

e^+e^- 湮没中不同味道夸克喷注带电 粒子多重数差别*

刘希明

(山东大学物理系 济南 250100)

1993年5月4日收到

摘 要

利用“夸克产生律”与“夸克组合律”计算了 e^+e^- 湮没中重夸克喷注事例的带电粒子多重数, 结果与实验符合。并与轻夸克喷注事例及平均夸克味道喷注事例的多重数做了比较。

关键词 夸克喷注, 多重数, 湮没。

1 引 言

量子色动力学 (QCD) 把夸克与胶子(统称为部分子)作为研究对象。然而, 大量高能实验观察到的仅仅是由夸克或胶子碎裂成的强子喷注, 因此对强子喷注的研究能够得到部分子碎裂特征的有用信息, 对 QCD 的预言作出检验。高能 $e^+e^- \rightarrow h's$ 过程提供了大量部分子碎裂成喷注的实验资料, e^+e^- 湮没后通过电弱作用产生一对初始夸克 $q_i\bar{q}_i$, 其产生几率由电弱统一理论 QED 与量子色动力学 (QCD) 胶子辐射修正进行计算^[1]。 $q_i\bar{q}_i$ 通过色真空激发产生许多新夸克对 $q_j\bar{q}_j$ 的几率则由“隧道效应”^[2]决定为 $p_u:p_d:p_s = 1:1:\lambda$ ($\lambda = 0.3$ 是奇异抑制因子)。这样, 初始夸克是 u, d, s 时, 其味道与真空激发夸克的一样, 实验上观测到的则是它们的平均碎裂结果, 统称轻夸克喷注。但是重夸克喷注对研究重夸克的碎裂特性有其特有的优点: 实验上利用重夸克的半轻子衰变, 挑选喷注中大横动量轻子, 可鉴别出重夸克碎裂的强子喷注; 与轻夸克不同, 由于重夸克质量大, 直到 LEP 能区胶子劈裂成重夸克的几率仍可以忽略不计, 所以观测到的重夸克喷注都是最初产生的重夸克碎裂结果。在 30GeV 附近的 PETRA 及 PEP 上, 以及新一代 e^+e^- 湮没实验, 如 TRISTAN、SLC 及 LEP 上的研究提供了重夸克的产生及强子化等重要信息, 将对微扰 QCD 的预言做出检验。其中一个重要问题是在微扰 QCD 框架下重夸克演化成强子的强子化机制。由于最初产生的重夸克带有很大的动量, 含有这些夸克的强子(称为领头粒子)处于强子喷注的领头地位, QCD 理论预言, 喷注中非领头粒子的产生由真空中色荷的破裂所支配, 它们的产生与初始夸克的味无关。这一预言的直接检验方法

* 国家自然科学基金资助。

是把重夸克喷注中非领头粒子多重数与相同能量下 e^+e^- 湮没的平均多重数相比较^[3]。

e^+e^- 湮没后初始夸克 $q_i\bar{q}_i$ 演化为强子的复杂过程, 只能用唯象的强子化模型来描述。而末态带电粒子多重数则是描述这一过程的基本物理量。在以下几节利用“夸克产生律”与“夸克组合律”计算了重夸克喷注事例的带电粒子多重数, 与轻夸克喷注及平均夸克喷注事例的比较, 反映了它们之间的差别。得到的结果符合 QCD 夸克之间强相互作用与其味道无关的结论。

2 非领头粒子的有效能量

重夸克喷注中的领头强子主要特征之一是带有很高的能量 E 或分数能量 $Z = 2E/\sqrt{s}$ 。在 $10\sim 90\text{GeV}$ 质心能量范围的实验研究表明 $\langle Z \rangle$ 随能量 \sqrt{s} 变化(见图1与图2所示)。但 40GeV 以下的实验发现其平均分数动量 $\langle X \rangle$ 与能量无关^[4], 如果在 LEP 能区仍然成立, 用 $\langle X \rangle$ 表示 $\langle Z \rangle$, 得到关系

$$\langle Z_i \rangle = [(1 - \langle X_i \rangle^2) \left(\frac{2m_i}{\sqrt{s}} \right)^2 + \langle X_i \rangle^2]^{1/2}, \quad (1)$$

