phys., 1969, 173, p.938.
5. Бардин Д.Ю., Иванов Е.А. ЭЧАЯ, 1976, 7, с.726.
6. Терентьев М.В. УФН, 1974, 112, с.37.
7. Brymon D.A. et al. Phys.Rep., 1982, 28, p.15; Paver N., Scadron M.D. Nuovo Cim., 1983, 78A, p.159.

8. Ефимов Г.В., Иванов М.А. ЭЧАЯ, 1981, 12, с.1220.
 9. Авакян Е.З. и др. Препринт ОИЯИ, P2-86-278, Дубна, 1986.
 10. Bay A. et al. Phys.Lett., 1986, 174B, p.445.
 11. Piilonen L.E. et al. Phys.Rev.Lett., 1986, 57, p.1402.

Авакян Е.З. и др.

P2-87-485

Электрослабые формфакторы распада $\pi^+ \rightarrow e^+e^-\nu_e e^+$

Изучен распад $\pi^+ \rightarrow e^+e^-\nu_e e^+$. Получены импульсная зависимость векторных F_V и аксиально-векторных F_A и R формфакторов. Вычислены значения формфакторов при нулевых импульсах: $F_V = 0,041$, $F_A = 0,023$ и $R = 0,087$. Определены параметры $\gamma = F_A/F_V = 0,56$, $\xi = R/F_V = 2,1$. Полученные данные хорошо согласуются с недавними экспериментальными данными группы SINDRUM.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Avakyan E.Z. et al.

P2-87-485

Electroweak Form Factors of $\pi^+ \rightarrow e^+e^-\nu_e e^+$ Decay

The $\pi^+ \rightarrow e^+e^-\nu_e e^+$ decay is studied. The momentum dependences of vector F_V and axial vector F_A form factors as well as their zero momentum values $F_V = 0.041$, $F_A = 0.023$, $R = 0.087$ are obtained. Parameters $\gamma = F_A/F_V = 0.56$, $\xi = R/F_V = 2.1$ are also calculated. The obtained values are in good agreement with recent data reported by SINDRUM group.

The investigation has been performed at the Laboratory of Theoretical Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987

Рукопись поступила в издательский отдел
29 июня 1987 года.