

对 Z^0 三喷注事例中色联接敏感可观测量的研究*

邵凤兰 谢去病 李世渊

(山东大学物理与微电子学院 济南 250100)

摘要 将末态部分子的色分离联接引入 JETSET 事例产生器, 通过用喷注的 DURHAM 判据 y_{cut} 及用喷注夹角限制事例形状, 对 Z^0 衰变进行三喷注事例挑选, 发现可以得到对色联接敏感三喷注事例. 对于这类事例, 末态强子的平均带电多重数及胶子喷注中的一系列可观测量对色联接的敏感性随 y_{cut} 值的减小而增大; 在小 y_{cut} 值时, 色中性流和色分离两种联接导致了显著差别. 使通过实验测量鉴别部分子的色联接成为可能.

关键词 三喷注事例 喷注判据 软硬界面 色分离联接

1 引言

末态部分子系统的“色联接”或“色重组”是 QCD 微扰与非微扰“界面”的一个重要问题^[1,2]. 以高能 e^+e^- 湮没成强子为例, 至今理论上用微扰 QCD 给出强子化前的多部分子末态, 用唯象的强子化模型(如 Lund 弦碎裂模型^[3]、Webber 集团碎裂模型^[4])描述部分子的强子化, 强子化前部分子的色联接则采用大 N_c 近似下的色中性流联接. 例如, 在 $Z^0 \rightarrow qq\bar{q}g$ 事例中, 夸克 q 的色与第一个胶子的反色联接, 第一个胶子的色与第二胶子的反色联接, 第二个胶子的色再与反夸克 \bar{q} 的反色联接, 整个部分子系统形成一个色单态, 部分子通过一条色弦联接起来, 碎裂的末态强子在色弦张开的相空间范围优先出现. 然而, 自然界颜色数目 $N_c = 3$, 微扰 QCD 允许多种色联接方式^[1,2,5,6], 例如, 在 $Z^0 \rightarrow qq\bar{q}g$ 事例中, q 和 \bar{q} 本身形成一个色单态, 两个胶子 gg 形成一个色单态分别强子化, 简称色分离态, 它是所谓“色重组”的一个特例.

我们在工作^[2,6]中已证明, 色中性流和色分离两种不同的联接方式分别属于不同的色单态完备集, 彼此不正交, 对微扰 QCD, 它们等价. 而不同的色联接意味着不同的弦组态, 不同的弦组态通过强子化

一般将导致不同的强子末态^[1]. 究竟按何种色联接强子化, 最终取决于非微扰 QCD 动力学性质. 色中性流和色分离两种联接导致的强子末态有无差别? 能否通过某些可观测量作出区分? 是近些年广为关注的重要问题. 由于目前非微扰 QCD 尚未解决, 上述问题只能通过唯象模型的预言与实验的比较来回答, 由此探索非微扰 QCD 的动力学特征. 在目前流行的 e^+e^- 反应事例产生器(如 JETSET 和 HERWIG)中, 弱电过程、部分子簇射过程分别用弱电理论和 PQCD 描写, 非微扰的强子化过程用唯象模型描写, 强子化前部分子的色联接采用大 N_c 近似下的色中性流联接. 因此, 研究上述问题最简便实际的方法是, 保留事例产生器中原有的弱电过程、部分子簇射过程及强子化过程的描写, 仅对末态部分子的色联接方式进行置换. 用置换后的产生器产生强子末态, 与原有产生器的结果进行比较; 如有差别, 就可以通过与实验(尤其是那些原有产生器不能解释的实验)的比较, 对色联接方式给出鉴别. 至今对“色重组”效应的研究都采用这种方法(如文献[1,7—12]).

