

О РАДИАЦИОННЫХ РАСПАДАХ ЛЕГКИХ МЕЗОНОВ

А.Т. Филиппов

Все данные по радиационным распадам легких мезонов, кроме $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$, согласуются с углом η - η' -смешивания $\theta_P \cong -19^\circ$. Заметно нарушено правило Цвейга и слабо нарушается SU_3^f .

Выявление в спектре и распадах легких псевдоскалярных мезонов нарушений SU_3^f -симметрии и правила непрерывности кварковых линий (НКЛ), иногда называемого правилом Цвейга, важно не только для феноменологии, но и для понимания структуры квантовой хромодинамики на расстояниях порядка радиуса конфайнмента. Недавно была предложена новая феноменология спектра мезонов, которую можно согласовать с представлениями квантовой хромодинамики (см. [1], где можно найти подробное изложение, обозначения и ссылки на более ранние работы). В частности, были получены новые значения углов смешивания октетного и синглетного состояний в η - и η' -мезонах

$$\theta_P = -\theta_P(\eta) = -17,2^\circ, \quad \theta_P' = -\theta_P(\eta') = -20,6^\circ, \quad (1)$$

отличающиеся от общепринятого $\theta_P = \theta_P(\eta) = -\theta_P(\eta') = -10^\circ$. Последний эксперимент по рождению η и η' при высоких энергиях дал результат [2]

$$k = \bar{\sigma}(\pi^- p \rightarrow \eta' n) / \bar{\sigma}(\pi^- p \rightarrow \eta n) = 0,55 \pm 0,06, \quad (p_L = 4 + 200 \text{ ГэВ/с}). \quad (2)$$

Если пренебречь небольшой неортогональностью кварковых волновых функций, соответствующих углам (1), и предположить, что при высоких энергиях НКЛ нарушается лишь в переходах $\eta \rightarrow \eta'$; то $k = \cos^2(\theta_0 - \theta_P) : \sin^2(\theta_0 - \theta_P')$, где $\theta_0 = \arctg 2^{-1/2} = 35,3^\circ$. Для углов (1) имеем $k = 0,50$, в красном согласии с (2). Это значение хорошо согласуется со средним по другим аналогичным экспериментам, выполненным при меньшей энергии и с меньшей статистикой [3], и определенно противоречит значению $\theta_P = -10^\circ$. Если $\theta_P = \theta_P' = -\theta_P$ то из (2) следует: $\theta_P = -18,2 \pm 1,4^\circ$ [2].

В работе [3] отмечалось, что ширины радиационных распадов псевдоскалярных (P) и векторных (V) мезонов ($V \rightarrow P\gamma$, $P \rightarrow V\gamma$) не противоречат значениям углов смешивания (1), однако из-за отсутствия данных о полной ширине $\Gamma_{\eta'}$, соответствующие результаты не были опубликованы. Сейчас появились новые данные о $\Gamma_{\eta'}$ [4], $\Gamma(\rho^- \rightarrow \pi^- \gamma)$, $\Gamma(K_V^- \rightarrow K^- \gamma)$ [5] (см. таблицу), что позволяет найти значение угла смешивания и установить характер и величину нарушений НКЛ и SU_3^f в матричных элементах радиационных распадов. Здесь кратко изложены наиболее интересные результаты такого анализа, подробное изложение будет опубликовано в ЯФ,

