

两种色联接下的重子介子比 及重子反重子关联*

邵凤兰 谢去病

(山东大学物理与微电子学院 济南 250100)

摘要 在 $e^+e^- \rightarrow h's$ 反应中,末态重子介子比及重子反重子关联,在流行的强子化模型中,仅有 JETSET 事件发生器能通过调节专用附加参数较好拟合实验,被认为是检验强子化模型的最敏感可观察量.用微扰 QCD 所允许的末态部分子 100% 的色分离联接,取代 JETSET 中大 N_c 近似下的色中性流联接,对这些可观察量作了预言.并与 JETSET 原有预言及最新实验结果作了比较.发现色分离联接同样甚至更好地与这些实验符合,这表明原来用色中性流联接与这些实验事实基本符合,并不意味着色中性流就是非微扰 QCD 选择的色联接方式,100% 的色分离联接也是可能的.

关键词 色分离联接 重子介子比 重子反重子关联

1 引言

目前高能强作用过程,如 $e^+e^- \rightarrow h's$,理论上主要包括两个阶段:微扰的部分子簇射相和非微扰的强子化相.前者用微扰量子色动力学(PQCD)来描写,给出部分子末态^[1];而对于强子化过程,至今只能用某些唯象模型(如 Lund 弦碎裂模型^[1]、Webber 集团碎裂模型^[2])来描写.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($N_c \rightarrow \infty$),由于任意两个部分子颜色相同的几率为零,部分子间才具有目前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,两个部分子的颜色就有一定的几率相同.而且由 $SU_c(3)$ 群表示的直乘和约化就可以看到,对 $qg_1 \cdots g_n \bar{q}$ 的部分子末态,当 $n \geq 2$ 以后,存在多种不同的平行色组态,它意味着部分子末态有多种可能的色联接方式^[3,4].例如图 1 中,一个 $qg_1 g_2 g_3 \bar{q}$ 的部分子末态(a),将允许色中性流两种不同的联接方式图 1(b)与(c),还允许完全不同的色分离联接方式(图 1(d)).在文献[5,6]中,我们

2001-11-12 收稿

* 国家自然科学基金(10075031)资助

1) 至今,这一“末态”是通过调整 parton shower 的截断参数以拟合事例的整体性质来确定的.

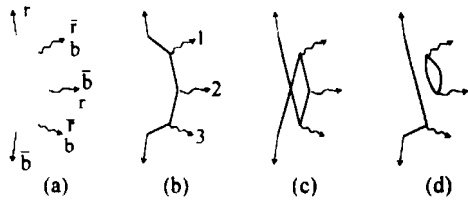


图 1

(a) 末态部分子系统; (b), (c), (d) 3 种不同的色联接.

还进一步证明了,随着末态中胶子数 n 的增加,色分离联接方式迅速增加.加上色干涉与运动学干涉的影响,色分离组态总的几率,也随 n 的增加而不断增加.这些色分离联接方式具有明显的特征,即两个或两个以上的胶子构成一个色单态子系统,从而可以独立地进行强子化.这多种不同的色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,它们是等价的.但按部分子的不同色联接方式进行强子化,结果一般应该有所不同.那么由非微扰 QCD 决定的强子化究竟选择何种色联接方式?是其中随机选取,还是选择其中某一种?因此,对它的研究可为探索非微扰 QCD 的动力学特征提供重要信息.近几年针对 e^+e^- 反应中的大快度间隔及 W^+W^- 产生中的色重组效应的大量理论、实验的研究(详见文献[7—9]及所引文献),就是这一问题的特例.

现在人们面临两个基本问题:(1) 对非微扰 QCD,不同的色联接方式能否等价?(2) 如果不等价,哪些可观测量能给出鉴别?由于理论上缺乏对非微扰 QCD 的认识,上述问题只能通过唯象模型的预言与实验的对比来回答.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 来描写,非微扰相的强子化过程则采用某些唯象模型(如 Lund 弦碎裂模型或 Webber 集团碎裂模型)来描写,QCD 微扰相与非微扰相的界面则采用大 N_c 近似下的色中性流联接.因此,研究以上两个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,只改变联接 QCD 微扰相与非微扰相界面上末态部分子系统的色联接方式.

