

# 胶子喷注和夸克喷注性质的蒙特卡洛研究\*

张昆实<sup>1)</sup> 陈刚 喻梅凌 刘连寿<sup>2)</sup>

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

**摘要** 用蒙特卡洛方法研究了 91.2 GeV  $e^+e^-$  碰撞产生的 3 喷注事件. 用 3 个喷注之间的夹角来标识各个喷注, 分别计算了 3 个喷注的能量及能量分布, 并在相同能量下计算了 3 个喷注的多重数, 横动量及其分布. 通过与能量相同的 2 喷注事件中单夸克喷注的上述性质的比较, 得到了从 3 喷注事件中挑选胶子喷注和夸克喷注的一种简便方法. 这样挑选出来的胶子和夸克喷注在性质上与 QCD 的理论预言一致, 并且胶子和夸克喷注的平均多重数比值的计算结果与实验观测值符合.

**关键词** 高能多重产生 胶子喷注 夸克喷注 角度限制

## 1 引言

夸克和胶子是组成强子物质的基本单元, 虽然在迄今为止的高能实验中未能直接观察到自由状态的夸克和胶子, 但通过理论研究和实验观测, 现已有了充分的证据证明它们存在.

1975 年在  $e^+e^-$  对撞实验中发现的 2 喷注事件<sup>[1]</sup>, 产生了夸克-反夸克对:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ . 此后 1979 年在 17—30 GeV 能区又观测到 3 喷注事件<sup>[2]</sup>. 根据量子色动力学, 这 3 个喷注中包括有一个胶子喷注:  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$ . 虽然夸克和胶子最后都碎裂成了末态强子, 但喷注内的末态粒子仍携带有碎裂前的原始夸克和胶子的大量信息.

夸克和胶子是两类性质不同的粒子. 夸克是强子的价粒子, 而胶子却不是价粒子; 胶子的色荷为 3, 比夸克的色荷  $4/3$  要大. 这些差异使得原始夸克和胶子的强子化碎裂情况不同, 因而导致夸克喷注和胶子喷注之间性质上的显著不同. 3 喷注事件中的夸克喷注和胶子喷注内部究竟具有怎样的性质, 是长期以来喷注研究所关注的一个主要问题<sup>[3]</sup>. 细致地比较夸克喷注和胶子喷注的性质, 是对描写强相互作用的量子色动力学(QCD)的一种有意义的检验.

2001-12-24 收稿

\* 湖北省教育厅重点项目和国家自然科学基金(19975018)资助

1) 永久通信处: 荆州师范学院物理系, 湖北荆州, 434104

2) E-mail: liuls@iopp.ccn.u.edu.cn

本文从 3 喷注的结构出发, 用 3 个喷注所对的 3 个角度来标识各个喷注, 用蒙特卡洛模拟研究了 91.2GeV  $e^+e^-$  对撞产生的 3 喷注事件样本中每个喷注内部的物理性质, 与能量相同的 2 喷注事件中的单夸克喷注<sup>[4]</sup>的相应结果比较, 得到了一种简便的从 3 喷注事件中挑选胶子喷注和夸克喷注的方法. 这样挑选出来的胶子喷注和夸克喷注在性质上与 QCD 理论估计的性质符合. 又用挑选出的胶子喷注和夸克喷注, 计算了它们的平均多重数的比值  $R = \langle N \rangle_g / \langle N \rangle_q$ , 计算结果与实验观测值的一致说明了这种挑选方法的合理性.

## 2 3 喷注事件中 3 个喷注性质的研究

### 2.1 3 个喷注的角度标识

用 JETSET 7.4 蒙特卡洛产生器产生总数为 1000000 个 91.2GeV  $e^+e^-$  对撞事件, 由 Durham 喷注规则挑选出 3 喷注事件的样本. 一个 3 喷注事件如图 1 所示.

