

## 快报

# 高能 $e^+e^- \rightarrow$ 两喷注时的夸克产生律<sup>1)</sup>

谢去病 刘希明  
(山东大学)

### 摘 要

本文利用  $e^+e^- \rightarrow$  重夸克 jets 中, 可分辨电磁激发与强作用产生的夸克的优点, 对后者的产生规律作了研究, 发现它产生的夸克对数满足一种简单普适规律, 由此算出的  $\langle n \rangle$ 、 $\langle n_i \rangle$  多重数分布、前后关联等等都和实验符合、本文介绍了与  $\langle n \rangle$  的比较。

### 一、引 言

通过  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow q_i \bar{q}_i \rightarrow$  两 jet, 可研究电磁激发的  $q_0, \bar{q}_0$ , 在色分离时按什么规律产生了 jet 中的其余夸克与强子。为此, 需把不同味道  $q_0, \bar{q}_0$  引起的 jet 分别研究, 先弄清每类 jet 中  $q_0, \bar{q}_0$  最终带走了多少能量, 余下多少能量 ( $Q$ ) 真正用于 QCD 真空激发, 并产生了多少对夸克等。但  $q_0, \bar{q}_0$  为轻夸克 ( $u, d, s$ ) 时, 实验无法分辨含  $q_0, \bar{q}_0$  的强子及 jet 中其余强子, 而近来 PETRA 和 PEP 得到的重粒子 ( $D, D^*, F, B \dots$ ) 产生截面及其碎裂函数却表明, 这些 jet 中的重夸克  $c, b$ , 基本来自电磁激发, 其能量分布也与 jet 中其它强子明显不同, 平均带走很大能量。我们在第二节中直接从这些信息出发, 给出  $c, b$  jet 中有效能  $Q$  与总能  $\sqrt{s}$  的关系。第三节分析轻夸克 jet。第四节把我们过去研究强子-强子反应得到的夸克产生律<sup>[1]</sup>, 推广到  $e^+e^-$  反应, 给出对各种夸克 jet 普适的夸克产生律。第五节用它计算  $\langle n \rangle$ , 并与现有实验及其它模型作了比较。

### 二、重夸克 jet 的 $Q$ 值

由于  $e^+e^- \rightarrow$  两重夸克 jet 中, 含  $c$  或  $b$  的重粒子, 实验可从其特有衰变链辨别, 测其能量  $E_{hi}$ , 因此用于 QCD 真空激发的有效能

$$Q = \sqrt{s} - 2\langle E_{hi} \rangle = \sqrt{s}(1 - \langle Z_i \rangle) \quad (1)$$

式中

$$Z_i \equiv \frac{E_{hi}}{\sqrt{s}/2} = \frac{E_{hi}}{E_{beam}} \quad (2)$$

1) 国家自然科学基金资助的课题。  
本文 1987 年 3 月 26 日收到。

图 1、2 中收集了各实验组在不同  $\sqrt{S}$  测得的  $\langle Z_c \rangle$ 、 $\langle Z_b \rangle$  数据, 由图 1 看出,  $\langle Z_i \rangle$  随  $\sqrt{S}$  变化. 但 Avery 等发现<sup>[2]</sup>, 改取分数动量

$$X_c = \frac{P_{hc}}{P_{\max}} = \sqrt{\frac{E_{hc}^2 - M_{hc}^2}{E_{beam}^2 - M_{hc}^2}} \quad (3)$$

为变量,  $c$  粒子的碎裂函数在已有实验能区:

$$5.2 \text{ GeV} \leq \sqrt{S} \leq 41.4 \text{ GeV},$$

都不随  $\sqrt{S}$  变化, 即  $\langle X_c \rangle$  与  $\sqrt{S}$  无关.  $\langle X_i \rangle$  与  $\langle Z_i \rangle$  的关系为:

$$\langle Z_i \rangle = \frac{2M_{hi}}{\sqrt{S}} \sqrt{\frac{\langle X_i \rangle^2}{\left(\frac{2M_{hi}}{\sqrt{S}}\right)^2} + (1 - \langle X_i \rangle)^2} \quad (4)$$

图 1 中  $\langle Z_i \rangle$  的理论曲线是取  $\langle X_c \rangle = 0.58$  算出的, 它的确与  $\langle Z_c \rangle$  实验<sup>[3]</sup> 都拟合很好. 图 2 中曲线给出  $\langle X_b \rangle = 0.75$  时  $\langle Z_b \rangle$  随  $\sqrt{S}$  的变化, 及与现有实验<sup>[4]</sup> 的比较.