在我们的工作^[5]中,通过严格的 PQCD 计算,研究了末态部分子的色分离单态联接的结构和几率,并构造了一个 Monte Carlo 计算的工作模型.它将 JETSET 中的色中性流联接改为色分离联接,对各种色分离单态则可取 T 权重或平均权重(T 权重是由 Lund 面积律给出的一个动力学假定^[10],文献[5]中已作了详细讨论).然后在文献[5,11]中,用上述工作模型对色分离联接导致的 $e^+e^- \rightarrow h's$ 反应中,事例的球度、冲度等整体性质,不同能量(10GeV, 30GeV, 91GeV)下各种强子产额及长寿命强子的动量谱等性质作了预言,并与实验及色中性流联接给出的结果作了比较,发现在 T 权重下色分离联接同样与所有这些实验符合.因此,由这些性质还不能对色联接方式给出鉴别.

在高能 e^+e^- 湮没反应中,超过半数的末态重子是由强子化过程直接产生的,那些由短寿命粒子衰变来的重子,也大体保留了母体的快度和运动方向,因此,有关重子产生的性质能更直接反映强子化机制.尤其是末态重子介子比及重子反重子关联,在日前流行的强子化模型中,仅有 JETSET 能通过调节专用附加参数,才能较好地拟合实验,所以被认为是检验强子化模型最敏感的可观察量^[12—15].那么,这些敏感依赖于强子化机制的可观察量是否能对强子化起点的色联接也会有较强的依赖从而对部分子末态的色联接方式给出鉴别?这是本文研究的目的.

2 重子介子比

本文中的重子介子比 R 是指在 e^+e^- 反应某一能量 \sqrt{s} 时,产生的某类重子 B 与某类介子 M 的平均产额的比例,即

$$R = \langle B \rangle / \langle M \rangle, \tag{1}$$

式中 $\langle B \rangle$ 为某类重子的平均产额, $\langle M \rangle$ 为某类介子的平均产额. R 随反应总能量 \sqrt{s} 的变化,比分别观察 $\langle B \rangle$ 及 $\langle M \rangle$ 随 \sqrt{s} 的变化更能综合检验强子化模型. 现有的 $\sqrt{s} \sim 10\text{GeV}$, $\sim 30\text{GeV}$, $\sim 90\text{GeV}$ 3 个能量下的 R 实验数据显示,尽管 $\langle B \rangle$ 与 $\langle M \rangle$ 都随能量增加,但它们的比例 R ,在上述较宽的能量范围呈现这样一个趋势:在 $10\text{--}30\text{GeV}$ 范围,成倍增加,但在 $30\text{--}90\text{GeV}$ 范围,这一比值 R 趋于饱和. 对于这一实验规律,HERWIG 不能描写,色中性流联接下的 JETSET 虽能给出与实验基本符合的结果,但它主要是依靠调节专用附加参数 $p(qq)/p(q)$ 来拟合,在 $\sqrt{s} \sim 10\text{GeV}$ 能量下, $p(qq)/p(q) = 0.06$,在 $\sqrt{s} \sim 30\text{GeV}$, $\sim 90\text{GeV}$ 两个能量下, $p(qq)/p(q) = 0.1$. 但在 JETSET 中,强子化过程由 Lund 弦碎裂模型描写,在这模型中,该参数是联接 PQCD 末态两个部分子间的色弦场从真空中激发产生新的双夸克