№ п.п.	Величина	Эксперим. Г, кэВ	Фит (4)		Фит (5)	
			$\theta_P = -\theta_P^{(1)}, \theta_\phi = 1^\circ$	$\theta_P = \theta_P^{(2)}, \theta_\phi = 5^\circ$		
1	$\Gamma(\rho \rightarrow \pi\gamma)$	$63 \pm 7 [5]$	58	53		
2	$\Gamma(\omega \rightarrow \pi\gamma)$	$889 \pm 62 [10]$	825	629		
3	$\Gamma(\phi \rightarrow \pi\gamma)$	$5,8 \pm 2,1 [10]$	6,0	6,5		
4	$\Gamma(K_V^- \rightarrow K^- \gamma)$	$40 \pm 15 [5]$	33	30		
5	$\Gamma(K_V^0 \rightarrow K^0 \gamma)$	$75 \pm 35 [10]$	130	120		
6	$\Gamma(\rho \rightarrow \eta\gamma)$	$56 \pm 14 [10]$	54	33		
7	$\Gamma(\omega \rightarrow \eta\gamma)$	$3^{+2,5}_{-1,8} [10]$	8,3	2,5		
8	$\Gamma(\phi \rightarrow \eta\gamma)$	$66 \pm 9 [10]$	71	98		
9	$\Gamma(\eta' \rightarrow \rho\gamma)$	$86 \pm 22 [10,4]$	78	77		
10	$\Gamma(\eta' \rightarrow \omega\gamma)$	$6,1 \pm 1,9 [10,4]$	7,2	10		
11	$\Gamma(\eta' \rightarrow \rho\gamma)$	$14,2 \pm 2,8 [10]$	11	7,7		
	$\Gamma(\eta' \rightarrow \omega\gamma)$					
12	$\Gamma(\phi \rightarrow \eta' \gamma)$	—	0,86	0,47		
13	$\Gamma(\pi \rightarrow \gamma\gamma) \cdot 10^3$	$7,95 \pm 0,55 [10]$	$7,3 \pm 0,8$	$6,6 \pm 0,8$		
14	$\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$	$0,323 \pm 0,046 [10]$	$0,72 \pm 0,08$	$0,34 \pm 0,04$		
15	$\Gamma(\eta' \rightarrow \gamma\gamma)$	$5,8 \pm 1,8 [10,4]$	$7,5 \pm 0,9$	$6,5 \pm 0,8$		
16	$\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$	$7,75 \pm 0,30 [10]$	$7,3 \pm 1,2$	$5,6 \pm 0,9$		
	$\Gamma(\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma)$					

Если пренебречь нарушением SU_3^f , то ширины радиационных распадов можно выразить через матричные элементы октетного тока $J_i^{\Lambda} (\mu = -1, \dots, 1, 8)$

$$\langle V_i | J_j | P_k \rangle = g d_{ijk}, \quad \langle V_0 | J_j | P_i \rangle = -(g + \epsilon) d_{0ij}, \quad \langle V_i | J_j | P_0 \rangle = (g + \delta) d_{0ij}, \quad (3)$$

где $d_{0ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \delta_{ij}$; очевидная зависимость от поляризаций и импульсов,

а также нормировочные множители опущены. Точному правилу НКЛ соответствует $\epsilon = \delta = 0$. Данных в таблице достаточно для определения углов смешивания и параметров g, ϵ, δ . Для простоты и наглядности приведем лишь результаты подгонки параметров g, ϵ, δ по минимуму χ^2 при заданных углах смешивания $\theta_P = \theta_P' = \theta_P^{(1)} = -(2(45 - \theta_0))^\circ$, $\theta_P^{(2)} = -(45 - \theta_0)^\circ$, близких соответственно к (1) и к -10° . В стандартных обозначениях (см. [6]): $g = g_{\rho\pi\gamma} = -\frac{1}{2} g_{K_V^0 K^0 \gamma} = g_{K_V^- K^- \gamma}$, $g_{\omega\pi\gamma} \approx 3g + 2\epsilon$, $g_{\phi\pi\gamma} \approx 3gt_\phi + \sqrt{2}\epsilon$. Здесь $t_\phi = \text{tg} \theta_\phi$, $\theta_\phi = (\theta_V - \theta_0)$ — угол смешивания страных и нестранных кварков в ω - и ϕ -мезонах. В обычной феноменологии $\theta_\phi = 5 \pm 1^\circ$ [3], в нашей $\theta_\phi \approx 1^\circ$ [1] (в выражениях для $g_{\omega\pi\gamma}$ и $g_{\phi\pi\gamma}$ учтена малость θ_ϕ и ϵ). Малость $\Gamma(\phi \rightarrow \pi\gamma)$ ($g_{\phi\pi\gamma} \approx$