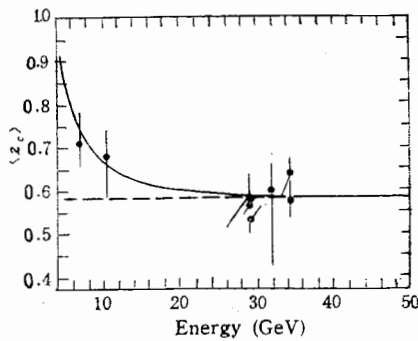


图 1

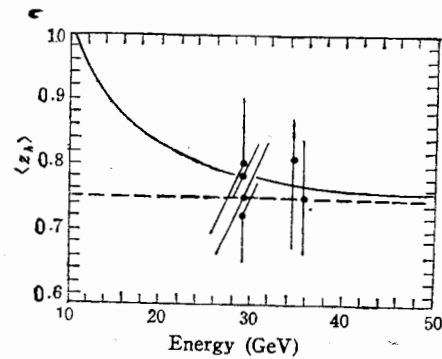


图 2

由于  $\langle X_i \rangle$  与  $\sqrt{S}$  无关, 把 (1) 中  $Q$  与  $\sqrt{S}$  的关系, 用  $\langle X_i \rangle$  表示出来:

$$Q = \sqrt{S} \left[ 1 - \frac{2M_{hi}}{\sqrt{S}} \sqrt{\frac{\langle X_i \rangle^2}{\left(\frac{2M_{hi}}{\sqrt{S}}\right)^2} + (1 - \langle X_i \rangle)^2} \right] \quad (5)$$

由此得到各种重夸克 jet 的  $Q$

1.  $c$ -jet; 因  $M_{hi} = M_{D^*} \approx M_D \approx M_F \approx M_{Ac} \approx 2 \text{ GeV}$ ,  $\langle X_c \rangle = 0.58$

$$Q = \sqrt{S} \left( 1 - 4 \sqrt{0.021 + \frac{0.664}{S}} \right) \quad (6)$$

2.  $b$ -jet; 这时  $M_{hi} = M_B = 5.27 \text{ GeV}$ , 取  $\langle X_D \rangle \approx 0.75$ , 得

$$Q = \sqrt{S} \left( 1 - 10.54 \sqrt{0.005 + \frac{0.438}{S}} \right). \quad (7)$$

### 三、轻夸克 jet

$\sqrt{S} > 1 \text{ GeV}$  以后,  $e^+e^-$  湮灭就可产生轻夸克 jet. 但这时电磁作用产生的  $q_0, \bar{q}_0$ ,

与后来强作用产生的  $N-1$  对  $q, \bar{q}$  质量没多大差别, 不能象上面重夸克 jet 那样, 把含  $q_0$  或  $\bar{q}_0$  的  $h_i$  及所带能量  $E_{h_i}$  区分出来. 也很难把  $u, d, s$  三种轻夸克 jet 区分开. 所以我们统称轻夸克 jet, 作一种情况处理.

#### 四、强作用下的夸克产生律

$e^+e^- \rightarrow \text{jets}$  的各种 QCD 模型<sup>[5]</sup>, 首先都要给出强子化开始前产生的  $q\bar{q}$  数量与分布. 但这一夸克衍生过程, 也是强作用的软化过程, 微扰 QCD 越来越不适用, 尤其是强子化前这许多  $q, \bar{q}$  之间有复杂的相互作用, 它既不同于远离质壳时的短程作用, 也不同于已束缚在强子内的情况, 理论上还一无所知. 但正是这种作用最终决定强子化前夸克对的数量和分布. 所以, 我们宁肯从更一般的考虑, 去处理这问题.

