

О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ НА ВСТРЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПУЧКАХ РЕЗОНАНСОВ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ЗАРЯДОВОЙ ЧЕТНОСТЬЮ

А. И. ВАЙНШТЕЙН, И. Б. ХРИПЛОВИЧ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

(Поступила в редакцию 18 августа 1970 г.)

Обсуждается возможность исследования на встречных электрон-позитронных пучках резонансов с положительной зарядовой четностью, которые могут образовываться через двухфотонное промежуточное состояние. Оценки показывают, что зарядовая асимметрия в угловом распределении для реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ при полной энергии, равной массе f -мезона, может достигать 20%.

В настоящее время интенсивно ведутся эксперименты на встречных электрон-позитронных пучках. В работах [1-3] изучались ρ -, ω - и ϕ -мезоны, т. е. резонансы с квантовыми числами фотона, $J^{PC} = 1^{--}$. Они проявляются как пики в энергетическом ходе реакций рождения π - и K -мезонов. Проведенные эксперименты дают информацию о структуре резонансов и их электромагнитных распадах.

Обсудим возможность исследования аналогичных свойств для резонансов с положительной зарядовой четностью и ненулевым спином¹⁾, например f, f', A_1, A_2 . Впервые эта возможность была отмечена в работе [4]. В отличие от ρ -, ω -, ϕ -пииков, которые наблюдаются в процессах, идущих в однофотонном приближении, наблюдение резонансов в прямом канале, имеющих положительную зарядовую четность, возможно лишь в процессах, которые могут идти через двухфотонные промежуточные состояния (см., например, диаграмму рис. 1 для процесса $e^-e^+ \rightarrow \pi^-\pi^+$). Соответствующие вклады содержат дополнительный фактор $\alpha = 1/137$ по сравнению с амплитудами, отличными от нуля в однофотонном приближении. Поэтому сечения рождения резонансов с положительной зарядовой четностью содержат дополнительную малость α^2 по сравнению с сечениями рождения векторных мезонов ρ, ω, ϕ .

Существенно, однако, что в ряде реакций конечные частицы могут образовываться как через двухфотонные, так и через однофотонные промежуточные состояния и соответствующие вклады в амплитуду могут интерферировать. Интерференционные эффекты пропорциональны первой степени α , и именно такие эффекты мы предлагаем изучать для получения информации о свойствах резонансов с положительной зарядовой четностью.

Рассмотрим подробнее реакцию $e^-(p_1) + e^+(p_2) \rightarrow \pi^-(q_1) + \pi^+(q_2)$ при энергиях вблизи массы f -мезона ($m = 1264 \text{ Мэв}$, $\Gamma = 145 \text{ Мэв}$, $J^{PC} = 2^{++}$). Эта реакция может идти как через f -мезон (рис. 1), так и обычным образом — через однофотонное промежуточное состояние (рис. 2). Матричный

¹⁾ Предлагаемый способ непригоден для изучения свойств скалярных и псевдоскалярных мезонов, так как амплитуды распадов этих частиц в электрон-позитронные пары, как известно, исчезают в пределе нулевой массы электрона m_e в силу γ_5 -инвариантности электромагнитных взаимодействий, т. е. содержат малый фактор m_e/M (M — масса резонанса).

элемент, отвечающий сумме диаграмм рис. 1, 2, имеет вид

$$M = M_0 \left\{ 1 + \frac{\alpha\gamma\kappa}{2\pi m^2 F_\pi(s)} \frac{s}{m^2 - s - im\Gamma} p_1(q_1 - q_2) \right\}, \quad (1)$$

где $M_0 = 4\pi\alpha s^{-1} F_\pi(s) \bar{u}_2(\hat{q}_1 - \hat{q}_2) u_1$ — матричный элемент процесса в однофотонном приближении (рис. 2); $s = (p_1 + p_2)^2$ — инвариантная энергетическая переменная, $F_\pi(s)$ — электромагнитный формфактор π -мезона. Константы γ и κ определяют вершины $f \rightarrow \pi\pi$ и $f \rightarrow e^-e^+$:

$$T_{f \rightarrow \pi\pi} = -\frac{\gamma}{m} t_{\mu\nu}(q_{1\mu}q_{2\nu} + q_{1\nu}q_{2\mu}), \quad (2)$$

$$T_{f \rightarrow e^-e^+} = \alpha^2 \frac{\kappa}{m} t_{\mu\nu} \bar{u}_1 [\gamma_\mu(p_1 - p_2)_\nu + \gamma_\nu(p_1 - p_2)_\mu] u_2, \quad (3)$$

