

# BEPC 能区强子事例形态特性及模拟\*

祁向荣 陈江川 胡海明 胡 涛 黄光顺 巨 新 李 金  
李新华 毛泽普 薛生田 赵政国 郑志鹏 周 莉

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 利用北京谱仪(BES)在3.55GeV附近采集的数据和国际上已发表的数据,研究了北京正负电子对撞机(BEPC)能区强子事例形态特征的分布,对LUND模型的JETSET7.4产生子作了仔细研究,并得到与低能实验数据相符的模型参数.

**关键词** BEPC 能区 强子事例 LUND 模型

## 1 引言

正负电子对撞产生强子事例最基本的过程是

$$e^+e^- \rightarrow \gamma^* / Z \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{强子}. \quad (1)$$

末态强子的分布带有初始夸克反夸克胶子动量方向的信息,表现为强子喷注现象,这已为实验所证实<sup>[1]</sup>. 正负电子通过 $\gamma^* / Z$ 湮没为一对夸克的过程可以由理论进行精确计算,然而夸克到强子的转化过程属于非微扰问题,现在还没有可靠的计算方法. LUND组根据实验观察到的弦效应(即三喷注末态中夸克反夸克和胶子之间产生的粒子统计性地多于夸克和反夸克之间的粒子),用夸克反夸克(胶子)组成的强色弦在其质心系中碎裂图象描述了强子化过程<sup>[2]</sup>,较好地处理了色守恒与能量动量守恒问题. LUND模型的产生子JETSET能非常好地模拟高能区( $> 10\text{GeV}$ )正负电子湮没过程中的连续区(非共振)强子产生,但在中低能区(2—5GeV),JETSET所采用的某些高能近似条件并不能很好地得到满足. 在原理上,LUND弦模型作为强子化的一般性图象,其本身并不只局限于高能区,但由于对中低能区强子事例的实验特征缺乏系统研究,以及模型的理论计算和模拟程序化方面存在很多困难,它在中低能区的具体应用却一直是一个空白. 这一状况困扰着对许多重要物理问题的精确分析.

QED 跑动耦合常数 $\alpha(s)$ 和 $\mu$ 轻子的反常磁矩 $a_\mu$ 是对标准模型进行检验的两个基本参

1998-03-26收稿

\* 中国科学院基金资助

数,目前这两个参数的不确定性主要来自 1—5GeV 的  $R$  值实验测量误差(高达 15%)<sup>[3]</sup>. 中低能区  $R$  值的精确测量是检验标准模型的一个重要工作,为当今国际高能物理学界所关注. 实验上强子事例探测效率的确定是影响  $R$  值测量精度的一个重要因素,而它只能借助于某种强子事例产生子由蒙特卡罗模拟方法给出,故选择并确定一个合适的强子事例产生子就显得尤为重要.

BES 实验对  $J/\psi$ 、 $\psi'$  和  $D_s$ 、 $D_s'$  共振区的强子已经进行了很多研究<sup>[4]</sup>,本工作则利用 BES 在 3.55GeV 能量附近采集的约  $5\text{pb}^{-1}$  数据,研究了 BEPC 连续能区强子事例形态特征分布. 本文将根据 BES 实验得到的强子事例的特征,讨论 LUND 模型在低能区的行为,并将模型和实验分布作了仔细的比较,最终得到与实验相符的模型参数.

## 2 模拟研究方法

由于 JETSET 的缺省参数设置是通过拟合高能区实验结果调整得到的,它在 BEPC 能区应用的可靠性及与实验数据的符合程度还没有经过系统地分析检验. 首先,将 JETSET 所产生的强子事例直接与国际上已发表的实验数据进行比较,研究 JETSET 在模拟低能区强子事例特征时的性质,讨论低能区对其碎裂机制敏感的参数的调整范围. 然后,再对这些强子事例作探测器模拟,即把 JETSET 作为一个强子事例产生子放入 BES 的探测器蒙特卡罗模拟软件包 SOBER<sup>[5]</sup> 框架中,模拟强子事例在对撞顶点的产生及不稳定粒子在束流管中的衰变过程. 粒子进入探测器后与物质的相互作用,其衰变与追踪等过程全部由 SOBER 完成. 对模拟数据的重建及强子事例的判选均与实验数据的处理相同. 在此基础上,研究由 LUND 模型产生并经探测器模拟后强子事例的形态特征分布再与 BES 实验数据相比较,根据比较结果调整并得到合适的模型参数值.

