

高能 e^+e^- 湮没末态 $\eta'-\eta$ 介子 多重数比率*

刘希明

(山东大学物理系 济南 250100)

1993年8月18日收到

摘 要

本文分析了 $\eta-\eta'$ 混合角和 $L=1$ 介子产生对末态 $\eta-\eta'$ 多重数比率的影响。计算结果表明, $L=1$ 介子的产生对比率影响很重要, 考虑这一因素后就能得到与实验一致的多重数比率。

关键词 多重数比率、混合角、介子。

高能 e^+e^- 湮没的介子产生过程能提供部分子碎裂的重要信息。其中介子多重数比率的研究, 可给出矢量介子与标量介子产生比率, $L=1$ 与 $L=0$ 介子产生比率, 奇异抑制因子等。这些结果又被广泛的用于各种模型中, 作为基本参数, 进一步解释新的实验结果。最近, 在 LEP 的 91GeV Z^0 共振能区的 ALEPH 实验组 [1] 首次测量了赝标介子 η' 与 η 的多重数比率, 给出 $R = \langle \eta' \rangle / \langle \eta \rangle = 0.23 \pm 0.06 \pm 0.05$, 而 LUND 模型的 Jetset 7.3 Monte-Carlo 结果是 0.82, 约为实验测量值的 3 倍多, 模型预言与实验结果存在明显差别, 有必要做进一步的理论分析, 弄清楚影响比率 R 的原因, 对实验结果做出合理解释。

在一定能量下, e^+e^- 湮没后直接产生的各类介子的相对权重是决定其多重数比率的基本因素, 相对权重与介子所含夸克、反夸克的味成份有关, 而 η' 与 η 的相对权重还与其混合角 θ_p 值的大小有关。文献 [2] 认为 LUND 模型的 Jetset 中采用的混合角 θ_p 的值不够合理, 文献 [1] 则希望通过改变 θ_p 的值能给出与实验相一致的结果。而本文在第一节中的计算表明, 即使取 $\theta_p \approx -20^\circ$, 也得不到与实验相符合的比率。事实上, 影响介子末态多重数比率的另一个重要因素是高激发态介子 (主要是 $L=1$ 介子) 的产生及衰变贡献。研究低能强子-强子反应的文献 [3] 曾经指出, 直接产生的 $L=1$ 介子, 都能衰变为 $L=0$ 的介子, 但由于 $L=1$ 介子的相对权重及衰变贡献都不同, 考虑 $L=1$ 介子的产生及衰变贡献后, 会引起末态多重数比率很大的变化。因此可以预料高能 e^+e^- 湮没中 $L=1$ 介子的产生更不能忽略, 且 $L=1$ 介子只对 η 介子有衰变贡献, 因此考虑 $L=1$ 介

* 国家自然科学基金资助。

子的产生后,将会引起比率 R 很大的改变。在第二节中,我们发现考虑 $L_s = 1$ 介子的产生以及对 η 介子的衰变贡献所产生的影响,计算的多重数比率就与实验结果基本一致。

1 η' - η 混合角 θ_p 对比率 R 的影响

在夸克模型中, $SU_3(3)$ 八重态 ($I = 0, Y = 0$) 及单态的波函数表示成

$$|\eta_8\rangle = \sqrt{1/6}|\bar{u}\bar{u} + \bar{d}\bar{d} - 2\bar{s}\bar{s}\rangle, \quad (1)$$

$$|\eta_0\rangle = \sqrt{1/3}|\bar{u}\bar{u} + \bar{d}\bar{d} + \bar{s}\bar{s}\rangle. \quad (2)$$

给出 η, η' 介子的波函数是

$$|\eta\rangle = \cos\theta_p|\eta_8\rangle - \sin\theta_p|\eta_0\rangle, \quad (3)$$

$$|\eta'\rangle = \sin\theta_p|\eta_8\rangle + \cos\theta_p|\eta_0\rangle. \quad (4)$$