这里 m_i 表示重粒子的平均质量 ($i = c, b$)。按式(1)在图1与图2中分别画出了 $\langle Z_c \rangle$ 、 $\langle Z_b \rangle$ 随能量的变化曲线, 与实验结果[5]、[6]基本符合。其中 m_i 的值及 $\langle X_c \rangle = 0.58$ 与文献[7]相同, 而 $\langle X_b \rangle = 0.70$ 稍有变化, 可见(1)式对现有能区成立。

非领头粒子携带的平均能量(称为有效能量) $\langle Q \rangle$ 则可表示成

$$\langle Q \rangle = (1 - \langle Z \rangle) \sqrt{s}, \quad (2)$$

再利用关系式(1), 求出几个质心能量下 c, b 夸克喷注中非领头粒子的有效能量 $\langle Q_c \rangle$ 与 $\langle Q_b \rangle$ (见表1)。

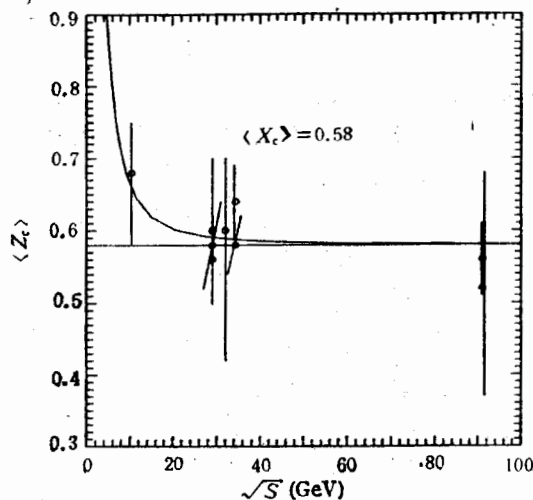
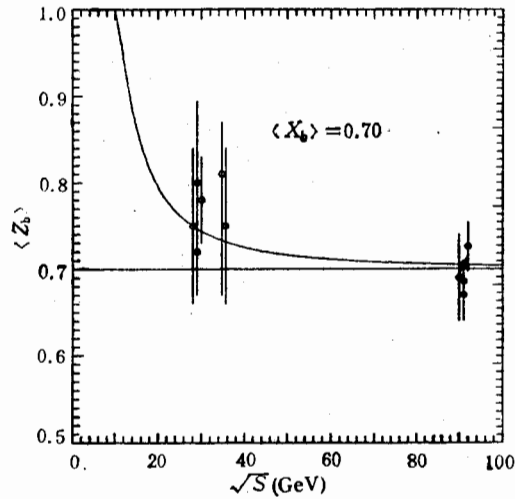


图1 $\langle Z_c \rangle$ 随质心能量 \sqrt{s} 的变化

图 2 $\langle Z_b \rangle$ 随质心能量 \sqrt{s} 的变化

3 重夸克喷注中带电粒子多重数

研究 $e^+e^- \rightarrow h's$ 的强子化模型, 如 LUND 的弦碎裂 (SF) 模型、Webber 的集团碎裂模型 (CF) 等, 都首先给出强子化前 $q_i\bar{q}_i$ 通过部分子簇射产生的各种部分子的数目、分布及味道成份, 这一微扰 QCD 演化过程的截断依靠引入的截断参数 Q_0 。 “夸克产生律”^[7] 直接由能量守恒出发不需引入截断参数, 对于有效作用能量为 $\langle Q_i \rangle$ 的 $q_i\bar{q}_i$ 系统, 通过真空激发产生的平均夸克对数是

$$\langle N_i \rangle = (\alpha^2 + \beta \langle Q_i \rangle)^{1/2} - \alpha \quad (3)$$