## 3 参数缺省值的 LUND 模型在低能区的性质

本文利用已发表的实验数据是  $e^+e^-$  对撞生成强子末态的事例特征分布,主要包括:强子事例平均带电多重数  $\langle N_{\text{ch}} \rangle$  分布、KNO 标度<sup>[6]</sup>分布、费曼标度变量  $x_p^{[7]}$  分布、球度  $S^{[1]}$  分布. 图 1 是缺省参数的 LUND 模型直接与已发表的实验数据的比较,它显示模型在低能区的大部分特性与实验数据符合较好,例如  $\langle N_{\text{ch}} \rangle$  分布、KNO 标度分布、 $x_p$  分布. 但是从图 1 可以看到 LUND 模型在低能区所产生事例的球度特征明显强于实验结果,即模型所预言的强子事例的喷注特性较实验中所观察到的更为显著.

BES 在 3.55GeV 能量附近采集的总积分亮度约为  $5\text{pb}^{-1}$  的对撞事例,从中挑选末态为强子的所有事例. 由于强子没有特征的事例拓扑可以遵循,因此采用排除本底的方法来选择强子事例. 其主要本底包括:宇宙线事例、束流与管壁及气体分子相互作用造成的本底事例、轻子对事例,如  $e^+e^- (\gamma)$ ,  $\mu^+\mu^- (\gamma)$ ,  $\tau^+\tau^-$  (在  $\tau$  阈以上)、双光子过程的本底等. 余下事例中只保留  $|\cos\theta| \leq 0.8$  范围内带电径迹数  $N_{\text{ch}} \geq 2$  且满足能动量平衡的判选条件的事例. 对  $N_{\text{ch}} = 2$  的事例要求非共面角大于  $20^\circ$ ,以排除可能的  $e^+e^- (\gamma)$ ,  $\mu^+\mu^- (\gamma)$  污染.