表 1 质心系能量 $\sqrt{s} = 10\text{GeV}, 30\text{GeV}, 91\text{GeV}$ 时的重子介子比

\sqrt{s}/GeV	强子	Data	JETSET	
			CFC	CSC
91.0	$\frac{p}{\pi^+}$	0.062 ± 0.003	0.071^*	0.064
	$\frac{p}{K^+}$	0.467 ± 0.024	0.520^*	0.473
	Λ/K^+	0.167 ± 0.006	0.167	0.152^*
	$\frac{\Sigma(1385)^+}{K^{*+}}$	0.0646 ± 0.0066	0.0670	0.0607
	$\frac{\Xi(1530)^0}{K^{*0}}$	0.0075 ± 0.0007	0.0049^*	0.0045^*
30.0	$\frac{p}{\pi^+}$	0.062 ± 0.005	0.065	0.057
	$\frac{p}{K^+}$	0.432 ± 0.043	0.453	0.407
	Λ/K^+	0.139 ± 0.011	0.141	0.126
	$\frac{\Sigma(1385)^+}{K^{*+}}$	0.0516 ± 0.0131	0.0553	0.0468
	$\frac{\Xi(1530)^0}{K^{*0}}$		0.0045	0.0038
10.0	$\frac{p}{\pi^+}$	0.038 ± 0.003	0.056^*	0.047^*
	$\frac{p}{K^+}$	0.281 ± 0.022	0.349^*	0.301
	Λ/K^+	0.089 ± 0.009	0.109^*	0.094
	$\frac{\Sigma(1385)^+}{K^{*+}}$	0.0393 ± 0.0086	0.0410	0.0332
	$\frac{\Xi(1530)^0}{K^{*0}}$	0.0052 ± 0.0021	0.0035	0.0031

表中 Data 值由文献[16]中的结果整理得到;* 表示计算结果超过了实验的两个标准偏差;CFC 表示色中性流联接;CSC 表示色分离联接.

对的几率 $p(qq)$ 与产生夸克对的几率 $p(q)$ 之比. 按照量子隧道效应, 色弦场从真空中激发产生质量为 m 的一对粒子的几率正比于 $\exp(-\pi m^2/\kappa)^{11}$, 所以该参数为

$$p(qq)/p(q) = \exp(-\pi \bar{m}_{qq}^2/\kappa)/\exp(-\pi \bar{m}_q^2/\kappa) = \exp(-\pi(\bar{m}_{qq}^2 - \bar{m}_q^2)/\kappa),$$

其中 π 与 $\kappa = 1\text{GeV}/\text{fm}$ 是常数, 它只由夸克和双夸克的平均质量 \bar{m}_q 及 \bar{m}_{qq} 决定, 只是由于 \bar{m}_q 及 \bar{m}_{qq} 值无法测定, 只能通过拟合实验测量的重子介子比来确定. 但这一参数本身显然不应随反应的总能改变.

我们在 3 个能量下统一取 $p(qq)/p(q) = 0.1$, 分别给出色分离与色中性流两种联接下的重子介子比. 可以预期: 色分离单态的出现, 使原来的一个色单态系统强子化变成了两个子单态系统独立地强子化, 每一个独立强子化系统的质心能量减少, 因此, 由色分离联接 (CSC) 给出的重子介子比将较由色中性流联接 (CFC) 给出的结果要小. 这一定性趋势与表 1 中 JETSET 分别用 CSC 及 CFC 计算的结果所证实.

表 1 结果显示, 在 $\sqrt{s} \sim 30\text{GeV}$, $\sim 90\text{GeV}$ 两个能量下, 两种不同的色联接方式预言的结果都与实验基本符合, 但是, 在 $\sqrt{s} \sim 10\text{GeV}$ 能量下, 色中性流联接预言的结果大多与实验不符, 只有调整 $p(qq)/p(q) = 0.06$ 时才能较好地拟合实验; 而色分离联接却在不调整该参数的情况下就较好地符合实验. 上述事实表明, 色分离联接比色中性流联接给出的末态重子介子比更符合实验.