QCD 一个基本性质是夸克间的强作用与其味道无关. 因此由  $q_0$  与  $\bar{q}_0$  间色力进一步产生的  $q\bar{q}$  数目  $N'$ , 与  $q_0\bar{q}_0$  味道无关, 只由它提供的能量  $Q$  决定.  $q\bar{q}$  中各种味道  $i$  的几率  $P_i$ , 则由“隧道效应”决定<sup>[6]</sup>:

$$P_i \propto e^{-x^2 m_i^2} \quad (8)$$

$m_i$  是结构夸克质量, 因  $m_b, m_c \gg m_s > m_u = m_d$ ,  $P_b, P_c$  可忽略. 因此, 强作用产生的  $N'$  对  $q\bar{q}$  的平均质量

$$m \equiv \frac{\sum_i P_i m_i}{\sum_i P_i} = \frac{2m_u + \lambda m_s}{2 + \lambda} \quad (9)$$

与  $Q$  无关. 式中  $\lambda \equiv \frac{P_s}{P_u}$ , 为熟知的奇异夸克抑制因子.

这  $2N'$  个  $q, \bar{q}$  之间, 在强子化前存在色相互作用, 我们唯一的假定是这时的相互作用是非饱和的, 并以  $V$  表示其平均势能, 立即由能量守恒得出  $N'$  和  $Q$  的关系:

$$Q = 2N'm + N'(2N' - 1)V \quad (10)$$

(10) 式应对单个事例成立. 但对不同事例  $N'$  应服从一定分布, 对之求平均后, 得  $\langle N' \rangle$  与  $Q$  的关系为

$$Q = 2\langle N' \rangle m + \langle N' \rangle (2\langle N' \rangle - 1) \langle V \rangle \quad (11)$$

改写为

$$\langle N' \rangle = (\alpha^2 + \beta Q)^{\frac{1}{2}} - \alpha \quad (12)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \beta &\equiv \frac{1}{2\langle V \rangle} (\text{GeV})^{-1} \\ \alpha &\equiv \beta m - \frac{1}{4} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

把由强子谱得到的  $m_u = m_d = 0.34 \text{ GeV}$ ;  $m_s = 0.5 \text{ GeV}$  及实验得到的  $\lambda = 0.3$ <sup>[7]</sup> 代入, 即得  $m = 0.36 \text{ GeV}$ . 只剩下一个与能量无关的待定参数  $\langle V \rangle$ , 我们由下面计算的平均带电多重数  $\langle n \rangle$  与  $e^+e^-$  实验值比较, 得  $\langle \bar{V} \rangle = 0.10 \text{ GeV}$ . 因此 (12)(13) 式中

$$\beta = 5.0(\text{GeV})^{-1}; \alpha = 1.55 \quad (14)$$

代入 (12) 式, 即可算出前两节轻夸克 jet,  $c$ -jet,  $b$ -jet 的  $\langle N'_1 \rangle$ 、 $\langle N'_2 \rangle$ 、 $\langle N'_3 \rangle$ .

### 1. 轻夸克 jet 总的平均夸克对数 $\langle N_1 \rangle$

如第三节所述, 这时第一对  $q_0\bar{q}_0$  和以后产生的  $\langle N'_1 \rangle = \langle N_1 \rangle - 1$  对  $q\bar{q}$ , 都是轻夸克, 可一起讨论, 并直接得

$$\sqrt{S} = 2m_0 + 2(\langle N_1 \rangle - 1)m + \langle N_1 \rangle(2\langle N_1 \rangle - 1)\langle V \rangle$$

即

$$\langle N_1 \rangle = \{\alpha^2 + \beta[\sqrt{S} - 2(m_0 - m)]\}^{\frac{1}{2}} - \alpha \quad (15)$$

$m_0$  是  $q_0, \bar{q}_0$  的平均质量, 因这里  $u:d:s = 4:1:1$ ,  $m_0 = (5m_u + m_s)/6$ , 其中  $m_u, m_s$  与 (9) 中取值相同, 因此  $(m_0 - m) \approx 0$ , (14) 式则简化为

$$\langle N_1 \rangle = (\alpha^2 + \beta\sqrt{S})^{\frac{1}{2}} - \alpha \quad (16)$$

