

## $e^+e^-$ 湮没中的碎裂机制\*

刘希明

(山东大学物理系, 济南)

### 摘 要

本文对  $e^+e^-$  湮没过程中的两类不同碎裂机制做了比较。进一步计算出末态强子多重数与实验结果比较, 发现“独立碎裂”假定与实验矛盾, 而“弦碎裂”假定符合较好。

### 一、引 言

十多年来对  $e^+e^-$  湮没过程中强子事例的详细研究表明, 所有实验结果都支持这样一种简单的物理图象:  $e^+e^-$  湮没后按夸克电荷平方比例产生一对夸克和反夸克 ( $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ ), 这对最初产生的  $q\bar{q}$  最终又碎裂成各种观察到的强子。虽然人们对这一过程的具体细节还未完全了解, 但一般认为其硬过程能够用量子色动力学 QCD 计算。然而, 部分子碎裂成强子的强子化过程是目前还没有解决的非微扰问题。最近几年, 许多碎裂模型迅速发展起来, 并得以不断改进和逐渐完善。所有这些碎裂模型, 所用的 QCD 计算方法不同, 一般可分成两类, 一类按照二级  $\alpha_s$  近似的 QCD 矩阵元产生部分子, 另一类则按 QCD 领头对数近似进行部分子簇射。另一方面, 各种碎裂模型从夸克产生、组合成强子的发展过程, 也可把这些模型分成二类, 一类是产生、组合明显可分的二阶段模型, 如 Webber 的 QCD 集团模型<sup>[3]</sup>、CALTECHII 模型<sup>[4]</sup>、以及山东模型<sup>[5]</sup>都属于这一类, 另一类则为随夸克对产生的同时就组合成强子的重复级联, 如 F. F. 模型<sup>[1]</sup>、Lund 弦模型<sup>[2]</sup>等。对于部分子碎裂成强子, 目前人们主要用独立碎裂 (IF)、弦碎裂 (SF)、及集团碎裂 (CF) 三种不同的机制进行研究。独立碎裂<sup>[1]</sup>假定夸克、胶子相互独立地碎裂成强子 jet; 弦碎裂<sup>[2]</sup>则认为联系部分子之间的色弦断裂产生夸克对, 形成强子; 在集团碎裂模型中<sup>[3]</sup>, 簇射末态部分子形成色中性集团, 集团相互独立地二体衰变成末态强子。

这些模型能够较好的解释强相互作用长程行为, 能对大部分实验结果给出较合理的解释。实验结果是对模型基本假定的直接检验, 也促进了模型的发展。最近 MARK II 实验组<sup>[6]</sup>丰富的资料对各种模型做了检验, 并把弦模型的部分子簇射或强子化机制引入其它模型中, 与实验比较, 可独立地检验模型的部分假定。这是一种有用的方法。本文也用这种方法对独立碎裂与弦碎裂两种不同机制作一比较。第二节首先给出两种机制某些预言结果的差别。第三节与一强子化模型结合, 计算出末态强子多重数, 与实验比较。结果

\* 国家自然科学基金资助的课题  
本文 1989 年 4 月 28 日收到。

表明,独立碎裂假定与实验结果偏离较大,而弦碎裂假定基本与实验一致。

## 二、碎裂机制的直接检验

$e^+e^-$  湮没中部分子相互独立碎裂与相互有关联的“弦碎裂”是两种差别很大的机制。其预言的末态事例特性必定存在差别,这种差别能够反映在与实验结果的比较上。这里不准备讨论模型细节,仅对碎裂机制的基本假定作一比较。