图 2 是利用这些数据得到的反映强子形态特征的各种分布与模拟强子事例的比

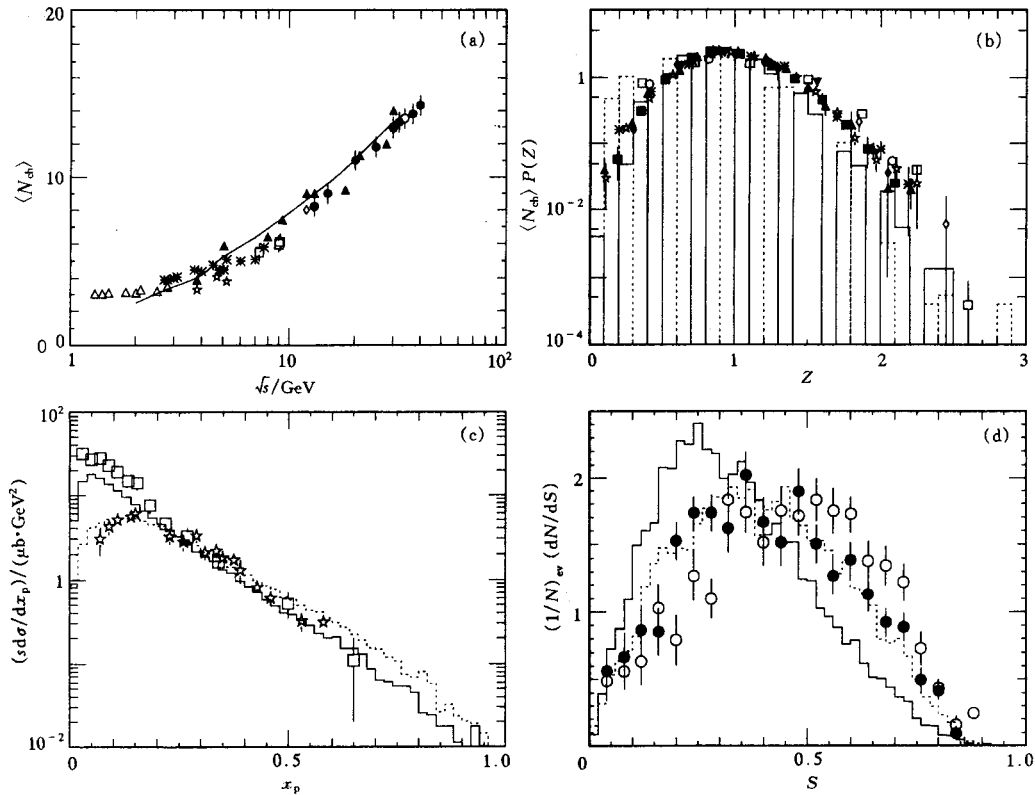


图 1 模型产生的数据与已发表实验数据的比较

- (a) 平均带电多重数分布.  $\Delta$ ADONE; \* MARKII;  $\blacktriangle$ PLUTO;  $\star$ DASP;  $\square$ LENA;  $\diamond$ CLEO;  $\bullet$ TASSO;  $\circ$ JADE.
- (b) KNO 标度分布. \* PLUTO 14GeV;  $\star$ PLUTO 30.6GeV;  $\circ$ PLUTO 3.6GeV;  $\square$ PLUTO 5.0GeV;  $\diamond$ PLUTO 7.0GeV;  $\blacktriangle$ PLUTO 34GeV;  $\blacksquare$ TASSO 22GeV;  $\blacktriangledown$ LENA 7.4GeV.
- (c) 费曼标度变量分布.  $\square$ TASSO 13GeV;  $\star$ DASP 5GeV.
- (d) 球度分布.  $\bullet$ 7.0GeV;  $\circ$ 5.5GeV.

图中实线和虚线表示参数缺省值的 JETSET7.4 的模拟结果, 符号为实验值.  $\langle N_{ch} \rangle$ 、KNO、 $x_p$ 、 $S$  实验数据分别摘自文献 [9—16]、[13, 16, 17]、[7, 20]、[21].

较, 模拟事例是由参数缺省值的 LUND 模型产生并经过了探测器模拟得到的. 与图 1 相比, 增加了同样也反映事例喷注特征的冲度  $T^{[18, 19]}$  分布, 以及与之相关的扁度  $O$ 、非平面度  $A$  分布的对比; 另外还有末态粒子角分布 ( $\cos\theta_p$ )、事例喷注轴角分布 ( $\cos\theta_j$ ); 在研究夸克强子化过程中, 把事例的球度轴用作强子喷注系统的轴<sup>[3, 8]</sup>, 快度  $y$  分布和平均横动量都是相对于喷注轴而言的, 其中  $p_{T, in}$  是横动量在由喷注轴和束流轴所组成的“喷注平面”内的分量,  $p_{T, out}$  是横动量在垂直于该平面方向的分量, 它们反映了夸克强子化过程中喷注系统的横向特征. 由图 2 看到, 在多数形态特征分布上, 二者没有明显差别. 但是模拟事例的球度偏小, 冲度偏大, 即模拟强子事例的喷注特性强于 BES 实验中所观察到的结果.