式中 θ_p 为 η' 与 η 的混合角。或写成

$$|\eta\rangle = X\sqrt{1/2}|\bar{u}\bar{u} + \bar{d}\bar{d}\rangle + Y|\bar{s}\bar{s}\rangle, \quad (5)$$

$$|\eta'\rangle = X'\sqrt{1/2}|\bar{u}\bar{u} + \bar{d}\bar{d}\rangle + Y'|\bar{s}\bar{s}\rangle, \quad (6)$$

式中 X, Y 以及 X', Y' 与 θ_p 的关系是

$$X = Y' = \sqrt{1/3}\cos\theta_p - \sqrt{2/3}\sin\theta_p, \quad (7)$$

$$Y = -X' = -\sqrt{2/3}\cos\theta_p - \sqrt{1/3}\sin\theta_p, \quad (8)$$

由此得到 η 与 η' 的相对权重分别是

$$p_\eta = X^2 + \lambda^2 Y^2, \quad (9)$$

$$p_{\eta'} = Y'^2 + \lambda^2 X'^2. \quad (10)$$

式中 $\lambda = 0.3$ 是奇异抑制因子。表 1 给出了由(9)、(10)计算的 η 与 η' 的相对权重结果,表明它们是随 θ_p 改变的。实验上测量的 η 介子多重数还应包括 η' 介子的衰变贡献,由 P.D.G 粒子性质表^[4]给出衰变分支比 $Br(\eta' \rightarrow \eta + \pi) = 0.647$ 。这样,计入 η' 的衰变贡献后利用(9)、(10)式求出 η' 与 η 的多重数比率为

$$R = \frac{\langle \eta' \rangle}{\langle \eta \rangle} = \frac{p_{\eta'}}{p_\eta + 0.647 p_{\eta'}}. \quad (11)$$

它与混合角 θ_p 有关。混合角 θ_p 的值,最早由 Gell-Mann-Okubo 介子质量公式给出为 $\theta_p \approx -10^\circ$ 。最近,有的文献[5-8]对这一问题又作了讨论。文献[5]把 $J/\psi \rightarrow \eta(\eta')\gamma$ 及 $\eta' \rightarrow \gamma\gamma$ 辐射衰变的实验资料与理论结果比较得到 $\theta_p \approx -20^\circ$, 文献[6]则认为必须考虑因结构夸克质量差引起的 $SU_3(3)$ 对称破缺,分析张量介子强衰变 $T \rightarrow PP$, 矢量、赝标介子辐射衰变 $V \rightarrow P\gamma, P \rightarrow \gamma\gamma$ 实验结果得到 $\theta_p \approx -14^\circ$ 。把 θ_p 的不同值代入(11)

表 1 θ_p 引起比率 R 的改变

θ_p	0°	-10°	-14°	-20°	R 的实验结果
权重 p_η	0.40	0.55	0.61	0.71	
权重 $p_{\eta'}$	0.70	0.54	0.49	0.36	
比率 R	0.83	0.60	0.52	0.40	$0.23 \pm 0.06 \pm 0.05$

式会求出相应的比率 R , 但由表 1 中的计算结果看出, 即使取 $\theta_p = -20^\circ$ 时也不能解释实验测量的结果.

2 $L=1$ 介子的产生对比率 R 的影响

高能 e^+e^- 湮没反应中, 介子产生占绝对优势, 而共振介子的产生有特殊意义, 不同于主要来自衰变贡献的轻介子, 共振介子的产生更直接反映部分子的碎裂特征. 因此研究 $L=1$ 介子产生很重要, 文献[3]对强子反应中的 $L=1$ 介子产生规律做了系统研究. 事实上, 高能 e^+e^- 湮没后直接产生的介子中, 也有一定的几率是 $L=1$ 的介子 ($J^{PC} = 2^{++}, 1^{++}, 0^{++}, 1^{+-}$), 而且实验^[9,10]观测到的多重数表明产生几率比较大. 而其中如 $a_2(1320)$ 、 $f_2'(1525)$ ($J^{PC} = 2^{++}$), $f_1(1285)$ ($J^{PC} = 1^{++}$) 介子都能衰变为 η 介子, 但 η' 介子则仅仅是直接产生的. 因此理论分析时, 应考虑 $L=1$ 介子的产生及其对 η 介子的衰变贡献. 这里有两个问题需要首先弄清楚: 一是 J^{PC} 不同的介子多重态之相对权重, 二是 $L=1$ 与 $L=0$ 介子的产生比例.