где $t_{\mu\nu}$ — симметричный тензор, описывающий f -мезон, импульс которого $k = q_1 + q_2 = p_1 + p_2$; $k_\mu t_{\mu\nu} = 0$, $t_{\mu\mu} = 0$. Отметим, что для вершины $f \rightarrow e^-e^+$ в общем случае возможны две независимые структуры, однако в

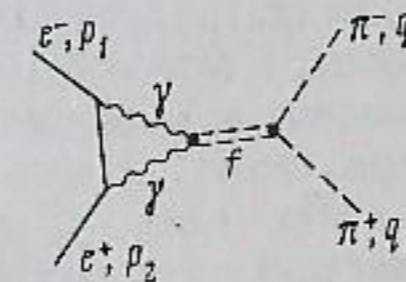


Рис. 1

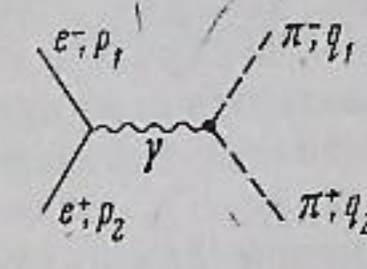


Рис. 2

силу γ_5 -инвариантности (мы всюду пренебрегаем массой электрона) остается лишь одна из них.

Дифференциальное сечение реакции $e^-e^+ \rightarrow \pi^-\pi^+$ представляется в виде

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma_0}{d\Omega} (1 + 2 \text{Re } \delta \cos \theta), \quad (4)$$

где $d\sigma_0/d\Omega$ — сечение процесса в однофотонном приближении, θ — угол между импульсами электрона и π^- -мезона. Величина δ равна

$$\delta = \frac{\alpha\gamma\kappa}{4\pi F_\pi(s)} \left(1 - \frac{4\mu^2}{s}\right)^{1/2} \frac{s}{m^2 s - m^2 + im\Gamma}, \quad (5)$$

где μ — масса π -мезона. В формуле (4) мы пренебрегли квадратичными по δ членами. Выражение для параметра асимметрии $2 \text{Re } \delta$ вблизи резонанса можно записать следующим образом:

$$2 \text{Re } \delta = \frac{160\alpha}{|F_\pi(m^2)|} \frac{|\kappa|}{\gamma} \left(1 - \frac{4\mu^2}{m^2}\right)^{-2} \frac{x \cos \varphi + \sin \varphi}{x^2 + 1}, \quad (6)$$

где $x = (s - m^2) / m\Gamma$, $\varphi = \arg \kappa - \arg F_\pi(m^2) = \varphi_\kappa - \varphi_\pi$;

и мы использовали формулу для ширины f -мезона

$$\Gamma = (\gamma^2 m / 320\pi) (1 - 4\mu^2/m^2)^{1/2}.$$

Если $2 \text{Re } \delta \neq 0$, то будет наблюдаться зарядовая асимметрия в угловом распределении π -мезонов, иными словами, число π^- -мезонов N_- , вылетающих под заданным углом θ , отличается от числа π^+ -мезонов N_+ , вылетающих под этим же углом: $(N_- - N_+) / (N_- + N_+) = 2 \text{Re } \delta \cos \theta$. Необходимость определения зарядов π -мезонов, конечно, усложняет постановку эксперимента. Отметим, что величина $(N_- - N_+) / (N_- + N_+)$ растет с уменьшением угла θ , однако надо иметь в виду, что при малых углах мало

полное число событий. В частности, для неполяризованных лептонов

$$d\sigma_0/d\Omega = (\alpha^2/8s) |F_\pi(s)|^2 (1-4\mu^2/s)^{3/2} \sin^2 \theta.$$

Энергетическая зависимость параметра асимметрии определяется формулой (6). Экспериментальное измерение этой зависимости дает независимый способ определения ширины f -мезона и позволяет найти величины $|\kappa|$ и $\varphi = \varphi_\kappa - \varphi_\pi$. Отметим, что разность β максимального и минимального значений параметра асимметрии не зависит от φ :

$$\beta = 2(\operatorname{Re} \delta)_{\max} - 2(\operatorname{Re} \delta)_{\min} = \frac{160\alpha}{|F_\pi(m^2)|} \frac{|\kappa|}{\gamma} \left(1 - \frac{4\mu^2}{m^2}\right)^{-2}. \quad (7)$$

При довольно естественном предположении $|\kappa|/\gamma \sim 1$ параметр асимметрии принимает значения порядка 1, несмотря на то, что он пропорционален α . Наличие большого численного множителя является, по существу, обычным резонансным эффектом и связано с малостью ширины f -мезона по сравнению с его массой, малостью, обусловленной большим центробежным барьером. Если параметр δ порядка 1, то формулу (4) для дифференциального сечения следует дополнить квадратичным по δ слагаемым $(d\sigma_0/d\Omega) |\delta|^2 \cos^2 \theta$. В случае $\delta \sim 1$ становится, таким образом, возможной постановка эксперимента без определения зарядов π -мезонов.