$= (0,138 \pm 0,025) \text{ ГэВ}^{-1}$) существенно ограничивает величину ϵ ($\epsilon < 0$ для 5° и $\epsilon < 0,1$ для 1°), что вызывает расхождение между $g_{\omega\pi\gamma}$ и $g_{\rho\pi\gamma}$, которое невозможно объяснить нарушением SU_3^f или НКЛ: $g_{\rho\pi\gamma}^{exp} = 0,70 \pm 0,05$; $g_{\omega\pi\gamma}^{exp} = 2,58 \pm 0,09$. В работе [7] был указан механизм, увеличивающий $g_{\omega\pi\gamma}$ за счет малости массы π -мезона: $\omega \rightarrow (\rho^\pm \pi^\mp) \rightarrow (\rho^\pm \pi^\mp) \gamma \rightarrow \pi^0 \gamma$, где в скобки взяты виртуальные частицы. В переходе $\rho \rightarrow \pi\gamma$ подобных диаграмм нет, в распадах $K_V^0 \rightarrow K^0 \gamma$ и $K_V^- \rightarrow K^- \gamma$ аналогичный механизм возможен, но он, вероятно, компенсируется небольшим нарушением SU_3^f . Вычисление с обрезанием на импульсе виртуального π -мезона $|p_\pi| \sim m_\rho$ (в этой области результат слабо зависит от обрезания) показывает, что данный механизм увеличивает $g_{\omega\pi\gamma}$ на $15 \pm 5\%$. С учетом поправки, $g_{\omega\pi\gamma} = 3g_\rho + 2\epsilon = g_{\omega\pi\gamma}^{exp} / (1,15 \pm 0,05)$, это значение и использовано нами при определении параметров. Для их подгонки из таблицы взяты данные 1–11, для $\Gamma_{\eta'}$ принято значение $\Gamma_{\eta'} = 290 \pm 70$ кэВ [4], относительные ширины распадов η' взяты из [10]. Для $\theta_P = \theta_P^0 = \theta_P^{(1)}$, $\theta_\phi = 1^\circ$ получаем

$$3g = 2,015, \quad \epsilon = 0,74, \quad \delta = 0,153. \quad (4)$$

Соответствующие ширины приведены во втором столбце, $\chi^2/8 = 1,34$; без учета $K_V^0 \rightarrow K^0 \gamma$ и $\omega \rightarrow \eta\gamma$: $\chi^2/6 = 0,63$. Таким образом, согласие очень хорошее, но данные по $K_V^0 \rightarrow K^0 \gamma$ и $\omega \rightarrow \eta\gamma$ необходимо уточнить (заметим, что они слабо обеспечены статистически, особенно, $\omega \rightarrow \eta\gamma$). Для $\theta_P = \theta_P^{(2)}$, $\theta_\phi = 5^\circ$ получаем (ширины см. в таблице)

$$3g = 1,922, \quad \epsilon = -0,016, \quad \delta = 0,061. \quad (5)$$

В этом случае $\chi^2/8 \approx 4$, причем плохо согласуются с подгонкой как раз надежные данные ($\omega \rightarrow \pi\gamma$, $\phi \rightarrow \eta\gamma$, $\rho \rightarrow \eta\gamma$, $\eta' \rightarrow \omega\gamma$, $\eta' \rightarrow \omega\gamma/\rho\gamma$). Учет нарушения SU_3^f не позволяет существенно улучшить этот фит. Таким образом, угол $\theta_P = \theta_P^0 = \theta_P^{(2)} \approx -10^\circ$ противоречит не только (2) но и данным по радиационным распадам P и V мезонов.

