

# 用 $e^+e^- \rightarrow h's$ 反应中类双喷注事例 研究部分子末态的色联接\*

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** 借助 JETSET 事例产生器对  $e^+e^- \rightarrow h's$  反应中的类双喷注事例进行研究. 研究发现, 在 QCD 微扰与非微扰的界面上, 部分子系统的色中性流和色分离单态两种不同色联接方式导致了强子末态某些可观测量的显著差别. 因此, 它们可以用于判别部分子的色联接方式.

**关键词** 类双喷注事例 色中性流 色分离单态 强子化

## 1 引言

高能强相互作用过程, 如  $e^+e^- \rightarrow h's$ , 理论上主要分为两个阶段: 一是微扰的部分子簇射过程, 用微扰量子色动力学 (PQCD) 描写, 给出部分子末态; 二是非微扰的强子化过程, 至今只能用某些唯象模型 (如 LUND 弦碎裂模型<sup>[1]</sup>, Webber 集团碎裂模型<sup>[2]</sup>) 描写. 对于动量、色荷等量子数确定的末态部分子系统, 只有当大  $N_c$  近似时 ( $N_c \rightarrow \infty$ ,  $N_c$  是颜色数), 由于任意两个部分子颜色相同 (或相反) 的几率为零, 部分子间才具有目前常用的事例产生器<sup>[3,4]</sup> 中普遍采用的惟一色中性流联接方式. 但是, 自然界颜色数目  $N_c = 3$ , 不是无穷, 由  $SU_c(3)$  群表示的直乘和约化即可得到复杂多样的多部分子系统的色结构<sup>[5-8]</sup>. 这就意味着末态部分子的色联接方式有多种可能, 大  $N_c$  近似下的色中性流联接方式只是其中的一种. 研究和探测其他色联接导致的与色中性流联接的偏离, 即所谓“色重组”、“色重联”或“ $N_c$  有限效应”, 已成为近年来广为关注的重要课题<sup>[5,6,8,9,14]</sup>. 大  $N_c$  近似下的色中性流联接的产生器至今未遇到真正的挑战, 主要由于它给出的预言, 特别是一般事例的各种性质, 与实验基本符合. 然而, 这种简单近似掩盖了 QCD 微扰与非微扰界面上色联接的复杂性. 例如图 1 中, 一个  $q\bar{q}_1 g_2 g_3 \bar{q}$  的部分子末态 (a), 将允许色中性流两种不同的联接方式 (b) 与 (c), 还允许色分离联接方式 (d), 即  $\bar{r}b, \bar{b}r$  能够联接成一个闭合弦的色单态, 独立进行强子化. 这种色分离联接方式, 源于自然界只有 8 种胶子, 是一种典

2002-01-15 收稿

\* 国家自然科学基金 (10075031) 资助

型的“ $N_c$  有限效应”. 当部分子数目较大时<sup>1)</sup>, 必然有越来越多的胶子有相同(或相反)的

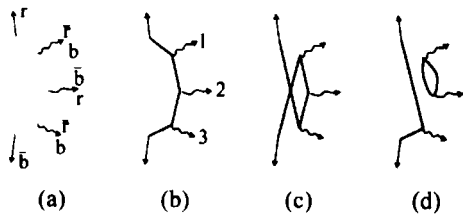


图 1 末态部分子系统(a)有 3 种不同的色连接(b),(c),(d)

颜色,色分离单态也会有较大的几率<sup>[15]</sup>. 文献[5—7]表明,色中性流和色分离这两种不同的色连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. 另一方面,不同的色连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<sup>[8]</sup>. 而究竟取何种色连接方式强子化则取决于目前未知的非微扰 QCD 动力学性质. 现在

人们面临两个问题:1)对于相同的部分子末态,同样的强子化模型,色中性流连接和色分离连接导致的强子末态有什么差别? 2)这些差别能通过哪些可观测量从实验作出区分? 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数据的比较来回答,并由此探索非微扰 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,弱电过程和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,QCD 微扰与非微扰的界面则采用大  $N_c$  近似下的色中性流连接. 因此,研究以上问题最简便实际的方法是在事例产生器中,保留原有的弱电过程和部分子簇射过程及强子化过程的描写,只对 QCD 微扰与非微扰界面上部分子系统的色连接方式进行置换. 然后用置换后的产生器产生强子末态,与原有产生器给出的结果进行比较;如有差别,就可以通过与实验数据(尤其是那些原有产生器不能解释的实验数据)的比较,对色连接方式给出判断(抽取不同色连接方式的相对几率). 至今对“色重联”效应的研究都采用这种方法(如:文献[8,9—14]).