在工作^[2,13]中, 把色分离联接引入 JETSET 事例产生器, 对其导致的事例的各种整体性质(如球度、冲度、非平面度、扁度等), 不同能量下的末态强子产额和重子介子比, 重子反重子关联等性质进行了系

2002-11-25 收稿

* 国家自然科学基金(10075031, 10205009)资助

统、全面的研究,并与色中性流联接的预言及实验结果作了比较,发现色分离联接同样甚至更好的与所有这些实验符合,这就为色分离态模型提供了稳固的唯象学基础.一般地讲,不同的色联接,由于其色弦所张开的相空间范围不同,碎裂强子的能量和动量分布应该有所不同.但至今流行产生器^[14,15]对强子末态提供了很好的描述,未能证实色重组效应,却并未排除在某类特殊事例的特定相空间中能够观测到色重组效应.我们在前面的工作^[16]中,研究了类双喷注事例中可能分辨的色重组效应,但实验挑选这类事例有一定的难度.考虑到实验积累了大量的 Z^0 衰变的三喷注事例,其中一个为胶子喷注,一般来说,它并不对应一个胶子,而可能是一个硬胶子与若干软胶子一起碎裂的结果,例如, $Z^0 \rightarrow qqggg$,其中一个硬胶子与另外两个软胶子共同碎裂为胶子喷注,如图 1 所示.从图 1 可以看出,色分离联接的一



图 1 三喷注事例对应的 5 部分子末态的两种色联接
(a) 色中性流联接; (b) 色分离联接(图中点划线为色弦).

个重要特征就是几个胶子形成一个色单态集团独立强化,这就意味着三喷注事例中的胶子喷注可能包含有胶子色单态集团碎裂的贡献;在这种情况下,相对色中性流联接,色分离联接将引起软胶子附近的色弦发生较大改变,使碎裂强子的动量、能量分布随之变化,导致胶子喷注中的一系列性质有所改变.本文的目的就是对 Z^0 衰变三喷注事例中的色联接效应进行研究,寻找实验可能鉴别的色重组信号.

2 对色联接敏感的三喷注事例的选择

当研究高能碰撞产生的末态强子喷注的动力学特性时,首先需要末态强子按照一定的喷注判断法则得到喷注事例.考虑到 K_{\perp} (“Durham”)喷注判断法则理论上更合理并已被近来实验广泛采用,这里我们也用 Durham 判据^[17]来挑选三喷注事例.用这一法则判定一个事例中的喷注时,先给定一个喷注截断参数值 y_{cut} ,并用下式定义第 i 个粒子(或准粒子)和第 j 个粒子(或准粒子)之间的距离^[17]

$$y_{ij} = \frac{2\min(E_i^2, E_j^2)(1 - \cos\theta_{ij})}{E_{vis}^2}, \quad (1)$$

其中 E_i, E_j 分别为第 i 个粒子和第 j 个粒子(或准粒子)的能量, θ_{ij} 为它们之间的夹角, E_{vis} 为一个强子事例中可观测到的总能量.按(1)式分别计算出一个事例中任意两个粒子(或准粒子)之间的距离 y_{ij} ,然后将满足条件 $y_{ij} < y_{cut}$ 的所有粒子归并在一起,定义为一个喷注.显然,在一个事例中,喷注数量的多少,由该事例末态粒子的分布决定(同时也强烈地依赖于喷注截断参数 y_{cut} 的大小.对 Z^0 衰变的全事例样本进行判定),从中挑选出三喷注事例子样本,则可得与这一 y_{cut} 值对应的三喷注事例子样本.

借助 JETSET7.4 事例产生器,分别对色中性流和色分离两种联接产生的三喷注事例进行研究,发现用两种不同色联接得到的三喷注事例占总事例的比率随 y_{cut} 值的变化差别不大,都与实验符合^[18,19].这表明无法从一般的三喷注事例的比率来区分两种色联接,需要选择对色联接敏感的特殊三喷注事例来进行研究.