По найденным параметрам можно предсказать $\Gamma(P \rightarrow \gamma\gamma)$ в модели векторной доминантности (МВД) с использованием SU_3^f . Сравнивая МВД с результатами, полученными для распадов $\pi \rightarrow \gamma\gamma$ и $\eta' \rightarrow \gamma\gamma$ в алгебре токов [8] и в киральной модели [9], можно найти соотношения

$$g/\gamma_\rho = (4\pi^2 F_\pi)^{-1}, \quad F_8/F_1 \approx 1 + \delta/g; \quad F_\pi \approx 0,095 \text{ ГэВ}. \quad (6)$$

Из (4) и (6) следует $\gamma_\rho^2/4\pi = 0,505$, что хорошо согласуется с $\gamma_\rho^2/4\pi = 0,51 \pm 0,06$, соответствующим $\Gamma(\rho \rightarrow e^+e^-)$ из [10]. Последнее использовано для предсказания величин 13–16 в таблице. Ошибки в предсказываемых значениях соответствуют неопределенности γ_ρ , при вычислении отношения 16 положено $g_{\rho\pi\pi} = 2\gamma_\rho$. Хотя $\Gamma_{exp}(\eta' \rightarrow \gamma\gamma)$ согласуется с $\theta_P = \theta_P^0 = \theta_P^{(2)}$, все остальные экспериментальные данные требуют значения $\theta_P = \theta_P^0 = \theta_P^{(1)}$, и необходимо выполнить новые измерения $\Gamma(\eta' \rightarrow \gamma\gamma)$. Заметим, что наше предсказание $\Gamma(\eta' \rightarrow \gamma\gamma) = 0,65 + 0,75$ кэВ близко к среднему двух существующих экспериментов

(см. [10]). Учет нарушения SU_3^f симметрии может несколько уменьшить предсказание для $\Gamma(\eta' \rightarrow \gamma\gamma)$, но не влияет существенно на полученный вывод. На противоречие между (1) и соотношениями SU_3^f симметрии в распадах $P \rightarrow \gamma\gamma$ указано в работе [11], однако, лишь анализ всех данных о радиационных распадах легких мезонов позволяет с достаточной уверенностью найти наиболее вероятный источник этого противоречия — заниженное экспериментальное значение Γ_η [10].

Итак, в матричных элементах электромагнитных распадов с участием легких псевдоскалярных мезонов заметно нарушено правило НКЛ, нет заметного нарушения SU_3^f , и хорошо выполнены соотношения МВД и алгебры токов. Ширины этих распадов согласуются с углами (1) и не согласуются со стандартным углом $\theta_P = -10^\circ$, однако, необходимы новые измерения $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$, а также $\Gamma(\omega \rightarrow \eta\gamma)$, $\Gamma(K^0 \rightarrow K^0\gamma)$. Желательно найти распад $\eta' \rightarrow \phi\gamma$.

За обсуждения и замечания автор благодарен А.Бому, В.М.Будневу, М.К.Волкову, С.Б.Герасимову, А.Б.Говоркову и В.И.Фрибову.

Объединенный институт
ядерных исследований

Поступила в редакцию
17 мая 1980 г.

Литература

- [1] А.Т.Филиппов. ЯФ, 29, 1035, 1979.
- [2] В.Д.Апель и др. ЯФ, 30, 366, 1979.
- [3] S.Okubo. Phys. Rev., D16, 2336, 1977.
- [4] G.S.Abrams e.a. Phys. Rev. Lett., 43, 477, 1979. D.M.Binnie e.a. Phys. Lett., 83B, 141, 1979.
- [5] D.Berg e.a. Univ of Rochester prepr. COO-3065-250, Rochester, 1979.
- [6] Physics Data. Nucl. Phys., B109, 1, 1976.
- [7] А.Т.Филиппов. Proc of the 18-th Intern. Conf. on High Energy Phys. Tbilisi, 1976, vol. 1, p. C129-159; JINR Publ. D1-1040, Дубна, 1977.
- [8] M.S.Chanowitz. Phys. Rev. Lett., 35, 977, 1975.
- [9] М.К.Волков, Д.Зберт. Препринт ОИЯИ Р2-12959, Дубна, 1980.
- [10] Particle Data Group. Phys. Lett., 75B, 1, 1978.
- [11] V.M.Budnev, A.E.Kaloshin. Phys. Lett., 86B, 351, 1979.