在文献[6]及后续工作<sup>[16]</sup>中,通过将 JETSET7.4 产生器的色中性流连接改为色分离连接构造了一个 Monte Carlo 工作模型,对色分离连接导致的不同能量(10GeV, 30GeV, 91GeV)下  $e^+e^- \rightarrow h's$  反应中,一般事例的球度、冲度等整体性质,各种强子产额及长寿命强子的动量谱,重子介子比和重子反重子快度关联等性质作了 Monte Carlo 计算,并与实验及色中性流连接给出的结果作了比较,发现在  $T$  权重<sup>[17]</sup>下色分离连接同样甚至更好地与所有这些实验符合. 这至少证明:原来用色中性流连接与这些实验基本符合,并不表示色中性流连接就是非微扰 QCD 选择的色连接方式,100% 的色分离连接也是可能的.

我们自然会问, $e^+e^- \rightarrow h's$  反应一般事例的各种末态性质不能区别的这两种色连接方式,是完全对非微扰 QCD 等价,还是两种色连接造成的强子末态的差别被大量背景掩盖? 本文通过下面的研究发现,如果按一定要求选择  $e^+e^- \rightarrow h's$  反应中的类双喷注事例,并在特定相空间中考察某些可观测量,两者存在明显差别,从而可能由实验对隐藏在反应过程中的部分子的色连接方式作出鉴别.

1)用 JETSET 计算可知,事例平均胶子数 $\langle n \rangle$ 随质心系总能量迅速增加,例如 $\sqrt{s} \sim 91, 200, 1000\text{GeV}$ 时, $\langle n \rangle \sim 6, 9, 17$

## 2 类双喷注事例和敏感变量

这里的  $e^+e^- \rightarrow h's$  反应中的类双喷注事例,是指部分子簇射阶段初始夸克对  $q\bar{q}$  虽然可能簇射一些较软的胶子,但没有辐射大横动量的胶子,因而强子末态的冲度轴仍大体沿着初始夸克的运动方向. 由于产生器中每一个部分子的动量、能量都可以跟踪,因此可以通过限制胶子的能量来选取类双喷注事例. 在下面的数值分析中,选取的类双喷注事例的每一个胶子的能量都小于  $2.5\text{GeV}$ . 满足该条件的轻夸克事例(指由弱电顶角产生的一对初始夸克是轻夸克),每个事例中的平均胶子数  $\langle n_g \rangle \cong 3$ ,可以形成色分离单态;而对于这样的重夸克事例,大多事例中只有一个胶子,甚至没有胶子,无法形成色分离单态. 因此,我们只讨论轻夸克事例. 通过在部分子级挑选这种特殊事例并寻找对色连接敏感的可观测量,从而验证部分子的不同色连接是否会导致不同的强子末态.

下面给出质心系能量  $\sqrt{s} = 91.0\text{GeV}$  时数值计算的结果,取冲度轴为快度轴(下同),发现两种色连接给出的末态强子的快度分布图 2(a) 在中心区有明显差别. 进一步对  $|y| < 0.8$  范围内的末态带电强子( $\pi^\pm, K^\pm, p^\pm$ ) 的动量与冲度轴夹角的余弦、相对冲度轴的横