上面式中 $\alpha = \beta m - 1/4$, $m = 0.36\text{GeV}$ 是新生夸克平均质量, 唯一的参数 β 在文献[7]中由理论与实验比较定出为 $\beta = 3.6(\text{GeV})^{-1}$ 。把(2)式的有效能量代入(3)式, 就可求出 c、b 夸克事例中真空激发新产生的平均夸克对数 $\langle N_c \rangle$ 与 $\langle N_b \rangle$ 。在表 1 中给出了几个能量下的计算结果。

表 1 有效能量及平均夸克对数

能量 GeV	29	35	42	58	91	100	200
$\langle Q_c \rangle$	11.81	14.44	17.42	24.20	38.12	41.91	83.95
$\langle N_c \rangle$	5.16	6.28	6.98	8.39	10.76	11.32	16.41
$\langle Q_b \rangle$	7.35	9.37	11.65	16.70	26.86	29.60	59.79
$\langle N_b \rangle$	4.24	4.89	5.55	6.82	8.88	9.37	13.71

e^+e^- 湮没后所有产生的各种味道的夸克、反夸克, 最终都要转化为能观测到的强子。各种强子化模型对这一过程的处理都不相同。 “夸克组合律”^[7] 由夸克随机组合的方法给

表2 $\langle n \rangle_c$ 及 $\langle n \rangle_b$ 与实验测量值的比较

实验组	能量 (GeV)	$\langle n \rangle_c$		$\langle n \rangle_b$		$\langle n \rangle_l$ 计算结果
		实验结果	计算结果	实验结果	计算结果	
DELCO[11]	29.0		12.85	14.3±1.2	16.63	11.81
MARK2[12]	29.0	13.2±1.0		16.1±1.1		
TPC[13]	29.0	13.5±0.9		16.7±1.0		
TASSO[14]	35.0	15.0±1.2	13.66	16.0±1.5	17.34	13.08
TASSO[15]	42.1		14.52	17.0±2.0	18.77	14.35
TOPAZ[16]	57.9		16.23	16.24±1.06	19.51	16.94
MARK2[3]	90.9		19.13	23.1±1.9	22.84	21.40
本文预言	100		19.81		23.43	22.47
本文预言	200		26.03		28.73	32.05

出了 N 对夸克、反夸克 $q\bar{q}$ 组合的重子数 $B(N)$ 与介子数 $M(N)$ ，它们与 N 有近似线性关系^[8]。夸克对数的分布，通常取 Poisson 型，一定 $\langle N \rangle$ 下的平均介子数 $\langle M \rangle$ 、平均重子数 $\langle B \rangle$ 分别是

$$\langle M \rangle = \sum_{N=0}^{\infty} M(N)P(\langle N \rangle, N),$$

$$\langle B \rangle = \sum_{N=0}^{\infty} B(N)P(\langle N \rangle, N). \quad (4)$$

联合以上各式可以计算重夸克喷注中非领头介子、重子及反重子多重数，其中共振态粒子都要按确定的分支比衰变成长寿命粒子 ($\langle p^\pm \rangle$ 、 $\langle K^\pm \rangle$ 、 $\langle \pi^\pm \rangle$)。衰变分支比都能由 P.D.G^[9] 资料求出。重夸克喷注中领头粒子对末态带电粒子的衰变贡献由其特定的衰变道，已在 29GeV 能量的 PEP 实验上^[10]测出，分别是 $\langle n \rangle_c = 5.1 \pm 0.3$ ， $\langle n \rangle_b = 11.0 \pm 0.3$ 。重夸克喷注事例的平均带电粒子多重数 $\langle n \rangle$ 则是非领头粒子 $\langle p^\pm \rangle$ 、 $\langle K^\pm \rangle$ 、 $\langle \pi^\pm \rangle$ 与领头粒子衰变贡献 $\langle n \rangle'$ 之和。表 2 给出计算的结果与实验测量值的比较，并给出了更高能量时的预言。