Модуль κ определяет вероятность чрезвычайно редкого распада f -мезона на лептонную пару, $\Gamma_{f \rightarrow e^+e^-} = m\alpha^4 |\kappa|^2 / 10\pi$. Фаза φ_κ формфактора F_π совпадает с p -волновой фазой π -рассеяния при соответствующей энергии. Предлагаемый эксперимент позволил бы определить эту фазу, если бы была известна величина φ_κ .

Фаза φ_κ , в свою очередь, может быть определена с помощью условия унитарности, если известна вершина $f \rightarrow 2\gamma$. Эту вершину можно представить в виде

$$T_{f \rightarrow 2\gamma} = -\frac{\alpha}{m} t_{\mu\nu} \left\{ \tau f_{\mu\rho}^{(1)} f_{\rho\nu}^{(2)} + \frac{\tau'}{m^2} [(k_1 k_2) f_{\mu\rho}^{(1)} f_{\rho\nu}^{(2)} - f_{\mu\rho}^{(1)} k_{2\rho} k_{1\sigma} f_{\sigma\nu}^{(2)}] + (1 \leftrightarrow 2) \right\}, \quad (8)$$

где k_1 и k_2 — импульсы γ -квантов; $f_{\mu\nu}^{(i)} = k_{i\mu} e_\nu^{(i)} - k_{i\nu} e_\mu^{(i)}$ — тензоры поля ($i = 1, 2$). Тогда из условия унитарности следует

$$|\kappa| \sin \varphi_\kappa = \operatorname{Im} \kappa = \frac{1}{6} \tau. \quad (9)$$

Знание $\operatorname{Im} \kappa$ дает нижнюю границу для разности β максимального и минимального значений параметра асимметрии (см. (7)).

Укажем теперь модель, позволяющую оценить вершину $f \rightarrow 2\gamma$. В этой модели для описания взаимодействия γ -квантов с адронами используем гипотезу векторной доминантности. Вершины же взаимодействия f -мезона с векторными мезонами ρ , ω и ϕ определим из предположения об универсальном взаимодействии f -мезона с тензором энергии-импульса адронов, не содержащих λ -кварки. В этой модели получаем $\tau = 4\pi\gamma (g_\rho^{-2} + g_\omega^{-2})$, $\tau' = 0$. Константы g_ρ , g_ω определяют переходы соответствующих мезонов в γ -квант и известны экспериментально [1-3].

Полученное значение τ приводит к ограничению $|\kappa|/\gamma \geq \tau/6\gamma \approx 0,1$. Используя для формфактора F_π аппроксимацию $F_\pi(s) = m_\rho^2 (m_\rho^2 - s)^{-1}$ (при этом $|F_\pi(m^2)| = 0,59$), получаем $\beta \geq 0,22$.

Зарядовую асимметрию в угловом распределении можно наблюдать также в реакции $e^-e^+ \rightarrow K^-K^+$ в области $f'(1515)$ -пика. Предполагая, что f' -мезон взаимодействует с тензором энергии-импульса частиц, содержащих странные кварки, получаем заметно меньшую оценку для зарядовой асимметрии $\beta' \geq 0,06$.

Литература

- [1] V. L. Auslender, G. I. Budker, Yu. N. Pestov et al. Phys. Lett., 25B, 433, 1967. В. Л. Ауслендер, Г. И. Будкер, Е. В. Пахтусова и др. ЯФ, 9, 114, 1969.
- [2] J. E. Augustin, D. Benaksas, J. C. Bizot et al. Phys. Lett., 28B, 503, 508, 513, 517, 1969.
- [3] V. E. Balakin, G. I. Budker, A. G. Khabakhpashev et al. Proc. Intern. Conf. on Electron and Photon Int. at High Energies, Liverpool, 1969.
- [4] G. Altarelli, S. DeGennaro, E. Celeghini, G. Longhi, R. Gatto. Nuovo Cim., 47A, 113, 1967.

ON POSSIBILITY OF STUDYING RESONANCES WITH POSITIVE CHARGE PARITY IN COLLIDING ELECTRON-POSITRON BEAMS

A. I. VAINSHTEIN, I. B. KHRIPLOVICH

A possibility is discussed of studying in colliding electron-positron experiments the resonances with positive charge parity which may be produced via two-photon intermediate state. The estimates show that the charge asymmetry in the angular distribution for reaction $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ at the total energy equal to the f -meson mass may achieve 20%.