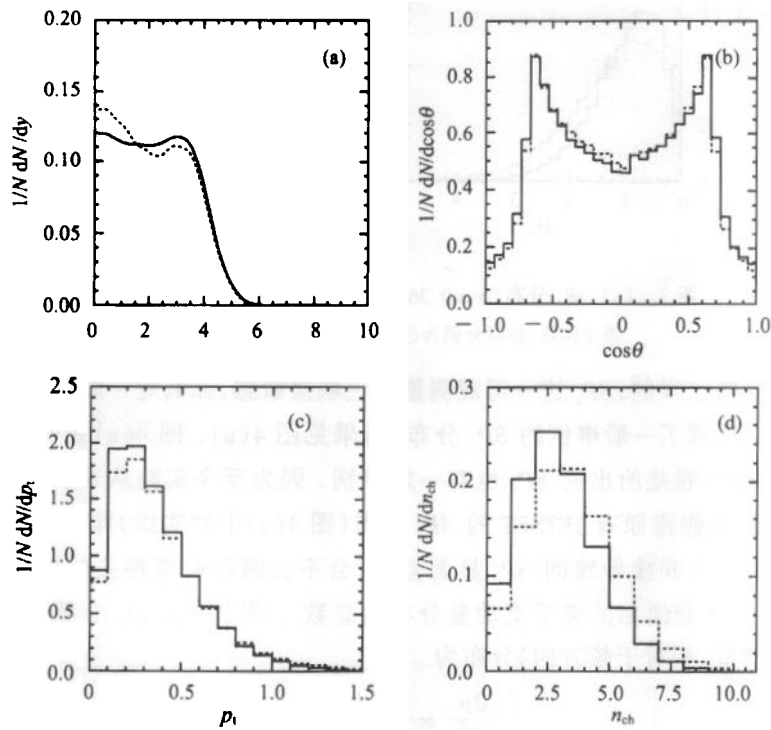


图 2 (a) 带电强子的快度分布(取冲度轴为快度轴); (b) 带电强子的极角分布(与冲度轴夹角,  $|y| < 0.8$ ); (c) 带电强子的横动量分布(相对冲度轴,  $|y| < 0.8$ ); (d) 带电强子多重数分布( $|y| < 0.8$ )  
图中实线、虚线分别为色中性流连接和色分离连接给出的结果.

动量(下同)及其多重数分布进行了 Monte Carlo 计算,结果见图 2(b)–(d). 上述结果表明,在该中心快速区,色分离联接较色中性流联接给出的末态强子,其动量与冲度轴的夹角变大、横动量变大、强子多重数明显增多. 此结果不难理解:对于这种类双喷注事例,相对色中性流联接而言,由于色分离,几个胶子形成一个闭合的色弦,使得在快速度中心区沿垂直于冲度轴方向的横向运动增加,沿冲度轴方向的纵向运动减少,因此,导致在该快速度区间末态强子的动量与冲度轴的夹角  $\theta$  变大,横动量变大,多重数增多.

考虑到上述结果,引入一个新的可观测量

$$SP_i = \sum_i |p_i|, \quad \forall |y_i| < y_0, \quad (1)$$

其中  $p_i, y_i$  分别为所选快速度区间内第  $i$  个强子的横动量和快速度.  $SP_i$  反映了两种色联接对该快速度区间内所有强子的运动方向产生的累积效果,其分布如图 3(a)所示. 图 3(a)表明,  $SP_i$  这一可观测量对色联接方式的确很敏感:色分离联接较色中性流联接给出的  $SP_i$  明显变大,其分布有显著差别.

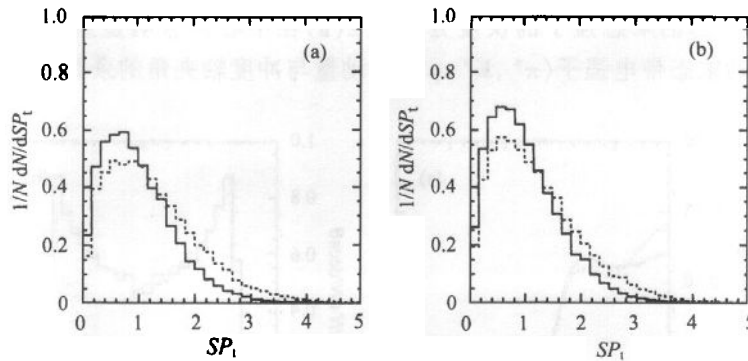


图 3 (a)  $SP_i$  分布 ( $\sigma = 0.36\text{GeV}$ ); (b)  $SP_i$  分布 ( $\sigma = 0.29\text{GeV}$ )

图中实线、虚线分别为色中性流和色分离给出的结果.