我们用 3 个喷注所对的夹角

$$\theta_i = \arccos \frac{P_j \cdot P_k}{P_j P_k} = \arccos \frac{P_{j1} P_{k1} + P_{j2} P_{k2} + P_{j3} P_{k3}}{(P_{j1}^2 + P_{j2}^2 + P_{j3}^2)^{\frac{1}{2}} (P_{k1}^2 + P_{k2}^2 + P_{k3}^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

( $i, j, k = 1, 2, 3$  轮换)

来标识各个喷注.  $P_1, P_2, P_3$  分别为 3 个喷注的总动量. 最小夹角  $\theta_1$  所对的为喷注 1, 中等大的夹角  $\theta_2$  所对的为喷注 2, 最大夹角  $\theta_3$  所对的为喷注 3. 为了避免当  $\theta_2 \approx \theta_3$  时, 喷注 2 与喷注 3 之间的相互混淆, 在以下的计算中都加入了角度限制条件, 把  $\theta_3 - \theta_2 < 30^\circ$  的事件剔除掉, 这样喷注 2 和喷注 3 的选择纯度将显著提高. 另外为了保证 3 个喷注位于同一平面内, 也去掉了  $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 < 358^\circ$  的事件. 这后一限制去掉了大约 20% 的事件. 图 2 是 3 喷注的 3 个夹角的分布图.

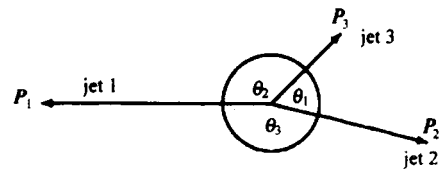


图 1 3 喷注事件及其夹角

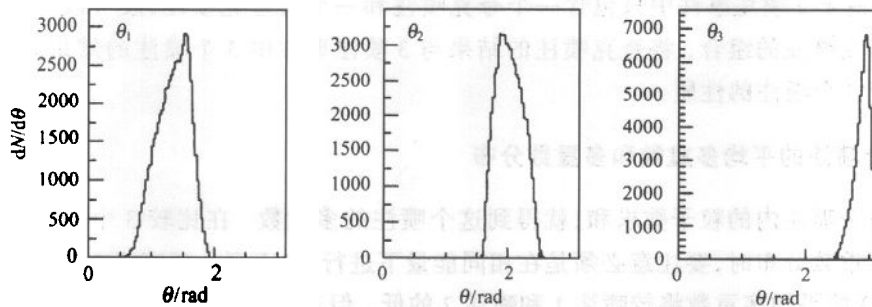


图 2 3 喷注的 3 个夹角的分布

## 2.2 3 个喷注的平均能量及能量分布

将喷注  $k$  内每个粒子的能量  $E_{ki}$  加起来就得到喷注  $k$  的能量

$$E_{\text{jet}k} = \sum_{i=1}^n E_{ki} \quad (k = 1, 2, 3).$$

将 3 喷注事件样本中所有喷注  $k$  的能量  $E_{\text{jet}k}^i$  加起来除以 3 喷注事件样本数就得到喷注  $k$  的平均能量

$$\langle E_{\text{jet}k} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{\text{jet}k}^i \quad (k = 1, 2, 3). \quad (3)$$

取不同的截断参数  $y_{\text{cut}}$ , 分别计算 3 个喷注的平均能量, 可得喷注平均能量随  $y_{\text{cut}}$  的变化如图 3 所示.

在某一特定的  $y_{\text{cut}}$  下, 喷注的能量分布如图 4 所示. 可见 3 喷注中小角  $\theta_1$  所对的喷注 1 的平均能量较大, 大角  $\theta_3$  所对的喷注 3 的平均能量较小.