### 2. $c$ -jet 中产生的平均轻夸克对数 $\langle N'_2 \rangle$

将 (6) 式的  $Q$  值代入 (12) 式, 即得

$$\langle N'_2 \rangle = \left[ \alpha^2 + \beta\sqrt{S} \left( 1 - 4\sqrt{0.021 + \frac{0.664}{S}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \alpha \quad (17)$$

### 3. $b$ -jet 中产生的平均轻夸克对数 $\langle N'_3 \rangle$

将 (7) 式的  $Q$  值代入 (12) 式, 即得

$$\langle N'_3 \rangle = \left[ \alpha^2 + \beta\sqrt{S} \left( 1 - 10.54\sqrt{0.005 + \frac{0.438}{S}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \alpha \quad (18)$$

## 五、带电粒子平均多重数 $\langle n \rangle$

$\langle n \rangle$  不仅有各  $\sqrt{S}$  下对不同夸克 jet 的平均数据, 最近还测量了正好与上面  $\langle N_1 \rangle$ 、 $\langle N'_2 \rangle$ 、 $\langle N'_3 \rangle$  对应的  $\langle n \rangle_{u,d,s}$ 、 $\langle n \rangle_c$ 、 $\langle n \rangle_b$ , 能较直接检验本文的夸克产生律, 用 (16)–(18) 式及我们在文献 [8] 中由  $\langle N \rangle$  计算  $\langle n \rangle$  的方法, 即可算出各  $\sqrt{S}$  时轻夸克 jet 的  $\langle n \rangle_{u,d,s}$ , 及  $c$ 、 $b$  jet 中不包括重粒子衰变贡献的  $\langle n \rangle_c$ 、 $\langle n \rangle_b$ . 表 1 给出  $\sqrt{S} = 29 \text{ GeV}$  时理论与实验值 [9] 的比较, 完全符合.

表 1

	$\langle n \rangle_{u,d,s}$	$\langle n \rangle_c$	$\langle n \rangle_b$
理论值	12.42	7.53	5.17
实验值	$12.2 \pm 0.4 \pm 0.3$	$8.1 \pm 0.5 \pm 0.9$	$5.2 \pm 0.3 \pm 0.9$

另外, 文献 [9] 还测出  $c$ 、 $b$ -jet 中重粒子衰变平均产生  $\sim 5$  和  $\sim 10$  个带电强子, 它不应随  $c$ 、 $b$ -jet 的能量变化, 把它加到  $\langle n \rangle_c$ 、 $\langle n \rangle_b$  上, 就是  $c$ 、 $b$ -jet 总的  $\langle n \rangle$ . 图 3 列

出现有  $e^+e^- \rightarrow$  强子的  $\langle n \rangle$  实验值, 它们既未区分两 jet 与三 jet, 更未区分是那种夸克 jet, 但显然下述关系成立:

$$\sqrt{S} < 4\text{GeV} \quad \langle n \rangle = \langle n \rangle_{u,d,s} \quad (19)$$

$$4\text{GeV} < \sqrt{S} < 10.54\text{GeV} \quad \langle n \rangle = \frac{6}{10} \langle n \rangle_{u,d,s} + \frac{4}{10} (\langle n \rangle_c + 5) \quad (20)$$

$$\sqrt{S} > 10.54\text{GeV} \quad \langle n \rangle = \frac{6}{11} \langle n \rangle_{u,d,s} + \frac{4}{11} (\langle n \rangle_c + 5) + \frac{1}{11} (\langle n \rangle_b + 10) \quad (21)$$