对于类双喷注事例,  $SP_i$  这一可观测量对色联接敏感,那么对一般事例,  $SP_i$  是否也敏感? 为此我们计算了一般事例的  $SP_i$  分布,结果见图 4(a). 图 4(a)表明,即使对一般事例,两种不同的色联接给出的  $SP_i$  也有一定差别. 因为至今实验从未测量过一般事例的  $SP_i$  分布,我们先假定原有 JETSET 的  $SP_i$  分布(图 4(a)中的实线)即实验分布,看看类双喷注事例中色分离联接导致的  $SP_i$  显著差别,会不会通过调整相关的模型参数而消失. 因为 JETSET 产生器给出的强子横动量分布由参数  $\sigma$  调节. 在 LUND 模型中真空激发的夸克对的横动量(相对于弦方向)分布为

$$\frac{dp}{dk^2} \propto \exp\left(-\frac{k^2}{\sigma^2}\right), \quad (2)$$

原有色中性流联接的 JETSET7.4 产生器中,  $\sigma$  的取值范围:  $350\text{MeV} - 450\text{MeV}$ , 其缺省值  $D = 0.36\text{GeV}$ <sup>[3,18]</sup>. 当我们改用色分离联接时,通过调整参数  $\sigma = 0.29\text{GeV}$ , 发现对一般事例,两种色联接给出的  $SP_i$  差别基本消除,结果见图 4(b).

现在我们用调整参数以后的 ( $\sigma = 0.29\text{GeV}$ ) 色分离工作模型再来研究上述类双喷注

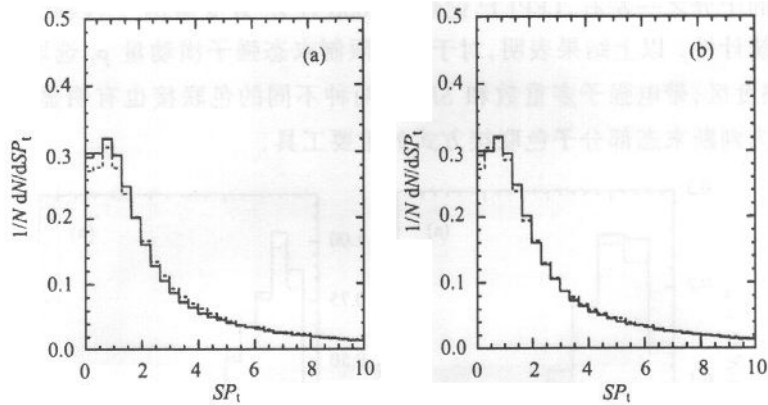


图 4 (a) 一般事例的  $SP_T$  分布(实线、虚线分别为色中性流和色分离给出的结果( $\sigma = 0.36\text{GeV}$ )); (b) 一般事例的  $SP_T$  分布(实线为色中性流给出的结果( $\sigma = 0.36\text{GeV}$ ); 虚线为色分离给出的结果( $\sigma = 0.29\text{GeV}$ ))

事例,发现  $SP_T$  差别仍然很大(图 3(b)). 这表明,对于上述双喷注事例的  $SP_T$  差别,确实源于部分子的色联接不同,不是靠调节相关参数可以消除的. 从而进一步证实图 2—3 结果:对于类双喷注轻夸克事例,不同的色联接导致了强子末态在快度中心区带电强子多重数和  $SP_T$  的显著差别. 这意味着,对非微扰 QCD,色中性流和色分离两种不同的色联接并不等价. 因此,这些可观测量可以用于判别部分子的色联接方式.

以上讨论的类双喷注事例,是在部分子级通过限制胶子的能量挑选的. 而实验只能观测强子末态,无法测量作为反应过程中间态的胶子的能量. 因此,实验能否挑出与之相应的这种特殊事例是进一步需要解决的问题.