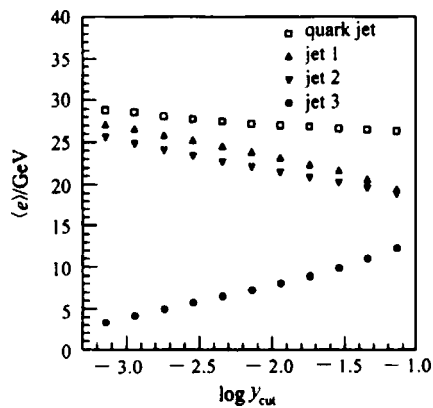


图 3 喷注的平均能量随  $y_{\text{cut}}$  的变化

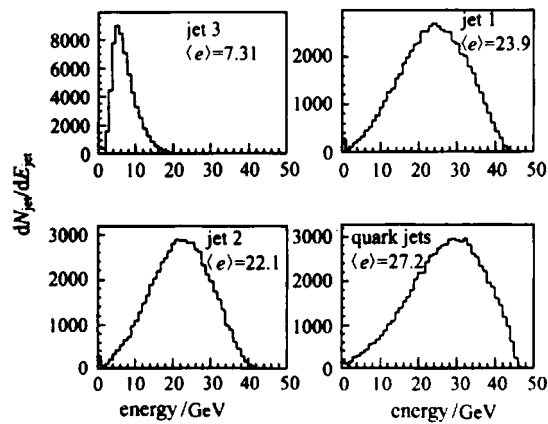


图 4 喷注的能量分布 (取  $\log(y_{\text{cut}}) = -2.140$ )

在图 3 和图 4 中还画出了 2 喷注事件中的单夸克喷注<sup>[5]</sup>的平均能量和能量分布的计算结果. 由于 2 喷注事件中只包含一个夸克喷注和一个反夸克喷注, 故可以把它看成是两个单夸克喷注的组合. 将夸克喷注的结果与 3 喷注事件中 3 个喷注的结果画在一起, 便于研究 3 个喷注的性质.

## 2.3 3 个喷注的平均多重数和多重数分布

将一个喷注内的粒子数求和, 就得到这个喷注的多重数. 在比较 3 个喷注的平均多重数和多重数分布时, 要注意必须是在相同能量下进行的, 否则由于喷注 3 的平均能量较低, 喷注 3 的平均多重数将较喷注 1 和喷注 2 的低. 但若在相同能量下比较, 结果恰恰相反. 本文的计算是在相同的能量下对不同事件的 3 个喷注进行比较. 为了在相同能量下计算 3 个喷注的多重数及其分布, 将 0—30 GeV 均分成 12 个能量间隔, 分别计算每种喷注的能量  $E_{\text{jet}k}$ , 多重数  $N_{\text{jet}k}$  和横动量  $P_{\text{jet}k}$  (其定义见(5)式) ( $k = 1, 2, 3$ ). 若喷注的能量落入

某一能量间隔  $l(l = 1, 2, \dots, 12)$ , 则在该能量间隔中统计这个喷注的多重数和横动量. 对整个 3 喷注事件样本重复这一过程就得到在各个能量间隔中该种喷注的多重数(横动量)的分布.

在计算每个能量间隔内喷注的平均多重数时, 分别统计某种喷注在每一能量间隔中的总多重数, 再除以进入该能量间隔的次数就得到在该能量间隔内该种喷注的平均多重数:

$$\langle N_{\text{jet}k} \rangle_l = \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} N_{\text{jet}k}^i \quad (k = 1, 2, 3; \quad l = 1, 2, \dots, 12). \quad (4)$$

图 5 给出了 3 喷注事件的 3 个喷注和 2 喷注事件中的单夸克喷注的平均多重数随喷注能量的变化. 图 6 是在选定的能量间隔内 4 种喷注的多重数分布的比较图.