3 重子反重子关联

重子与反重子间的各种关联是检验强子化机制的重要可观察量, 相对色中性流联接而言, 当部分子以色分离联接方式强子化时, 由原来的一个强子化系统变成了两个独立强子化系统. 由于独立强子化系统变小, 重子反重子的各种关联有可能变强. 这一定性趋势与计算得出的表 2 结果一致.

重子反重子快度关联指的是重子反重子 ($B\bar{B}$) 成对出现的几率随重子 B 和反重子 \bar{B} 之间的快度差 $\Delta y = |y_B - y_{\bar{B}}|$ 变化的关系, y_B 代表重子的快度, 其定义如下:

$$y_B = \frac{1}{2} \ln \frac{E_B + p_{BL}}{E_B - p_{BL}}, \quad (2)$$

式中 E_B 代表重子的能量; p_{BL} 代表重子的动量在冲度轴方向的分量. $y_{\bar{B}}$ 代表反重子的快度, 其定义与上式类似. 用两种不同的色联接, 在 $\sqrt{s} = 91\text{GeV}$ 时, 作了 Monte Carlo 计算, 给出 $P\bar{P}$, $\Lambda\bar{\Lambda}$ 和 $P\bar{\Lambda}/\Lambda\bar{P}$ 快度关联分布, 结果见图 2—图 4 及表 2 (JETSET 中的 “popcorn” 参数取其 default 值).

表 2 为两种完全不同的色联接方式给出的 $P\bar{P}$, $\Lambda\bar{\Lambda}$ 和 $P\bar{\Lambda}/\Lambda\bar{P}$ 的快度关联强度 $\frac{1}{n_{\text{pair}}}$ 的分布. 表 2 显示, 对于 $P\bar{P}$, $\Lambda\bar{\Lambda}$ 两种色联接方式预言的快度关联强度差别不大, 而 $P\bar{\Lambda}/\Lambda\bar{P}$ 的快度关联强度差别较大. 而对于 $P\bar{\Lambda}/\Lambda\bar{P}$, 两种色联接预言的结果有一定差别. 尽管都比实验强得多, 但色分离联接比色中性流联接预言的快度关联强度小, 与实验更接近一些.

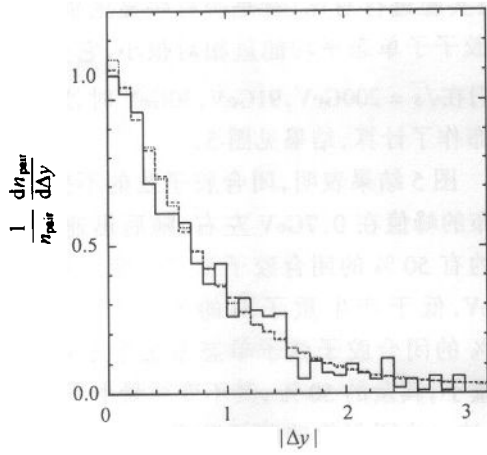


图 2 PP 快度关联

—实验数据,----,.....分别为色中性流联接和色分离联接给出的结果.实验数据取自文献[17].

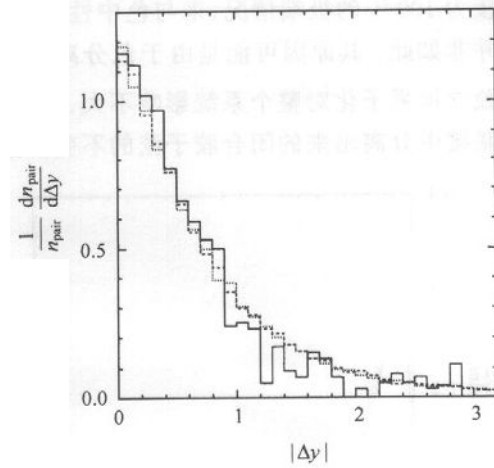


图 3 Lambda-Lambda-bar 快度关联

—实验数据,----,.....分别为色中性流联接和色分离联接给出的结果.实验数据取自文献[17].