### 3 由强子末态选取类双喷注事例

实验只能通过限制强子末态的某些可观测量来选取与上节性质相类似的类双喷注事例,我们希望,挑出的事例中尽量使上述事例占大的比重. 图 5 给出,按上一节要求通过限制胶子的能量选取的类双喷注事例末态强子的横动量分布与一般事例的比较. 此结果显示,相对一般事例,类双喷注事例的末态强子横动量要小,大多集中在小于  $0.6\text{GeV}$  范围之内. 因此,可以通过限制末态强子的横动量来选取类双喷注事例. 经过分析,取  $p_{0\perp} = 0.5\text{GeV}$ ,即所选事例中每一个末态强子横动量都小于  $0.5\text{GeV}$ . 对于这种限制强子的横动量挑选的特殊轻夸克事例,我们进行了 Monte Carlo 计算,结果发现,在  $|y| < 0.8$  快度区间,两种色联接给出的带电强子多重数和  $SP_T$  仍存在明显差别,结果见图 6(a), (b). 这种特殊事例大

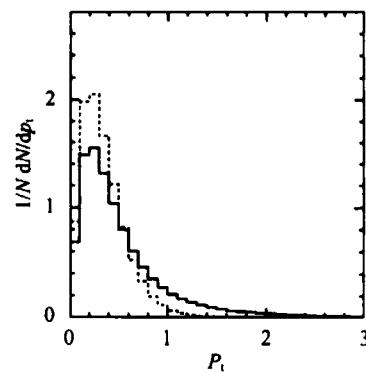


图 5 末态强子横动量分布  
实线、虚线分别为一般事例、类双喷注事例的结果.

约占总事例的千分之一左右, LEP1 已记录约 2000 万  $Z^0$  衰变事例<sup>[19]</sup>, 因此, 这种特殊事例仍有足够的统计性. 以上结果表明, 对于通过限制末态强子横动量  $p_{\perp}$  选取的类双喷注事例, 在中心快度区, 带电强子多重数和  $SP_{\perp}$  对两种不同的色联接也有明显的差别. 因此, 它们可以作为判断末态部分子色联接方式的重要工具.

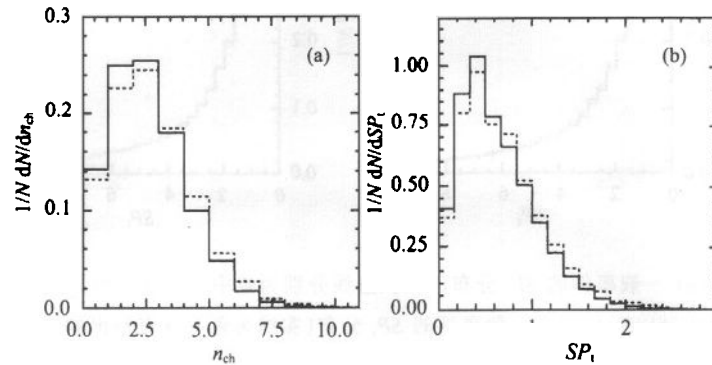


图 6 (a) 带电强子多重数分布 ( $|y| < 0.8$ ); (b)  $SP_{\perp}$  分布 ( $|y| < 0.8$ )  
实线、虚线分别为色中性流和色分离给出的结果 ( $\sigma = 0.36\text{GeV}$ ).