因为只要求对色联接敏感,并不要求胶子喷注的高纯度,我们采用一般按喷注能量大小规定胶子喷注的方法:能量大的喷注为夸克或反夸克喷注(即喷注 1,2),能量最小的喷注为胶子喷注(即喷注 3);并定义喷注 1 与喷注 2 的夹角为 $\theta_{1,2}$,喷注 1 与喷注 3 的夹角为 $\theta_{1,3}$.用角度 $\theta_{1,2}$ 和 $\theta_{1,3}$ 的取值范围来限定三喷注事例的形状.研究发现,当 $\theta_{1,2}$ 和 $\theta_{1,3}$ 的取值范围改变时,该事例的平均带电粒子多重数及胶子喷注中的一系列可观测量对色联接的敏感性也随之变化,只有胶子喷注反冲大的一类事例对色联接较敏感;考虑到兼顾该类三喷注事例的统计性及其对色联接的敏感性,在下面的数值计算中选取: $100^\circ < \theta_{1,2} < 160^\circ, 100^\circ < \theta_{1,3} < 160^\circ$ 形状的特殊三喷注事例.下面对这种三喷注事例中的一系列色联接敏感可观测量进行研究.

3 色联接敏感可观测量随 y_{cut} 值的变化关系

对于按 $100^\circ < \theta_{1,2} < 160^\circ, 100^\circ < \theta_{1,3} < 160^\circ$ 挑选出来的三喷注事例,首先对其比率进行了研究,发现:1)两种色联接下,该类三喷注事例占总事例的比率都随 y_{cut} 值的减小而减小;2)色分离比色中性流联接产生的该类三喷注事例比率大;并且当 y_{cut} 值

小时,其差别大.但这一差别还不足以从实验上区分两种色联接.考虑到两种色联接的差别应主要体现在它们碎裂的强子末态,对所选事例的平均带电粒子多重数、胶子喷注中的平均带电多重数、胶子喷注的不变质量、胶子喷注的纵动量(沿胶子喷注轴)等一系列可观测量进行了数值计算,如图 2 所示.

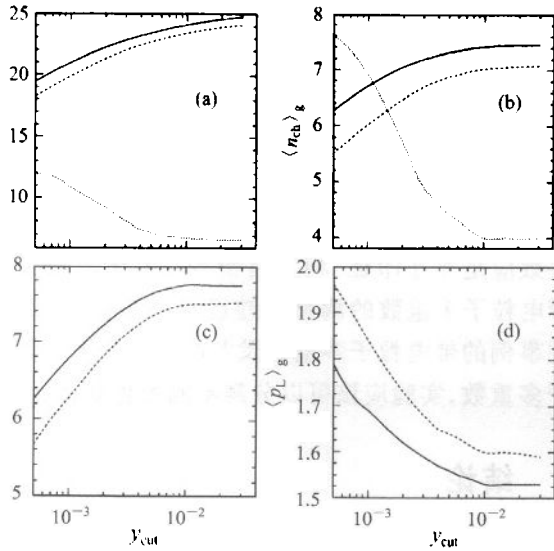


图 2

- (a) 事例的平均带电多重数随 y_{cut} 值的变化关系(实线为色中性流的结果 $\langle n_{ch} \rangle_{cc}$, 虚线为色分离的结果 $\langle n_{ch} \rangle_{cs}$, 点线为两者之差 $\Delta \langle n_{ch} \rangle = \langle n_{ch} \rangle_{cc} - \langle n_{ch} \rangle_{cs}$ 的 10 倍);
 - (b) 胶子喷注的平均带电多重数随 y_{cut} 值的变化关系(实线为色中性流的结果 $\langle n_{ch} \rangle_{gc}$, 虚线为色分离的结果 $\langle n_{ch} \rangle_{gs}$, 点线为两者之差 $\Delta \langle n_{ch} \rangle_g = \langle n_{ch} \rangle_{gc} - \langle n_{ch} \rangle_{gs}$ 的 10 倍);
 - (c) 胶子喷注的不变质量随 y_{cut} 值的变化关系;
 - (d) 胶子喷注的纵动量随 y_{cut} 值的变化关系.
- (c), (d) 中实线、虚线分别为色中性流和色分离的结果.