$e^+e^- \rightarrow 2\text{jet}$  事例中前后 jet 内粒子多重数关联一般写成为  $\langle n_F \rangle = a + bn_B$ , 它给出了前半球(向前的 jet)平均带电粒子多重数  $\langle n_F \rangle$  与后半球多重数  $n_B$  的联系。如果形成前、后 jet 的夸克是相互独立地碎裂成强子,显然这种关联不存在或很微弱,即  $b \approx 0$ 。最近的实验<sup>[7]</sup>在不同快度区上做了测量,都给出  $b \approx 0$  的结果。TASSO 实验组<sup>[8]</sup>给出  $\langle n_F \rangle$  随  $n_B$  缓慢的上升,若扣除重粒子(含 c 或 b 夸克)的衰变贡献,则前后 jet 没有关联。有趣的是 HRS 实验组<sup>[7]</sup>给出的末态 2jet 事例、以及与之对应的单 jet 内多重数分布都可以用泊松分布很好地拟合; 离散度  $D_2 = (\langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2)^{1/2}$ , 2jet 是单 jet 的  $\sqrt{2}$  倍;  $n = n_F + n_B$  确定时,前后 jet 中的多重数满足二项式分布。这些结果都支持无关联 2jet 独立产生强子的简单图象。

最近几年,对  $e^+e^- \rightarrow 3\text{jet}$  事例做了大量研究,实验上的重要发现之一是“弦效应”,即胶子 jet 与夸克 jet 之间,以及胶子 jet 与反夸克 jet 之间强子的能流分布  $dE/Nd\theta$ , 角分布  $dN/Nd\theta$  等明显高于夸克 jet 与反夸克 jet 之间强子的分布。这也是 3jet 事例区别于 2jet 事例的主要特点之一。这种现象反映了胶子与夸克碎裂的差别。只要假定  $g$  与  $q$  以及  $g$  与  $\bar{q}$  构成两个系统,各自独立地在其质心系按照“弦碎裂”产生强子,在  $e^+e^-$  总质心系(也即实验室系)必然存在“弦效应”。如图 1,  $\theta$  表示夸克、胶子动量方向之夹角。先讨论  $g$  与  $q$  构成的系统,为讨论方便,设碎裂产生的夸克模动量为零,则产生的强子之动量是  $\mathbf{p}' = (0, p'_\parallel, 0)$ 。经罗伦兹变换到  $e^+e^-$  总质心系有

$$p_\parallel = p'_\parallel, \quad p_\perp = \gamma\beta(p'^2 + m^2)^{1/2},$$

式中  $\beta = \cos(\theta_2/2)/c$ ,  $\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{1/2}$ , 进一步求出  $p_\perp$  与  $p_\parallel$  满足的关系是

$$\frac{p_\perp^2}{\beta^2\gamma^2 m^2} - \frac{p_\parallel^2}{m^2} = 1, \quad (1)$$

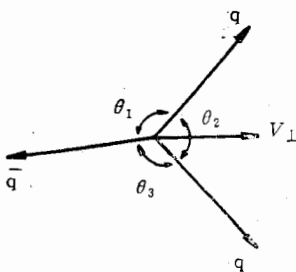


图 1

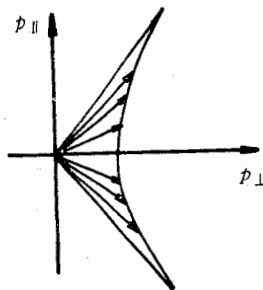


图 2

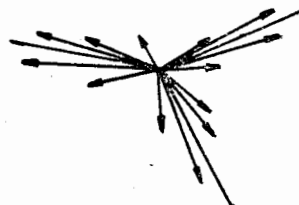


图 3

表明产生强子的动量位于实验室系中一双曲线上,如图 2. 其渐近线  $p_{\parallel} = \pm p_{\perp}/\beta\gamma$  分别是胶子与夸克的动量方向. 同样讨论  $g$  与  $\bar{q}$  组成的系统, 产生强子的动量位于另一条以胶子、反夸克动量方向为渐近线的双曲线上. 当考虑了新产生的夸克具有很小的横切量, 所有产生的强子会有少量处于  $q, \bar{q}$  之间, 而大多数位于  $g$  与  $q$  或  $g$  与  $\bar{q}$  之间, 这就是“弦效应”. 然而认为夸克、胶子是独立碎裂成三个强子 jet, jet 轴分别是其动量方向, 如图 3, 则显然没有“弦效应”.

大量的实验资料, 如事例形状、单粒子谱、关联、能量行为等, 都与各种模型的预言做了比较, 其中“弦效应”比较清楚地排斥独立碎裂假定. 其它实验还不能完全排除这一假定. 因此, 进一步检验这一假定是否正确仍很必要.