## 4 结果与讨论

对于通过限制胶子的能量挑选的类双喷注事例, 末态部分子的色中性流和色分离两种不同的色联接方式, 导致了强子末态在中心快度区 ( $|y| < 0.8$ ) 带电强子多重数和  $SP_{\perp}$  的显著差别. 这表明, 对于非微扰的 QCD, 两种色联接确实不等价. 那么, 哪些可观测量能给出鉴别? 实验可以通过限制末态强子的横动量选择类双喷注事例, 对于这种特殊事例, 两种不同的色联接也导致了强子末态在中心快度区 ( $|y| < 0.8$ ) 带电强子多重数和  $SP_{\perp}$  的明显差别. 因此, 非微扰的强子化究竟选取何种色联接, 可以通过与这些实验数据的比较来回答. 一般说来, 自然界既不会 100% 选取色中性流联接也不会 100% 选取色分离联接, 因此, 实验很可能在两者之间. 对于限制末态强子的横动量挑选的类双喷注事例, 目前还没有中心快度区 ( $|y| < 0.8$ ) 带电强子多重数和  $SP_{\perp}$  分布的实验测量数据, 我们上面的分析是在 JETSET7.4 已能很好拟合一般事例性质的基础上, 假设除不同色联接导致的较小差别外, 它也能基本符合类双喷注事例实验的基础上研究问题的. 所以, 如果实验测出的中心快度区 ( $|y| < 0.8$ ) 带电强子多重数和  $SP_{\perp}$  分布与图 6 两种联接的预言都偏离很远, 且形状发生变化, 则表明, JETSET 已不能正确描写这种类双喷注事例, 暴露出对 JETSET 中的强子化 LUND 模型新的挑战, 本身就有重要意义.

作者感谢 G. Gustafson, 高原宁、梁作堂教授及课题组其他成员有益的讨论.

## 参考文献 (References)

- 1 Andersson B et al. Phys. Rep., 1983, **97**:31
- 2 Webber B R. Nucl. Phys., 1984, **B238**:492; Marchesini G, Webber B R. Nucl. Phys., 1984, **B238**:1
- 3 Sjostrand T. Comp. Phys. Commun., 1994, **82**:74
- 4 Corcella G et al. JHEP, 2001, **0101**:010
- 5 WANG Qun et al. Phys. Rev., 2001, **D64**:012006
- 6 WANG Qun, Gustafson G, XIE Qu-Bing. Phys. Rev., 2000, **D62**:054004
- 7 WANG Qun, XIE Qu-Bing, SI Zong-Guo. Phys. Lett., 1996, **B388**:346;  
WANG Qun, XIE Qu-Bing. Phys. Rev., 1995, **D52**:1469
- 8 Friberg C, Gustafson G, Hakkinen J. Nucl. Phys., 1997, **B490**:289
- 9 Eden P, Gustafson G. Euro. Phys. Jour., 1999, **C8**:435
- 10 Gustafson G, Pettersson U, Zerwas P M. Phys. Lett., 1988, **B209**:90
- 11 Sjostrand T, Khoze V A. Z. Phys., 1994, **C62**:281; Phys. Rev. Lett., 1994, **72**:28
- 12 Physics at LEP2. Eds. Altarelli G, Jostrand T and Zwirner F, yellow report CERN 96 - 01, Vol.1, Pages 124, 190, 249
- 13 Gustafson G, Hakkinen J. Z. Phys., 1994, **C64**:659
- 14 Lonnblom L. Z. Phys., 1996, **C70**:107
- 15 Jin Yi et al. in preparation
- 16 SHAO Feng-Lan, XIE Qu-Bing. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**(8):710—719(in Chinese);  
(邵凤兰, 谢去病. 高能物理与核物理, 2001, **25**(8):710—719)  
SHAO Feng-Lan, XIE Qu-Bing. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, **26**(8):779(in Chinese);  
(邵凤兰, 谢去病. 高能物理与核物理, 2002, **26**(8):779)
- 17 Andersson B, Gustafson G, Soderberg B. Nucl. Phys., 1986, **B264**:29
- 18 Physics at LEP2. Eds. Altarelli G Jostrand T and Zwirner F, yellow report CERN 96 - 01, Vol. 2, P128
- 19 Bohrer A. Phys. Rep., 1997, **291**:107—217

Study of Colour Connections via Two-Jet Like Events in  $e^+e^-$  Annihilation\*

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

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

**Abstract** We study the different properties of the two-jet like events in  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow$  hadrons under different color connections with the aid of the event generator JETSET. We find that the two kinds of colour connections at the interface of perturbative and nonperturbative QCD, i. e., colour neutral flow and colour separate singlet, lead to significant differences for some observables in the final states. Therefore, the measurements of these observables can be used to distinguish these two kinds of colour connections.

**Key words** two-jet like event, colour neutral flow, colour separate singlet state hadronization

---

Received 15 January 2002

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