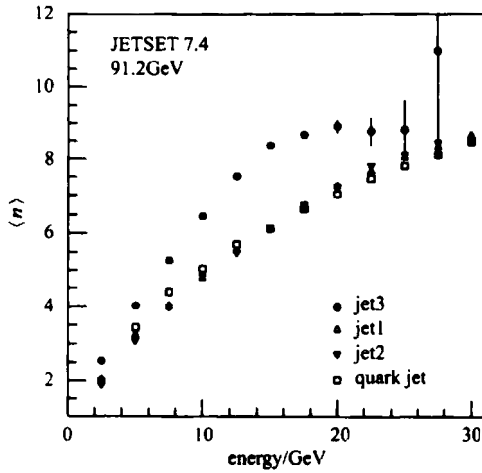


图 5 喷注的平均多重数随喷注能量的变化

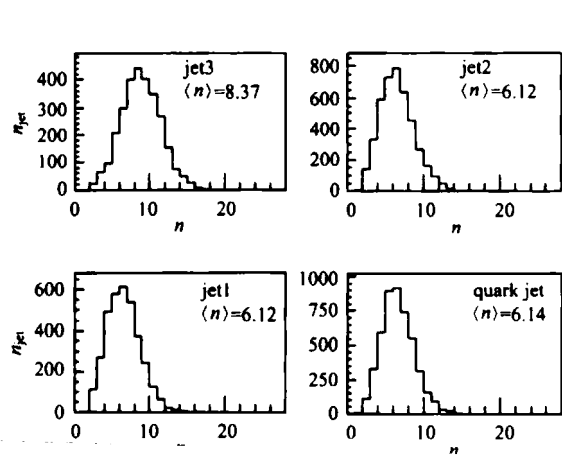


图 6 在能量间隔 12.51—15.00GeV 内 4 种喷注的多重数分布的比较

### 2.4 3 个喷注的平均横动量和横动量分布

喷注的横动量是该喷注内所有粒子的横动量之和

$$P_{\text{jet}k} = \sum_{i=1}^n P_{ik} \quad (k = 1, 2, 3). \quad (5)$$

与多重数的比较一样, 在比较 3 个喷注的平均横动量和横动量分布时, 也应在同一能量下进行. 如前所述, 在 12 个能量间隔中, 某种喷注的平均横动量

$$\langle P_{\text{jet}k} \rangle_l = \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} P_{\text{jet}k}^i \quad (k = 1, 2, 3; \quad l = 1, 2, \dots, 12). \quad (6)$$

图 7 给出了 3 喷注事件的 3 个喷注的平均横动量随喷注能量的变化. 图 8 是在选定的能量间隔内三种喷注的横动量分布. 为了比较 3 个喷注的性质, 在图 7 和图 8 中还分别给出了 2 喷注事件中的单夸克喷注的相应计算结果.

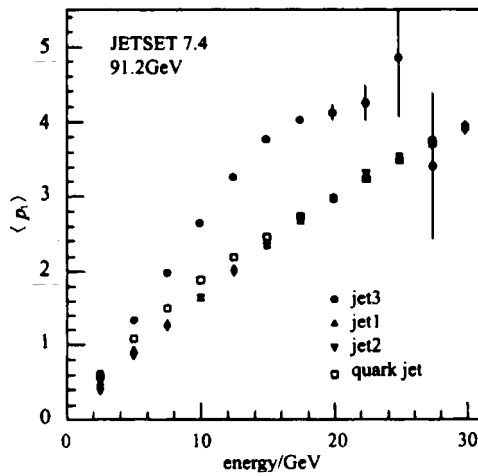
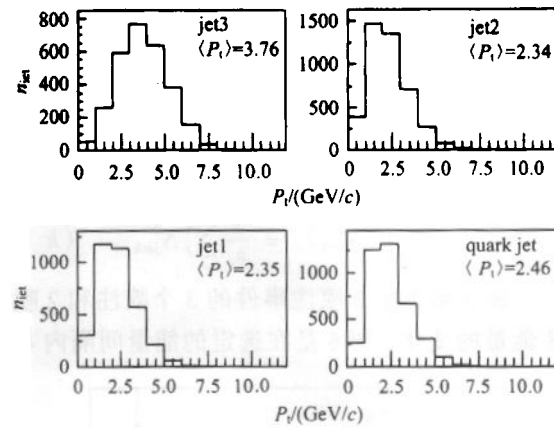


图 7 喷注的平均横动量随喷注能量的变化

图 8 在能量间隔 12.51—15.00 GeV 内  
4 种喷注的横动量分布的比较

### 3 结果及讨论

量子色动力学(QCD)理论指出,在 3 喷注事件中有一个胶子喷注.在仔细研究了 3 喷注事件 3 个喷注的能量,多重数,横动量及其分布以后,我们可以来辨别这个胶子喷注了.