4 不同夸克喷注中带电粒子多重数比较

QCD 的一个基本预言是夸克之间的强相互作用与其味道无关。 e^+e^- 湮没后产生的不同味道的初始夸克反夸克 $q_i\bar{q}_i$ 之间，通过强相互作用进一步激发的夸克数目，只由它们的有效能量 Q_i 决定。对于轻夸克事例，其有效能量就是湮没的质心能量，远远大于重夸克事例的有效能量 $\langle Q \rangle$ (表 1)。因此不同夸克味道事例激发的新生夸克对数 $\langle N \rangle$ 会有很大差别，引起末态强子多重数的差别。表 2 给出计算的轻夸克事例平均带电粒子多重数 $\langle n \rangle_l$ ，与 $\langle n \rangle_c$ 及 $\langle n \rangle_b$ 相比差别很大。由于重夸克喷注中领头粒子衰变的多重数不随能量 \sqrt{s} 变化，随能量的提高，轻夸克事例的多重数将依次超过 Charm 夸克(大于 40GeV 后)、Bottom 夸克(大于 100GeV 后)事例的多重数。在图 3 中给出它们随能量

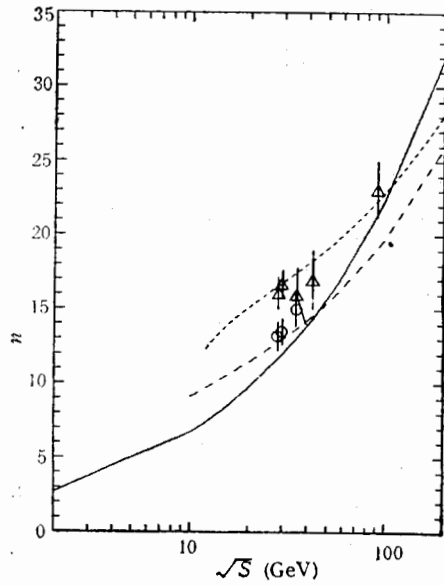


图 3 不同夸克喷注事例多重数 $\langle n \rangle_i$ 比较
— n_{uds} , --- n_c , n_b .

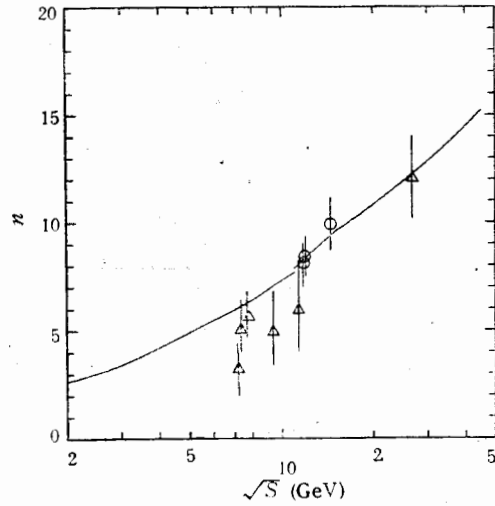


图 4 $\langle n^{NL} \rangle_i$ 与 $\langle n \rangle$ 的比较
 Δ n_b^{NL} , \circ n_c^{NL} .

的变化关系(并画出了实验结果相比较),可以看出这一有趣现象.

进一步把重夸克事例的多重数与 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow h's$ 的平均多重数 $\langle n \rangle$ 比较, $\langle n \rangle$ 是对轻夸克 jet、c-jet、b-jet 的加权平均,权重是初始夸克的产生几率 p_i , 即

$$\langle n \rangle = \frac{1}{R} [p_1 \langle n \rangle_1 + p_c \theta(\sqrt{S} - 2m_c) \langle n \rangle_c + p_b \theta(\sqrt{S} - 2m_b) \langle n \rangle_b], \quad (5)$$

式中归一化常数是

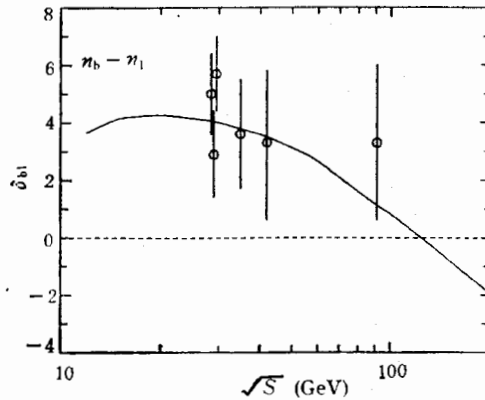
$$R = p_1 + p_c \theta(\sqrt{S} - 2m_c) + p_b \theta(\sqrt{S} - 2m_b), \quad (6)$$