### 三、碎裂机制与末态强子多重数

末态强子多重数是研究相互作用机制最简单的方法之一, 也是对模型的基本检验. 对两种不同的碎裂机制比较清楚地检验, 最好避开各自的强子化假定, 仅从其基本假定出发. 为此我们用[5]的强子化方法计算末态强子多重数. 考虑较复杂的  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$  3jet 事例, 用  $E_i (i = 1, 2, 3)$  表示夸克、反夸克与胶子的能量, 分数能量是

$$\chi_i = 2E_i/\sqrt{S},$$

能量守恒给出

$$\chi_1 + \chi_2 + \chi_3 = 2,$$

如果忽略夸克(胶子)的质量(对高能  $e^+e^-$  湮没过程是很好的近似), 由图 1, 按动量守恒求出  $\chi$  与  $\theta$  的关系是

$$\chi_i = \frac{2 \sin \theta_i}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin \theta_3}. \quad (2)$$

与之对应的能量  $E_i$  就是独立碎裂假定下部分子  $i$  的能量. 对于弦碎裂假定, 通过坐标变换, 求出  $qg$  与  $\bar{q}g$  系统的质心能量分别是<sup>[9]</sup>

$$E_i = \sqrt{S} \frac{(2 \sin \theta_3 \sin \theta_i)^{1/2} \sin(\theta_i/2)}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin \theta_3}, \quad (i = 1, 2). \quad (3)$$

有了能量, 就可利用[5]的方法计算出平均夸克对数及末态强子多重数. 对于独立碎裂假定, 设夸克、胶子都按相同的方式碎裂成强子, 由(2)给出能量, 按[5]中方法求出每个部分子碎裂成强子的多重数, 其和就是总的多重数. 对于弦碎裂假定, 设  $gq, g\bar{q}$  系统与  $e^+e^-$  2jet 事例一样碎裂成末态强子, 由(3)求出两个系统的能量, 分别计算出各自的多重数, 其和就是 3jet 事例总的多重数. 表 1 给出两种方法计算的完全对称(图 1 中三个夹角相等) 3jet 事例平均带电粒子多重数, 与唯一的实验结果<sup>[12]</sup>相比较.

对于  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$  2jet 事例, 计算末态强子多重数比较简单. 对于独立碎裂假定, 夸克与反夸克各带总能量的一半, 同样设夸克与反夸克碎裂方式相同, 只要求出夸克或反夸克碎裂的多重数(即利用[5]中的方法, 计算出一半总能量对应的多重数), 其二倍就是 2jet 事例总的多重数. 对于弦碎裂假定,  $q, \bar{q}$  系统的能量就是  $e^+e^-$  湮没的总能量, 由[5]中的公式计算出总能量对应的多重数, 即弦碎裂假定下 2jet 事例的多重数. 虽然两

种计算方法所输入的能量之间有二倍关系,但[5]中末态强子多重数与能量的关系是非线性的,因此两种方法求出的多重数之间没有简单的比例关系。表2给出两种碎裂假定下计算的末态强子多重数与实验结果的比较。