由图 5 和图 7 可见,3 喷注中的喷注 1 和喷注 2 的平均多重数和平均横动量随喷注能量的变化与单夸克喷注的情况除低能区外几乎完全重合;又由图 6 和图 8 可知,喷注 1 和喷注 2 与单夸克喷注在选定的能量间隔中,多重数分布和横动量分布非常一致.这些都说明它们是同一类型的喷注.即喷注 1 和喷注 2 是 3 喷注事件中的夸克喷注.而喷注 3 在上述性质上与单夸克喷注显著不同,说明它不是夸克喷注,因而喷注 3 是 3 喷注事件中的胶子喷注.这样我们就从 3 喷注事件中挑选出了胶子喷注和夸克喷注.

理论上 QCD 估计,胶子喷注比夸克喷注要宽(即锥角较大)<sup>[6]</sup>,这意味着相同能量的喷注,胶子喷注包括的粒子要比夸克喷注包括的粒子多;胶子喷注包括的粒子相对于喷注轴的分布要比夸克喷注内粒子的分布宽.即:胶子喷注的平均多重数要比夸克喷注的多,胶子喷注的平均横动量要比夸克喷注的大.由图 5—图 8 可以明显看出,经我们挑选出来的胶子喷注(喷注 3)和夸克喷注(喷注 1 和喷注 2)在上述性质上与 QCD 理论的预言相符.

更进一步,我们用挑选出来的胶子喷注(喷注 3)和夸克喷注(喷注 1)计算它们的平均多重数的比值  $R = \langle N \rangle_g / \langle N \rangle_q$ ,并与测出的实验值进行比较.

利用图 5 的数据计算这一比值  $R$  随喷注能量的变化如图 9.从图中可以看出,在 25 GeV 以下能区,  $1.10 < R < 1.40$ .这一结果与 SLD, OPAL, ALEPH, DELPHI 等实验组在相同能区测得的胶子喷注与夸克喷注的平均多重数的比值<sup>[5,6]</sup>(见表 1)一致.这样又从实验上证明了这种从 3 喷注事件中挑选胶子喷注和夸克喷注方法的合理性.

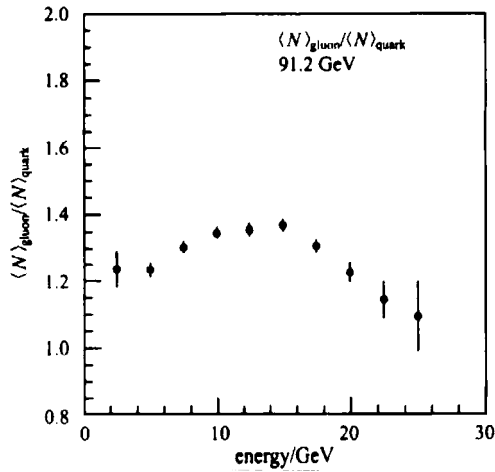


图 9 胶子喷注与夸克喷注的平均多重数之比随喷注能量的变化

表 1 SLD, OPAL, ALEPH, DELPHI 等实验组测得的胶子喷注与夸克喷注的平均多重数的比值  $R$

$E_{jet}/\text{GeV}$	$\langle N \rangle_g / \langle N \rangle_q$	group
24	$1.36 \pm 0.24$	SLD94
24	$1.19 \pm 0.04$	ALEPH95
24	$1.25 \pm 0.02$	OPAL95
24	$1.25 \pm 0.01$	DELPHI

#### 4 结论

历史上曾有实验组<sup>[7]</sup>用角度方法来辨别胶子喷注和夸克喷注, 但用他们的方法选择出的喷注纯度不高, 只有 56%, 因而没有得到广泛的应用. 目前实验上常用的是所谓的 b-tag 方法<sup>[8]</sup>. 这种方法是通过选择含 b 和  $\bar{b}$  的喷注来区分夸克(反夸克)和胶子喷注. 它的精度较高, 但只适合于由 b 夸克或 b 反夸克发射胶子的情况, 不能用于 u, d 夸克发射的胶子, 而且统计量小.