初始夸克的产生几率由弱电统一理论计算. 如在 29GeV 能量时 $p_1 = 0.55$, $p_c = 0.36$, $p_b = 0.09$, 仍如夸克电荷平方成比例. 但高能区弱作用的影响已经不能忽略, 文献^[1]给出了计算结果, 如 LEP 能区是 $p_1 = 0.61$, $p_c = 0.17$, $p_b = 0.22$, 这与实验测量结果一致. 表 3 是计算几个能量下平均多重数与实验的比较, 其中实验结果是同一能量下不同实验组的平均值^[17].

在图 4 中画出了平均夸克事例的多重数 $\langle n \rangle$ 随能量 \sqrt{S} 的变化曲线, 把重夸克事例中计算的有效能量 $\langle Q_i \rangle$ 作为横坐标, 非领头粒子多重数 $\langle n^{NL} \rangle_i$ 作为纵坐标一同画出,

表 3 平均带电粒子多重数 $\langle n \rangle$ 与实验结果的比较

能量(GeV)	29	35	42.1	91
计算结果	12.48	13.52	14.65	21.14
实验结果	12.41 ± 0.21	13.59 ± 0.30	14.85 ± 0.40	20.94 ± 0.20

图5 δ_{b1} 随能量的变化关系

两条曲线基本重合(图中没再画出)。这与实验[12]、[13]与[3]的结果一致,也与 QCD 夸克之间强相互作用与其味道无关的结论一致。图中也画出文献[3]中给出的 $\langle n^{NL} \rangle_i$ 实验值,理论曲线与其符合。

5 讨论与小结

文献[17]认为相同能量的重夸克事例与轻夸克事例多重数之差 $\delta_{Q1} = \langle n \rangle_Q - \langle n \rangle_l$ 是与能量无关的常数。由于目前实验上没有测量 $\langle n \rangle_l$, 而 $\langle n \rangle_Q$ 的测量也不完全, 文献[17]由基本关系

$$\delta_{Q1} = [p_l \langle n \rangle_Q + p_b \langle n \rangle_b + p_c \langle n \rangle_c - \langle n \rangle] / p_l, \quad (7)$$

利用实验提供的数据计算 δ_{Q1} 时, 引入了 $\langle n \rangle_b > \langle n \rangle_c > \langle n \rangle_l$ 的假定。现在把我们计算的 δ_{b1} 与文献[17]分析实验得到的结果相比较(见图5曲线), 二者不矛盾, 但我们计算的 δ_{b1} 是随能量降低的, 且 δ_{Q1} 在能量很高时会变成负值, 这一现象有待实验的进一步检验。

总之, 本文计算了重夸克事例的平均粒子多重数, 计算结果与实验相符合。并且发现, 随能量的提高, 不同夸克喷注事例中的多重数有关系: $\langle n \rangle_l > \langle n \rangle_c$, 进而 $\langle n \rangle_l > \langle n \rangle_b$ 。而不会保持低能时的 $\langle n \rangle_b > \langle n \rangle_c > \langle n \rangle_l$ 的关系不变; $\langle n^{NL} \rangle_i$ 与 $\langle n \rangle$ 随能量的变化关系基本相同。

作者感谢与谢去病、陈鄂生教授的讨论。

参 考 文 献

- [1] Chen Esheng et al., *Chin. J. Phys. Ener. Forst. Phys. Nucl.*, **15**(1991)981; D. Bardin et al., *program ZEITTE 4.0 Nuc. Phys.*, **B231**(1991)1; *Z. Phys.*, **C44**(1989) 493; *Phys. Lett.*, **B255**(1991) 290.
- [2] Casher A., Neuberger H and Nussio S., *Phys. Rev.*, **D20**(1979) 179.
- [3] MARK II Collab., B.A. Schumm et al., *Phys. Rev.*, **D46**(1992)453.
- [4] Avery P. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983)1139.