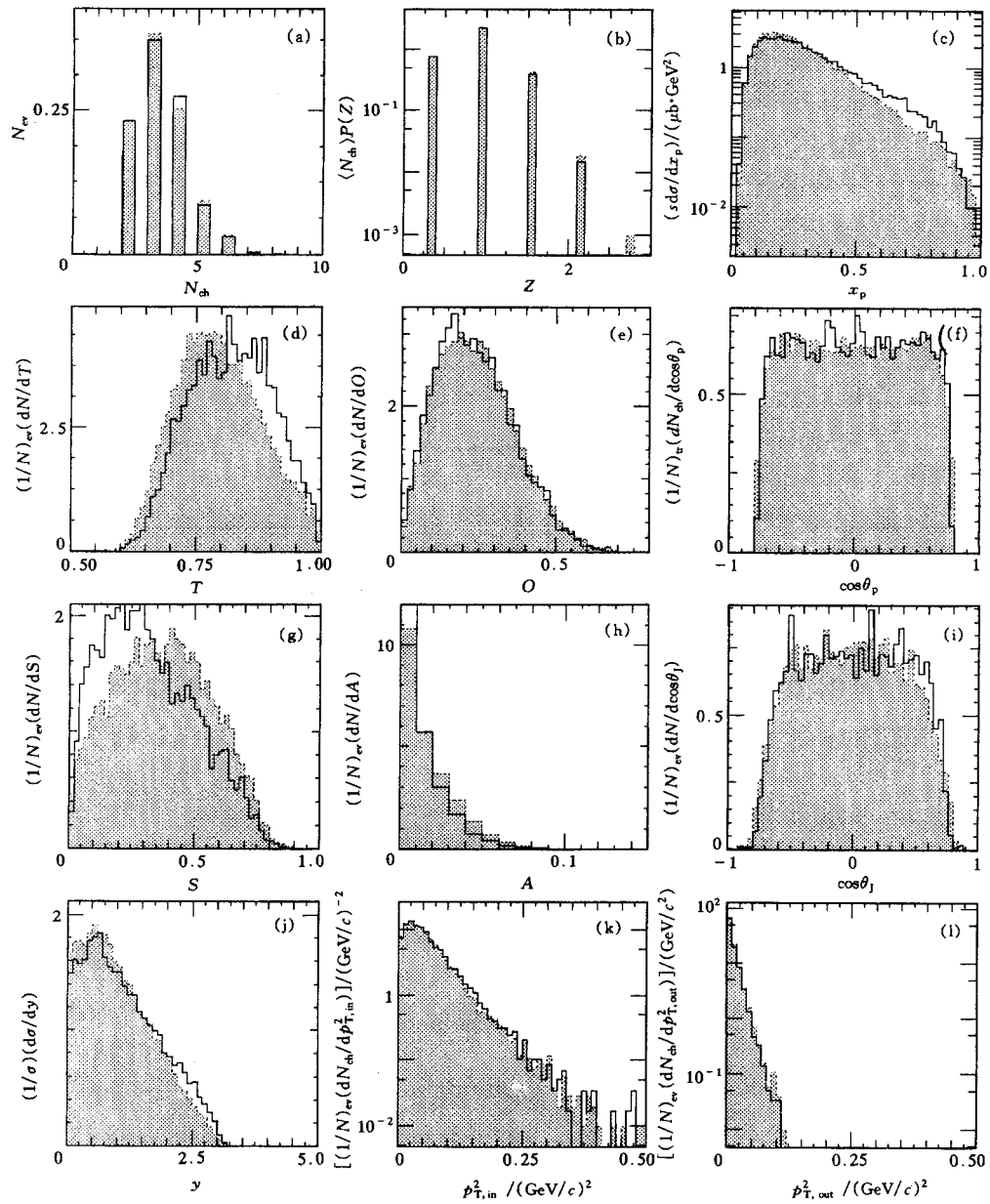


图2 模型产生并经过探测器模拟的强子事例与BES在3.55GeV能量的实验数据的比较

实线表示缺省参数的JETSET7.4的模拟结果,阴影部分表示BES实验数据.

#### 4 LUND 模型碎裂参数的调整

通过前面对缺省参数的 LUND 模型与实验数据的比较,已经看到 LUND 模型所预言的低能区强子事例喷注现象强于实验已经观测到的结果. 下面研究调整 LUND 模型中碎裂参数来改善模型的喷注结构特性. 由于 LUND 模型中弦碎裂是一个比较复杂的过程,调

整产生子中一个参数值可能会对模型特性的其它方面产生影响,所以在调整模型中一些对喷注结构比较敏感的参数时,还需要调整另外一些参数来减少其负面影响.