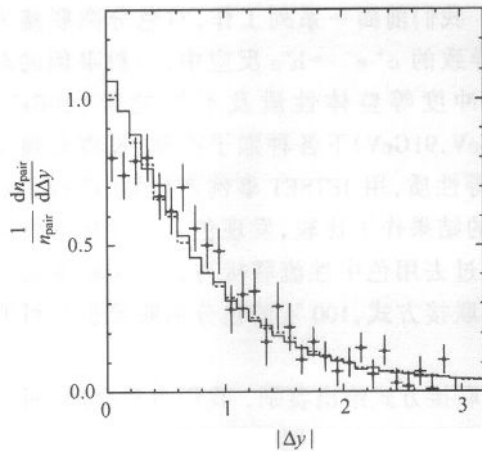


图 4 P-Lambda-bar / Lambda-P 快度关联

—,----分别为色中性流联接和色分离联接给出的结果,·为 DELPHI 的实验数据(取自文献[17]).

表 2 质心系能量 $\sqrt{s} = 91\text{GeV}$ 时,重子反重子的关联强度

Baryon Pair	Data	JETSET7.4	
PP	1.05 ± 0.06	1.07	
$\Lambda\bar{\Lambda}$	1.14 ± 0.08	1.11	
$P\bar{\Lambda}/\Lambda\bar{P}$	0.77 ± 0.08	1.01	0.98

Data 取自文献[17].

利用同样的方法,对重子反重子味道关联也作了 Monte Carlo 计算,发现两种色联接给出的结果差别不大.

4 结论与讨论

因为实验已表明, e^+e^- 反应中的一般(unbiased)事例的有关重子产生的性质,对强子化机制有较强的依赖,我们预期它们有可能对强子化起点的色联接方式也会有较强的依赖,为了突出不同色联接,取与通常色中性流联接完全不同的色分离联接,而且取色分离

联接为 100% 的极端情况, 来与色中性流联接及实验进行对比, 看是否有明显区别, 但结果并非如此. 其原因可能是由于色分离出来的胶子子单态平均能量相对很小, 它分离出来独立地强子化对整个系统影响不大. 为此我们在 $\sqrt{s} = 200\text{GeV}, 91\text{GeV}, 30\text{GeV}$ 时, 对色分离联接中分离出来的闭合胶子弦的不变质量分布作了计算, 结果见图 5.

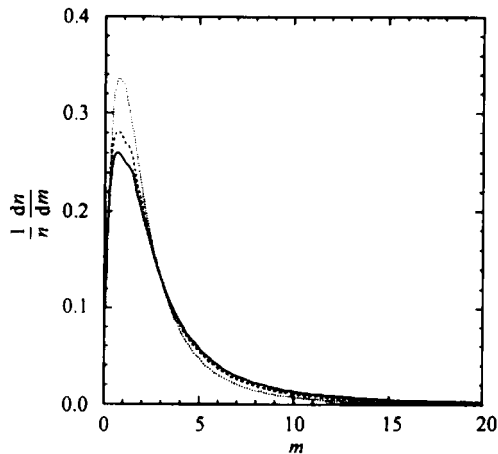


图 5 闭合胶子弦的不变质量分布
—, ---, 分别为 $\sqrt{s} = 200\text{GeV}, 91.0\text{GeV}, 30\text{GeV}$ 下的结果.

图 5 结果表明, 闭合胶子弦的不变质量分布的峰值在 0.7 GeV 左右, 随后迅速下降, 大约有 50% 的闭合胶子弦其不变质量小于 2 GeV, 低于产生重子对的阈能, 因此在这 50% 的闭合胶子弦子单态系统中不可能产生重子, 其余的 50%, 其不变质量也不大, 所以, 这一小团很软的胶子分离出来独立强子化对重子反重子的快度、味道关联不会造成大的影响. 因此, 由色分离和色中性流两种联接方式强子化对一般事例给出的重子反重子快度、味道关联差别不大.