通常假定 L 相同 J^{PC} 不同的介子多重态之间的相对权重由自旋统计给出, 即夸克味道成份相同的介子其相对权重是 $(2J+1)$. 对于 $L=1$ 的介子, 由于实验测量比较困难, 仅有的实验结果^[10,11]也带有很大的误差, 还不能给出直接检验, 本文在计算时仍然取相对权重为 $(2J+1)$. $L=0$ 的赝标介子与矢量介子比 $\alpha = P/V$, 在许多文献中作了讨论. 如 $\sqrt{s} = 30\text{GeV}$ 附近的 e^+e^- 湮没实验^[12]给出的 $\alpha = 1/3(M_V/M_P)^{0.5 \pm 0.1}$, 与介子的质量有关, 称为“质量效应”. 我们在文献^[16]中曾指出, 只要计入 $L=1$ 介子的产生及对 $L=0$ 介子的衰变贡献, 取自旋统计给出的 $\alpha = 1/3$ 时得到的末态多重数比率与实验结果基本一致, “质量效应”的原因是没有考虑 $L=1$ 介子的产生. 这与最近 91GeV 的 DELPHI 实验^[17]给出的 $V/(V+P) = 0.70 \pm 0.18$ (自旋统计结果为 0.75) 并不矛盾. 在下面计算 91GeV 质心能量的 η' 与 η 的多重数比率 R 时, 我们同文献^[3]、^[16]相同取 $\alpha = 1/3$.

设直接产生的 $L=1$ 与 $L=0$ 介子之相对权重分别为 β 与 $(1-\beta)$, 但是 β 的值理论上还没有任何预言, 只能由实验测量结果间接确定. 已有很多实验^[10-14]提供了许多有用信息, 如 91GeV 质心能量的 e^+e^- 湮没实验^[10]给出末态截面比 $\sigma(f_2(1270))/\sigma(\rho^0) = 0.22 \pm 0.08$, 但这并不是直接产生的介子比率 $\beta/(1-\beta)$. 因为 $L=1$ 的介子中如 $a_2(1320)$ 、 $K_2^*(1430)$ 都能衰变为 ρ^0 介子, 它们与 $f_2(1270)$ 介子都属于 $J^{PC} = 2^{++}$ 多重态, 除奇异抑制引起的差别外, 相对权重为 $5\beta/12$, ρ^0 介子的相对权重是 $(1-\beta)/(1+\alpha)$, 考虑到上述各种因素, 由粒子性质表^[4]给出衰变分支比, 利用文献^[10]的实验结果, 最后求出 $\beta = 0.44 \pm 0.16$. 这样, 得到各介子多重态中夸克成份相同的介子的相对权重是

$$0^{-+}:1^{-+}:0^{++}:1^{++}:2^{++} =$$

$$\alpha(1-\beta)/(1+\alpha):(1-\beta)/(1+\alpha):\beta/12:3\beta/12:3\beta/12:5\beta/12 \quad (12)$$

介子 $a_2(1320)$, $f_1(1285)$ 等衰变为 η 介子的分支比都可由粒子性质表^[4]给出, 按照 (12) 式的相对权重, 就能够计算 η' 与 η 的多重数比率 R , 因为由实验结果计算的 β 值带有相对误差, 计算 R 时也允许带有相应的误差. 由表 2 中给出的计算结果可以看出, 仅

表 2 $L=1$ 介子产对比率 R 的影响

θ_p	0°	-10°	-14°	-20°
计算结果	0.38 ± 0.14	0.28 ± 0.10	0.24 ± 0.09	0.20 ± 0.07
实验结果	$0.23 \pm 0.06 \pm 0.05$			