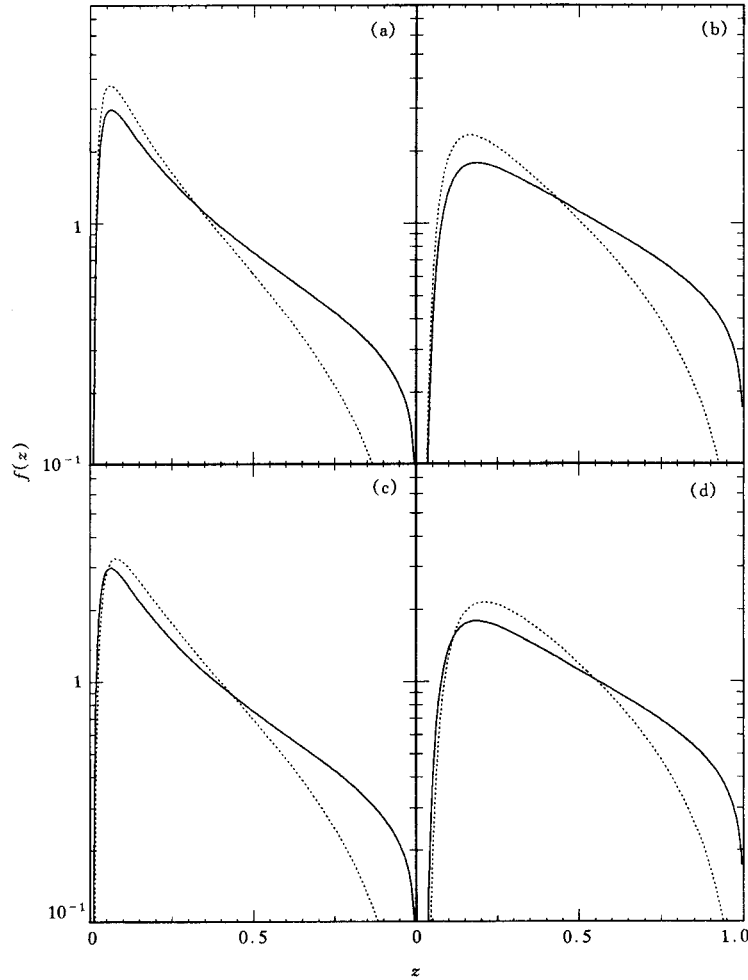


图 3 归一化的 LUND 碎裂函数分布

实线表示参数  $a, b$  取缺省值, 虚线表示参数取调整值.

参数缺省值:  $a = 0.3, b = 0.58$ ; (a)、(c) 中  $m_{\perp} = m_{\pi}$ ; (b)、(d) 中  $m_{\perp} = m_k$ .

调整后的参数值: (a)  $a = 1.5, b = 0.58$ ; (b)  $a = 1.5, b = 0.58$ ;

(c)  $a = 1.5, b = 0.78$ ; (d)  $a = 1.5, b = 0.78$ .

LUND 模型中的弦碎裂由碎裂函数描述, 其形式为

$$f(z) \propto z^{-1}(1-z)^a \exp\left(\frac{-bm_{\perp}^2}{z}\right), \quad (2)$$

式中  $z = \frac{(E + p_z)_{\text{hadron}}}{(E + p_z)_{\text{q}}}$  表示末态强子在夸克弦碎裂过程中获得的纵向光锥动量份额;  $a, b$