从图 2 中看出, (a) 色分离比色中性流给出的事例平均带电粒子多重数减小; (b) 色分离使得胶子喷注的平均带电粒子多重数减小; (c) 色分离造成胶子喷注的不变质量减小; (d) 色分离使胶子喷注的纵动量增大. 而且, 色中性流和色分离两种联接导致的末态强子上述可观测量的差别随 y_{cut} 值的减小而增大; 当 y_{cut} 值很小时, 其差别显著; 当 y_{cut} 值增加到大于 0.004 时, 其差别趋于稳定.

4 小 y_{cut} 值时敏感可观测量的研究

如前所述, y_{cut} 值变小时, 两种色联接导致的差别变大, 但这种三喷注事例占总事例的比率却变小, 实验上会带来更大的统计误差. 因此, 兼顾所选三

喷注事例的统计性及其对色联接的敏感性, 应取适当的 y_{cut} 值. 我们取 $y_{cut} = 0.0005$, 对于这种三喷注事例子样本, 色中性流和色分离两种联接产生的末态强子, 其带电粒子多重数 (π^+ , K^+ , p^+) 分布 (如图 3), 有明显差别.

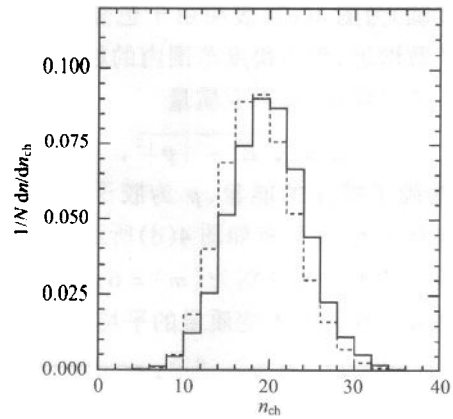


图 3 带电粒子多重数 (π^+ , K^+ , p^+) 分布
图中实线、虚线分别为色中性流和色分离的结果.

上述结果不难理解, 色分离相对色中性流而言, 由于几个胶子形成色单态集团分离出来独立强子化, 使三喷注事例的有效能减少, 从而其平均带电粒子多重数减少. 色中性流得到的结果为: $\langle n_{ch} \rangle_{cc} = 19.41$, 色分离给出的结果为: $\langle n_{ch} \rangle_{cs} = 18.22$, $\Delta \langle n_{ch} \rangle = \langle n_{ch} \rangle_{cc} - \langle n_{ch} \rangle_{cs} = 1.19$. OPAL 实验组近期对 Z^0 衰变的 Y 型三喷注事例的平均带电多重数随 θ_1 (θ_1 为两个能量较低的喷注之间的夹角) 的变化进行了测量^[20], 由于该事例的统计性随 θ_1 的增大而减小, 因而统计误差随之增大; 对 $80^\circ < \theta_1 < 85^\circ$ 形状的 Y 型三喷注事例, 其平均带电多重数的统计误差为 ± 0.28 , 而这种 Y 型三喷注事例比我们所选择的三喷注事例, 其统计性低得多; 而我们这里给出的两种色联接导致的差别比它大 4.25 个标准偏差, 实验应该能够鉴别.

进一步以选出的胶子喷注为研究对象, 取胶子喷注轴为纵轴 (z 轴), 定义一个可观测量

$$T = \frac{\sum_i p_{zi}}{\sum_i |p_i|}, \quad (2)$$

其中 p_{zi} , $|p_i|$ 分别为胶子喷注中第 i 个强子的纵动量和动量. 发现两种色联接给出的 T 分布 (如图 4 (a) 所示) 有显著差别. 表明色分离导致胶子喷注的 T 明显变大, 即胶子喷注变“瘦”.