我们前面一系列工作, 对色分离联接方式导致的 $e^+e^- \rightarrow h's$ 反应中, 一般事例的球度、冲度等整体性质及不同能量 (10 GeV, 30 GeV, 91 GeV) 下各种强子产额, 长寿命强子

的动量谱, 重子、介子比, 重子、反重子各种关联等性质, 用 JETSET 事例产生器, 进行了系统、全面的研究, 并与实验及色中性流联接预言的结果作了比较, 发现色分离联接同样甚至更好地与所有这些实验符合. 这充分证实了, 过去用色中性流联接与这些实验事实符合, 并不表明色中性流联接就是自然界选择的色联接方式, 100% 的色分离联接也是可能的.

对于一般事例, 上述一系列性质还不能对色联接方式给出鉴别. 我们自然会问, 对非微扰 QCD, 是两种完全不同的色联接真正等价, 还是两者的差别被背景掩盖? 那么对于某种特殊事例, 在特殊相空间, 是否有敏感可观测量能对色联接方式给出鉴别? 这是需要进一步探索的问题.

作者感谢梁作堂教授、李世渊博士及其他课题组成员的有益讨论.

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 Friberg C, Gustafson G, Hakkinen J. Nucl. Phys., 1997, **B490**: 289
- 4 WANG Qun, XIE Qu-Bing. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1995, **19**: 1100 (in Chinese)
(王群, 谢去病. 高能物理与核物理, 1995, **19**: 1100)
- 5 WANG Qun, Gustafson G, XIE Qu-Bing. Phys. Rev., 2000, **D62**: 054004
- 6 WANG Qun et al. Phys. Rev., 2001, **D64**: 012006

- 7 Physics at LEP1, Eds. Altarelli G et al. Yellow Report CERN 96 - 01, 1:198
- 8 SI Zong-Guo, XIE Qu-Bing, WANG Qun. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, 22:307(in Chinese)
(司宗国, 谢去病, 王群. 高能物理与核物理, 1998, 22:307)
- 9 Abreu P et al. Eur. Phys. J., 2000, C18:203; Abbiendi G et al. Phys. Lett., 1999, B453:153
- 10 Andersson B, Gustafson G, Soderberg B. Nucl. Phys., 1986, B264:29
- 11 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)
- 12 WANG Qun, SI Zong-Guo, XIE Qu-Bing. Int. J. Mod. Phys., 1996, A11:5203
- 13 Angelis A D. J. Phys., 1993, G19:1233
- 14 SI Zong-Guo, XIE Qu-Bing, WANG Qun. Commun. Theor. Phys., 1997, 28:85
- 15 SI Zong-Guo, XIE Qu-Bing. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, 23:445(in Chinese)
(司宗国, 谢去病. 高能物理与核物理, 1999, 23:445)
- 16 Particle Data Group. Eur. Phys. J., 2000, C15
- 17 DELPHI Collab, Abreu P et al. Phys. Lett., 1998, B416:247

Ratio of Baryon to Meson and Baryon Antibaryon Correlation in e^+e^- Annihilation under Two Kinds of Color Connections^{*}

SHAO Feng-Lan XIE Qu-Bing

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

Abstract The ratio of final baryon to meson and baryon antibaryon correlation in e^+e^- annihilation are considered as sensitive observables to test the hadronization models, because among the results obtained in different popular hadronization models, only those from JETSET event generator can fit experimental data by adjusting extra ad hoc parameters. We replace the color neutral flow connection, which is the results in large N_c limit and is used in JETSET, with the color separate connection, which is allowed by PQCD, and calculate these observables. We compare the obtained results with those from the standard JETSET7.4 code and the available experimental data. We find that the results and the relevant properties are consistent with data. This shows that the consistency of the data with the results from the standard JETSET7.4 code for these properties does not mean that the traditional color neutral flow is the only color connection selected by NPQCD. The 100% color separate connection is also possible.

Key words color separate connection, $\langle B \rangle / \langle M \rangle$ ratio, baryon antibaryon correlation

Received 12 November 2001

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