表1  $\sqrt{S} = 29\text{GeV}$  时,3jet事例平均带电粒子多重数与实验<sup>[12]</sup>的比较

实验结果	本文计算结果		Lund 模型预言
	独立碎裂	弦碎裂	
$16.3 \pm 0.3 \pm 0.7$	21.88	16.86	16.7

表2  $\sqrt{S} = 29\text{GeV}$  时,2jet事例平均强子多重数与实验结果<sup>[10]</sup>的比较

粒子	实验结果	本文计算结果		模型预言 <sup>[11]</sup>		
		独立碎裂	弦碎裂	Lund	Webber	Caltech II
$\pi^\pm$	$10.7 \pm 0.6$	14.91	10.67	10.5	11.3	10.3
$\pi^0$	$5.3 \pm 0.7$	6.4	4.2	6.1	6.5	5.7
$K^\pm$	$1.35 \pm 0.13$	1.83	1.40	1.48	1.24	1.35
$K^0, \bar{K}^0$	$1.22 \pm 0.18$	1.17	0.76	1.40	1.21	1.38
$\eta$	$0.58 \pm 0.10$	0.39	0.25	0.73	0.72	0.31
$\rho^0$	$0.95 \pm 0.09$	1.45	0.94	0.91	0.66	0.37
$K^{*\pm}$	$0.62 \pm 0.085$	0.81	0.53	0.76	0.48	0.39
$K^{*0}$	$0.49 \pm 0.11$	0.81	0.53	0.71	0.48	0.36
$\phi$	$0.086 \pm 0.013$	0.120	0.079	0.12	0.07	0.09
$p$	$0.60 \pm 0.08$	1.04	0.77	0.64	0.45	0.71
$\lambda$	$0.220 \pm 0.027$	0.46	0.34	0.22	0.23	0.24
$\Xi$	$0.020 \pm 0.012$	0.050	0.037	0.028	0.069	0.041

由表1,2可以看出,独立碎裂假定下的结果与实验偏离很大,3jet事例中的平均带电粒子多重数比实验偏离更大。而弦碎裂假定下计算的结果都与实验基本一致。从表2中的结果还可以看出,在弦碎裂假定下,本文按照[5]中强子化公式计算的结果,以及Lund弦碎裂模型所预言的结果,都与实验符合较好。表明弦碎裂假定本身与现有实验不矛盾。然而,在独立碎裂假定下,按相同的强子化公式计算的末态强子多重数都比实验偏高。同时这一假定也不能给出已被大量实验所观察到的“弦效应”。这些都表明独立碎裂假定很不完善。但是,要完全排除 $e^+e^-$ 湮没中部分子相互独立碎裂的假定,还需要更多的实验证据与理论分析。

### 参 考 文 献

- [1] R. D. Field and P. R. Feynman, *Nucl. Phys.*, B136(1978), 1;  
P. Hoyer et al., *Nucl. Phys.*, B161(1979), 349;  
A. Ali and F. Barreiro, *Nucl. Phys.*, B236(1984), 269.
- [2] B. Andersson et al., *Phys. Rep.*, 97(1983) 33.
- [3] B. R. Webber, *Nucl. Phys.*, B238(1984), 492.
- [4] T. D. Gottschalk and D. Morris, *Nucl. Phys.*, B228(1987), 492.
- [5] Xie Qu-bing and Liu Xi-ming, *Phys. Rev.*, D37(1988), 2169.
- [6] MARK II Collab., A. Peterson et al., *Phys. Rev.*, D37(1988), 1.

- [ 7 ] HRS Collab., M. Derrick et al., *Phys. Rev.*, D34(1986), 3304;  
HRS Collab., M. Derrick et al., *Z. Phys.*, C35(1987), 323.
- [ 8 ] TASSO Collab., M. Althoff et al., *Z. Phys.*, C29(1984), 347.
- [ 9 ] Liu Xi-ming, *Chinese Phys. Lett.*, 6(1989), 193.
- [10] TPC Collab., H. Aihara et al., *Phys. Rev. Lett.*, 52(1984), 577;  
HRS Collab., S. Abachi et al., *Phys. Lett.*, 199B(1987), 151;  
TPC Collab., H. Aihara et al., *Z. Phys.*, C27(1985), 187;  
HRS Collab., M. Derrick et al., *Phys. Rev. Lett.*, 54(1985), 2568;  
TPC Collab., H. Aihara et al., *Phys. Rev. Lett.*, 53(1984), 2378;  
HRS Collab., P. Baringer et al., *Phys. Lett.*, 158B(1985), 519;  
D. H. Saxon, Proc. Intern. Europhysics Conf. on high energy physics (Bari, 1985), p. 859.
- [11] Tobjorn Stostrand, *International Journal of Modern Physics*, A3(1988), 751.
- [12] HRS Collab., M. Derrick et al., *Phys. Lett.*, 165B(1985), 449.

## THE FRAGMENTATION SCHEMES IN $e^+e^-$ ANNIHILATION

LIU XIMING

(Department of Physics, Shandong University, Jinan)

### ABSTRACT

The comparison of two fragmentation schemes used in the analysis of  $e^+e^-$  annihilation are presented in this paper. It is found that the independent fragmentation assumption is strongly disfavored by the data of the final particle multiplicities, and the string fragmentation assumption agrees with experiments.