图 4(b) 给出两种色联接下胶子喷注的带电粒

子多重数 (π^+ , K^+ , p^+) 分布, 色分离使得胶子喷注中的平均带电粒子多重数减小, 色中性流联接: $\langle n_{ch} \rangle_{gsc} = 6.25$, 色分离联接: $\langle n_{ch} \rangle_{gcs} = 5.49$, $\Delta \langle n_{ch} \rangle_g = \langle n_{ch} \rangle_{gsc} - \langle n_{ch} \rangle_{gcs} = 0.76$.

胶子喷注中带电粒子的快度分布 (取胶子喷注轴为快度轴) 为图 4(c), 表明由于色分离, 大快度范围的粒子数增加, 而小快度范围内的粒子数减少.

对于胶子喷注, 其不变质量

$$m = \sqrt{E^2 - |\mathbf{p}|^2}, \quad (3)$$

其中 E 为胶子喷注的能量, \mathbf{p} 为胶子喷注的动量. 两种色联接下的 m 分布如图 4(d) 所示, 色中性流和色分离给出的平均值分别为 $\langle m \rangle = 6.26$ 和 5.49 , 色分离使得胶子喷注的不变质量的平均值减小.

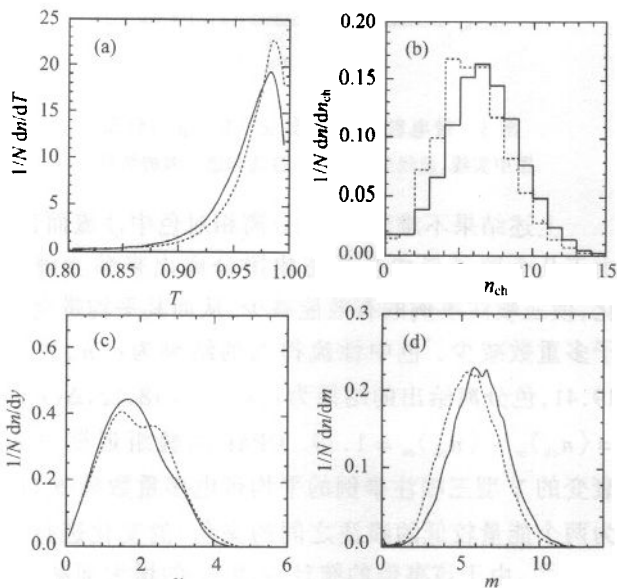


图 4

(a) 胶子喷注的 T 分布; (b) 胶子喷注的带电粒子多重数分布;
(c) 胶子喷注的带电粒子快度分布; (d) 胶子喷注的不变质量分布.

图中实线、虚线分别为色中性流和色分离的结果.

对胶子喷注, 还计算了带电粒子的运动方向与胶子喷注轴的夹角 $\cos\varphi$ 分布和带电粒子的纵向动量分布, 表明色分离使得胶子喷注中带电粒子的运动方向趋于纵轴, 带电粒子的纵向动量增加, 与上述胶子喷注变“瘦”的行为一致.

本节的结果都表明, 色分离相对色中性流而言, 由于几个胶子形成一个色单态集团分离出来独立强子化, 使得硬胶子附近的色弦有较大改变, 色弦趋向硬胶子方向, 因此碎裂出来的强子其动量方向也趋向胶子喷注轴, 胶子喷注变“瘦”, 不变质量减小, 带电粒子多重数减少. 两种色联接导致的这些敏感可观测量的显著差别都是因色弦的改变而引起, 且这些效应是相互印证、相互自洽的. 鉴于目前实验对带电粒子多重数的测量误差已经很小, 从所选三喷注事例的带电粒子多重数及其胶子喷注中的带电粒子多重数, 实验应该可以分辨不同的色联接.

5 结论

将 PQCD 允许的色分离联接引入 JETSET 事例产生器, 通过用 DURHAM 喷注判据及限制事例的形状对 Z^0 衰变的三喷注事例进行挑选, 发现了对色联接敏感的三喷注事例. 对于 $100^\circ < \theta_{1,2} < 160^\circ$, $100^\circ < \theta_{1,3} < 160^\circ$ 形状的三喷注事例, 其末态强子的平均带电多重数及胶子喷注中的一系列可观测量对色联接的敏感性随 y_{cut} 值的减小而增大; 当 $y_{cut} = 0.0005$ 时, 色中性流和色分离两种联接导致了显著差别, 使通过实验测量鉴别部分分子的色联接成为可能.