考虑 $L=1$ 介子的产生及衰变贡献,就能得到在误差范围内与实验相一致的结果。

3 结果与讨论

通过以上分析可知, $\eta'-\eta$ 混合角 θ_p 的降低及 $L=1$ 介子的产生与衰变贡献都能够引起 η'/η 多重数比率的变化,计算前者的影响比较简单,而计算后者的影响目前还需要依靠实验确定有关的参数,但以上分析至少明确说明了仅有前者的影响,即使 θ_p 降低到 -20° 也得不到与实验相一致的比率。而仅考虑 $L=1$ 介子的产生与衰变贡献后,利用现有实验资料确定出有关的参数,就使比率降低近一半多,在误差范围内与实验结果一致。因此 $L=1$ 介子产生是影响比率 R 不能忽略的因素。随着实验资料的丰富与精度的提高,会进一步确定有关的参数,这一影响的程度也会进一步明确。正是因为 LUND 的 Jetset Monte-Carlo 程序^[10]中没有计及 $L=1$ ($J^{PC}=2^{++}$) 介子的产生,所以得到的比率 $R=0.82$ 远远大于实验结果,这个预言与本文不考虑 $L=1$ 介子产生时的计算结果(见表 1)完全相同。另外,文献[3]仅考虑了 $L=1$ 介子的产生,同样解释了强子反应中的 $\eta'-\eta$ 比率“反常”现象,这与本文的结果一致。

作者感谢去病、陈鄂生教授等对本文的多次有益讨论。

参 考 文 献

- [1] ALEPH Collab., D. Buskulic, et al., *Phys. Lett.*, **B292**(1992)210.
- [2] M. Bowler, *Phys. Lett.* **B180**(1986)299.
- [3] Xie Qu-bing, *Chin. J. Phys. Ener. Forst. Phys. Nucl.*, **4**(1980)466.
- [4] Particle Data Group, K. Hikasa, et al., Review of particle properties, *Phys. Rev.*, **D45**(1992).
- [5] J. Frederick Gilman and Russel Kauffman, *Phys. Rev.*, **D36**(1987)2761.
- [6] A. Bramon and M.D. Scadron, *Phys. Lett.*, **B234**(1990)346.
- [7] TPC/2-Gamma Collab., H. Aihara et al, *Phys. Rev. Lett.* **64**(1990)172.
- [8] CRSYTAL BARREL Collab., C.Amsler et al., *Phys. Lett.*, **B294**(1992)451.
- [9] HRS Collab., S. Abachi et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986)1990.
- [10] DELPAHI Collab., P. Abreu et al., *Phys. Lett.* **B298**(1993)236.
- [11] NA22(LEBC-CHS) Collab., N.M. Aguilar-Bebitez et al., *Z. Phys.*, **C50**(1991)405.
- [12] MIRABELLE Collab., I.V. Ajinenko et al., *Z. Phys.*, **C24**(1984)103.
- [13] MIRABELLE Collab., P.V. Chiapnikov et al., *Nucl. Phys.*, **B176**(1980)303; *Z. Phys.*, **C12**(1982) 113.
- [14] NA22-EHS Collab., N.M. Agababyan et al., *Z. Phys.*, **C41**(1989)539.
- [15] JADE Collab. W. Bartel et al., *Phys. Lett.*, **B145**(1984)441; HHS Collab., M. Derrick et al., *Phys. Lett.*, **B158**(1985)519; TPC Collab., H. Aihara et al., *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984)2378; CELLO Collab., H.-J. Behrend et al., *Z. Phys.*, **C46**(1990)397.
- [16] Xie Qu-bing and Liu Xi-ming, *Phys. Rev.*, **D38**(1988)2169.
- [17] DELPHI Collab., P. Abreu et al., *Phys. Lett.*, **B275**(1992)231.

The Final State Multiplicity Rates of η and η' IN e^+e^- Annihilation at High Energy

Liu Ximing

(*Department of Physics, Shandong University, Ji'nan 250100*)

Received on August, 1993

Abstract

We analyse the effects induced by η - η' mixing angle and the production of $L = 1$ mesons on the multiplicity rates of η and η' mesons. The results show that the influence of the production of $L = 1$ mesons on the multiplicity rates is quite important. When we take only this factors into account, the calculated multiplicity rates are agreement with experiment.

Key words multiplicity rates. mixing angle, meson.