- [5] CLEO Collab., C. Bebek et al., *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982)610; MARK 2 Collab., J.M. Yerrilton et al., *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982)430; HRS Collab. M.Derrick et al., *Phys. Lett.*, **B146**(1984) 261; S. Ahlen et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 1147; DELCO Collab., T. Pal et al., *Phys. Rev.*, **D33**(1986) 2708; JADE Collab., W. Bartel et al., *Phys. Lett.*, **B146**(1984)121; TASSO Collab., M. Althoff et al., *Phys. Lett.*, **B126**(1983)493; OPAL Collab., M.Z. Akrawy et al., *Phys. Lett.*, **B263**(1991)311; G. alexander et al., *Phys. Lett.*, **B262**(1991)341; ALEPH Collab., D.Decomp et al., *Phys. Lett.*, **B244**(1990) 551; *Phys. Lett.*, **B266**(1991)218.
- [6] MARK 2 Collab., M.E. Nelson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983)1542; MAC Collab., E. Fernandez et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983) 2054; MARK J Collab., B. Adeva et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983)443; DELCO Collab., D.E. Koop et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984) 1970; TASSO Collab., M. Althoff et al., *Z. Phys.*, **C22**(1984)219; TPC Collab., H. Aihara et al., *Phys. Rev.*, **D31**(1985)2719; DELCO Collab., T. Pal et al., *Phys. Rev.*, **D33**(1986)2708; OPAL Collab., M.Z. Akrawy et al., *Phys. Lett.*, **B263**(1991)311; L3 Collab., B. Adeva et al., *Phys. Lett.*, **B241**(1990) 416; ALEPH Collab., D.Decomp et al., *Phys. Lett.*, **B244**(1990)551; L3 Collab., B.Adeva et al., *Phys. Lett.*, **B261**(1991)171; DELPHI Collab., P. Abreu et al., *Phys. Lett.*, **B276**(1992)536.
- [7] Xie Qubing and Liu Ximing, *Phys. Rev.*, **D38**(1987)2169; Xie Qu bing and Liu Ximing, *Chin. J. Phys. Ener. Fort. Phys. Nucl.*, **11**(1987)832; Xie Qubing et al., *Chin. J. Phys. Ener. Fort. Phys. Nucl.*, **8**(1984)642.
- [8] Xie Qubing and Liu Ximing, *Chin. J. Phys. Ener. Fort. Phys. Nucl.*, **11**(1987)192.
- [9] Particle Data Group, K. Hikasa et al., Review of Particle Properties, *Phys. Rev.*, **D45**(1992).
- [10] CLEO Collab., R.Giles et al., *Phys. Rev.*, **D30**(1984)2279; MARK II Collab., R.H. Schindler et al., *Phys. Rev.*, **D24**(1981)78.
- [11] DELCO Collab., M. Sakuda et al., *Phys. Lett.*, **B152**(1985) 399.
- [12] MARK II Collab., P.C. Rowson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985) 2580.
- [13] TPC Collab., H. Aihara et al., *Phys. Lett.*, **B184**(1987) 299.
- [14] TASSO Collab., W. Braunschweig et al., *Z. Phys.*, **C42**(1989)17.
- [15] TASSO Collab., M.Althoff et al., *Phys. Lett.*, **B135**(1984) 243.
- [16] TOPAZ Collab., K. Nagai et al., *Phys. Lett.*, **B278**(1992)506.
- [17] Brue et al., *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992)3025.

Difference of Particle Multiplicities Between Quark Jets of Different Flavors in e^+e^- Annihilation

Liu Ximing

(Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100)

Received on May 4, 1993

Abstract

The changed particle multiplicity of heavy quark jet events in e^+e^- annihilation is calculated by the quark production rule and quark combination rule. The results agree well with experiments. The comparison of the charged particle multiplicities with the light quark jet and average quark jet is presented.

Key words quark jet, particle multiplicities, annihilation.