作者感谢梁作堂教授及课题组其他成员有益的讨论.

参考文献 (References)

- Friberg C, Gustafson G, Hakkinen J. Nucl. Phys., 1997, **B490**:289
- WANG Qun, Gustafson G, XIE Qu-Bing. Phys. Rev., 2000, **D62**:054004
- Andersson B et al. Phys. Rep., 1983, **97**:31
- Webber B R. Nucl. Phys., 1984, **B238**:492; Marchesini G, Webber B R. Nucl. Phys., 1984, **B238**:1
- WANG Qun et al. Phys. Rev., 2001, **D64**:012006
- WANG Qun, XIE Qu-Bing, SI Zong-Guo. Phys. Lett., 1996, **B388**:346; WANG Qun, XIE Qu-Bing. Phys. Rev., 1995, **D52**:1469
- Eden P, Gustafson G. Euro. Phys. Jour., 1999, **C8**:435
- Gustafson G, Pettersson U, Zerwas P M. Phys. Lett., 1988, **B209**:90
- Sjostrand T, Khoze V A. Z. Phys., 1994, **C62**:281; Phys. Rev. Lett., 1994, **72**:28
- Physics at LEP2. Eds. Altarelli G, Joststrand T, Zwirner F. Yellow Report CERN 96-01, 1:124, 190, 249
- Gustafson G, Hakkinen J. Z. Phys., 1994, **C64**:659
- Lonnblad L. Z. Phys., 1996, **C70**:107
- SHAO Feng-Lan, XIE Qu-Bing. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**(8):710—719; 2002, **26**(8):779—785 (in Chinese)
(邵凤兰, 谢去病. 高能物理与核物理, 2001, **25**(8):710—719; 2002, **26**(8):779—785)
- Sjostrand T. Comp. Phys. Commun., 1994, **82**:74
- Corcella G et al. JHEP, 2001, **0101**:010

- 16 LI Shi-Yuan, SHAO Feng-Lan, XIE Qu-Bing et al. *Phys. Rev.*, 2002, **D65**:077503; SHAO Feng-Lan, LI Shi-Yuan, XIE Qu-Bing. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2002, **26**(11):1103—1109 (in Chinese)
(邵凤兰, 谢去病, 李世渊. *高能物理与核物理*, 2002, **26**(11): 1103—1109)
- 17 Catani S et al. *Phys. Lett.*, 1991, **B269**:432
- 18 Acton P D et al. *Z. Phys.*, 1992, *C-Particles and Fields* **55**:1—24
- 19 Armin Bohrer. *Phys. Rep.*, 1997, **291**:107—217
- 20 The OPAL Collaboration. *Eur. Phys. J.*, 2002, **C23**:597—613

Sensitive Observables for Color Connections in Three-Jet Events at Z^0 Pole *

SHAO Feng-Lan XIE Qu-Bing LI Shi-Yuan

(School of Physics and Microelectronics, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

Abstract By substituting the color separate singlet connections for the color neutral flow connections into JETSET7.4, we select the three-jet events according to DURHAM algorithm in e^+e^- annihilation at Z^0 pole. We find that the ratio of the special three-jet events defined by constraining the angles between different jets is sensitive to different kinds of color connections. For these special events, different connections lead to significant differences for the charged particle multiplicity of events and properties of the gluon jet. The differences become larger as γ_{cut} getting smaller. By taking appropriate γ_{cut} , as 0.0005 in this paper, the differences between these two kinds of color connections should be discriminated by experiments.

Key words three-jet event, jet algorithm soft-hard interface, color separate connection

Received 25 November 2002

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10075031, 10205009)