本文对角度方法进行了细致的研究, 加入了两个限制条件. 一个是: 根据对 3 喷注事件平面性的要求, 选择  $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 > 358^\circ$  的事件; 另一个是: 通过要求  $\theta_3 - \theta_2 > 30^\circ$  来更明显地区分开喷注 2 和喷注 3, 以提高选择的纯度. 通过蒙特卡洛研究, 表明用这种方法选择的胶子喷注和夸克喷注的纯度已提高到大于 83%<sup>[9]</sup>. 这样挑选出来的胶子喷注和夸克喷注在性质上与 QCD 理论估计的性质符合. 又通过计算用本文的方法挑选出的胶子喷注和夸克喷注的平均多重数的比值  $R$  与多个实验组用 b-tag 方法观测的实验值的一致, 说明本文所介绍的角度方法能够用来辨别胶子喷注和夸克喷注. 这个方法没有对夸克的味的限制, 也不要求在同一事件中胶子喷注与夸克喷注具有相同的能量, 因而能够相对容易地得到大的统计量. 这样就为进一步深入研究 3 喷注事件中的胶子喷注和夸克喷注内部的动力学起伏的性质提供了一条可行的途径.

#### 参考文献 (References)

- 1 Hanson G et al. Phys. Rev. Lett., 1975, 35:1609
- 2 Brandelik R et al (TASSO Coll.). Phys. Lett., 1979, B86:243-249
- 3 Abreu P et al (DELPHI Coll.). Eur. Phys. J., 1998, C4:1-17
- 4 ZHANG Kun-Shi, YIN Jian-Wu, CHEN Gang et al. HEP&NP, 2002, 26:185 (in Chinese)

- (张昆实, 尹建武, 陈刚等. 高能物理与核物理, 2002, 26:185)
- 5 ALEPH Coll. Phys. Lett., 1996, **B384**:353—364; Acton P D et al (OPAL Coll.). Z. Phys., 1993, **C58**:387—403; 1995, **C68**:179
  - 6 Abreu P et al (DELPHI Coll.). Phys. Lett., 1999, **B449**:383
  - 7 DERRICK M et al (HRS Collaboration). Phys. Lett., 1985, **B165**:449
  - 8 Buskulic D et al (ALEPH Collaboration). Phys. Lett., 1996, **B383**:353
  - 9 YU Mei-Ling, LIU Lian-Shou. A Monte Carlo Study on The Identification of Quark and Gluon Jets. In: Proceeding of XXXI International Symposium on Multiparticle Dynamics. Datong, China. Sept. 2001, eds. Bai Yuting, Yu Meiling and Wu Yuanfang (World Scientific); hep-ph/0112092

## Monte Carlo Study on the Properties of Gluon and Quark Jets

ZHANG Kun-Shi<sup>1)</sup>, CHEN Gang, YU Mei-Ling, LIU Lian-Shou<sup>2)</sup>

(Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract** The 3-jet events produced in  $e^+e^-$  collisions at 91.2 GeV have been studied using Monte Carlo method. After applying two angular cuts the three angles between the jets are used to identify the individual jet in 3-jet events. The energy distributions of the three jets, the mean particle multiplicities, mean transverse momenta of the three jets in equal energy bins and their distributions have been analyzed. Comparing with the corresponding results from the quark jets in 2-jet events, a simple method to select gluon and quark jets from 3-jet events is obtained. The properties of the gluon and quark jets being selected using the introduced method are in qualitative agreement with the expectations of perturbative QCD. The ratio of the mean multiplicity between quark and gluon jets,  $\langle N \rangle_{\text{gluon}} / \langle N \rangle_{\text{quark}}$ , has been calculated. The results, again, agree with the experimental results from SLD, OPAL, ALEPH, and DELPHI Collaborations, indicating that the method proposed to select gluon and quark jets from 3-jet events is reasonable.

**Key words** high energy multiparticle production, gluon jet, quark jet, angular restriction

---

Received 24 December 2001

\* Supported by Educational Committee of Hubei Province and National Natural Science Foundation of China(19975018)

1)Permanent address: Department of Physics, Jingzhou Teacher's College, 434104

2)E-mail: liuls@iopp.cnu.edu.cn