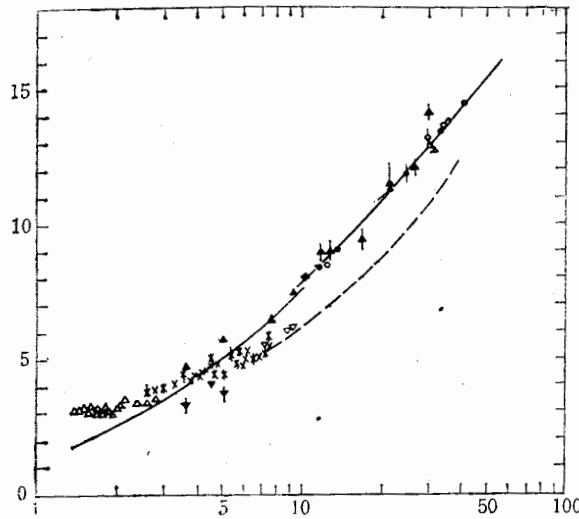


图 3

△ ADONE × MARKII ▼ DASP ▽ LENA ◆ CLEO  
▲ PLUTO ○ JADE ● TASSO

图 3 实线是 (19)–(21) 式算出的理论值。  $\sqrt{S} < 4\text{GeV}$  时,  $\langle n \rangle$  本来很小 (2–3)。由于实验无法确定  $e^+e^- \rightarrow$  两喷注中  $n = 0$  的  $n$  率, 只能用  $n \geq 2$  的事例取平均, 测  $\langle n \rangle$ , 因此必然偏高。  $\sqrt{S} \sim 34\text{GeV}$  时, 实验发现约有 10% 的三 jet。但我们只考虑两 jet 的计算仍和实验符合很好, 暗示胶子 jet 引起的  $\langle n \rangle_g$  与夸克 jet 无显著差别, 与文献 [10] 测量的  $\langle n \rangle_g = 1.25^{+0.15}_{-0.10}$ ;  $\langle n \rangle_q$  吻合。图 3 中虚线为 Webber 模型的理论值<sup>[11]</sup>, 以供比较。

感谢陈鄂生、梁作堂同志的讨论和帮助。

### 参 考 文 献

- [1] 谢去病, 高能物理与核物理, **3**(1979), 520.
- [2] P. Avery et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 1139.
- [3] MARK I Collaboration, P. A. Rapidis et al., *Phys. Lett.*, **84B**(1979), 430;  
MARK II Collaboration, J. M. Yelton et al., *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982), 430;  
TASSO Collaboration, M. Althoff et al., *Phys. Lett.*, **126B**(1983), 493;  
HRS Collaboration, S. Ahlen et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 1147;  
JADE Collaboration, W. Bartel et al., *Phys. Lett.*, **146B**(1984), 121;  
HRS Collaboration, M. Derrick et al., *Phys. Lett.*, **146B**(1984), 261;

- K. Kleinknecht and B. Renk., *Z. Phys.*, **C17**(1983), 325.
- [4] MARK II Collaboration, M. E. Nelson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983), 1542;  
MAC Collaboration, E. Fernandez et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983), 2054;  
MARK J Collaboration B. Adeva et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 443;  
DELCO Collaboration, D. E. Koop et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984), 970;  
TASSO Collaboration, M. Althoff et al., *Z. Phys.*, **C22**(1984), 219;  
TPC Collaboration, H. Aihara et al., *Phys. Rev.*, **D31**(1985), 2719;  
DELCO Collaboration, T. Pal et al., *Phys. Rev.*, **D33**(1986), 2708.
- [5] T. D. Gottschalk, CERN Preprint CERN-TH-3810(1984).
- [6] A. Casher et al., *Phys. Rev.*, **D20**(1979), 179;  
C. Chiu and S. Nussinov., *Phys. Rev.*, **D20**(1979), 945;  
B. Andersson et al., *Phys. Rep.*, **97**(1983), 33.
- [7] O. K. Malhptrra et al., *Z. Phys.* **C17**(1983), 85;
- [8] 谢去病、刘希明, 高能物理与核物理, **11**(1987), 476.
- [9] MARK II Collaboration, P. C. Rowson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 2580.
- [10] M. Derrick et al., *Phys. Lett.*, **165B**(1985), 449.
- [11] B. R. Webber, *Nucl. Phys.* **B238**(1984), 492.

## QUARK PRODUCTION RULE IN $e^+e^- \rightarrow$ TWO JETS EVENTS AT HIGH ENERGY

XIE QU-BING LIU XI-MING

(Shandong University)

### ABSTRACT

By Using the advantage that, in  $e^+e^- \rightarrow$  heavy quark jets, quarks excited by electromagnetic interaction and that by strong interaction can be distinguished from each other, the production rule for the later is investigated. It is found that the number of the quark produced satisfies a simple universal rule, and the resulted  $\langle n \rangle$ ,  $\langle n_i \rangle$  multiplicity distribution and forward-backward correlation etc are all in agreement with experiment. The comparison of  $\langle n \rangle$  with the data is presented.