是 LUND 模型碎裂函数中的可调参数, 它们对碎裂末态的喷注特性及强子的能动量分布

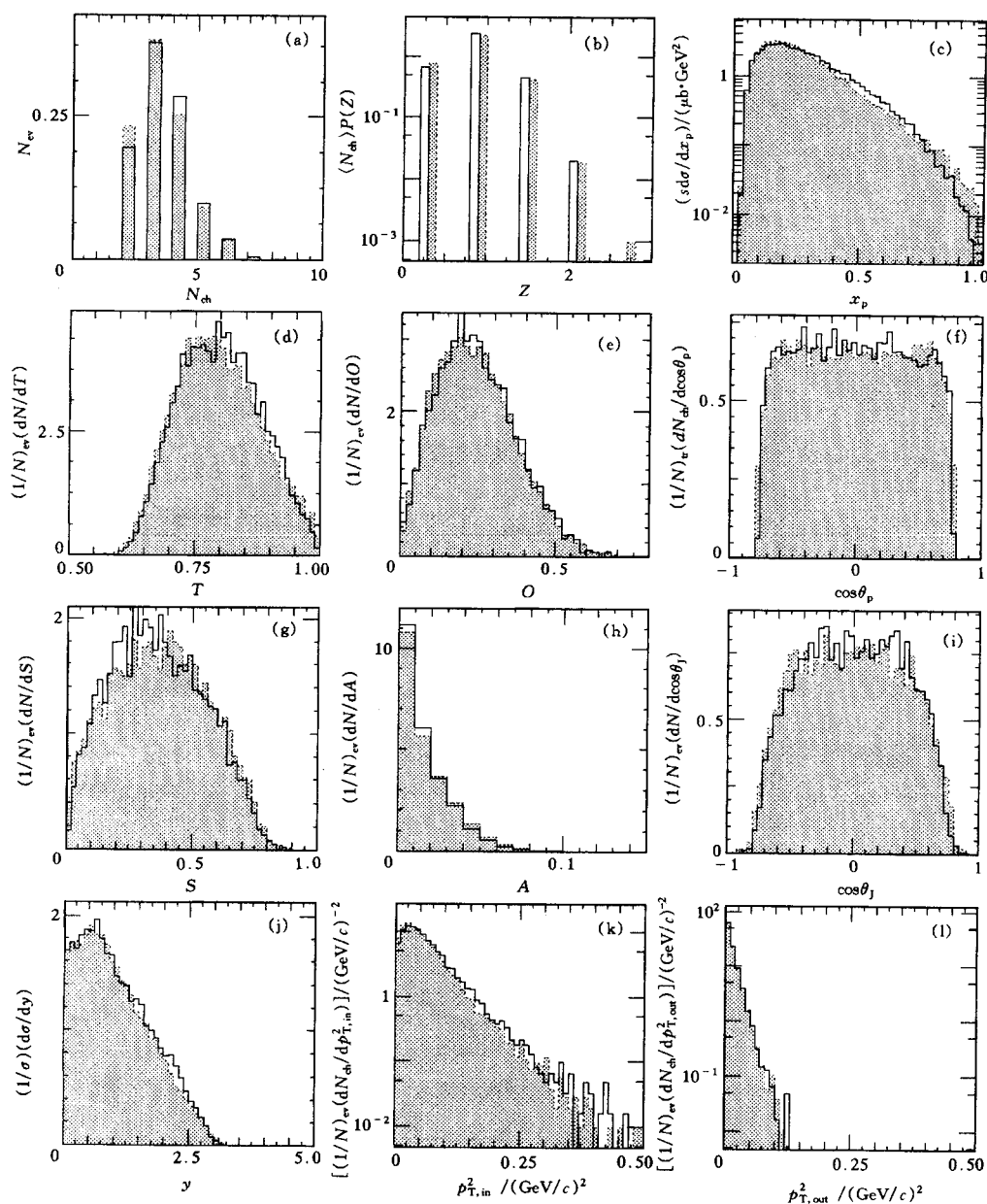


图4 模型产生并经过探测器模拟的强子事例与BES 3.55GeV能量实验数据的比较

实线表示调整参数值的JETSET7.4的模拟结果,阴影部分表示BES实验数据.

图中模型所用的参数调整值见表1.

有直接影响. 图3是当碎裂参数取不同值时碎裂函数的变化,图中显示:当 $a$ 值增大时, $z$ 值较小的强子数增多,这意味着末态强子的纵向光锥相空间平均变小. 另外,模型中对夸克反夸克色弦系统的碎裂设置了一个阈值 $W_{\min}$ ,色弦的剩余能量小于 $W_{\min}$ 时,它就停止碎裂,弦剩余能量直接产生一对强子, $W_{\min}$ 减小,使这对强子各向异性程度减小,喷注结构不明显,球度趋向变大. 但是色弦剩余能量过小会使大质量粒子的产生受到相空间的严重

约束, 考虑到 BEPC 能区夸克强子化过程中 $\pi$ 介子的产生,  $W_{\min}$  值至少应高于一对 $\pi$ 介子的质量.

增大参数  $a$  和减小  $W_{\min}$  的值虽然能改善模型的喷注结构, 但是由于末态强子相空间的减小, 导致事例的多重数增加过多, 横动量也变得过小. 从图 3 看到增大参数  $b$  的值能减少  $Z$  特别小的强子产额, 这能改善事例多重数分布. 模型中假设末态强子相对于喷注轴的横动量分布是一个近似的高斯分布,  $\sigma$  反映高斯分布的宽度. 增大  $\sigma$  值有利于增大末态强子的横动量分布和减小事例的多重数分布, 改善因为调整参数  $a$  和  $W_{\min}$  而对模型其它形态特征分布带来的负面影响. 表 1 是本文选择的 JETSET7.4 应用于低能区的一套参数, 利用这组参数的 LUND 模型在低能区抑制了次级强子纵向运动相空间, 增大了它们横向运动相空间. 表 1 给出所选择的各参数值.

表1 JETSET7.4适用于低能区的参数值

| 参 数 | $a$<br>(default=0.3) | $b / \text{GeV}^{-2}$<br>(default=0.58) | $\sigma / \text{GeV}$<br>(default=0.36) | $W_{\min} / \text{GeV}$<br>(default=0.8) |
|-----|----------------------|---|---|--|
| 参数值 | 1.5                  | 0.78                                    | 0.45                                    | 0.5                                      |

图 4 是调整参数后的 LUND 模型与 BES 实验数据的比较, 与图 2 相比较可以看到 LUND 模型的喷注结构 (球度和冲度分布) 已经得到了明显改善; 同时多重数和横向分布

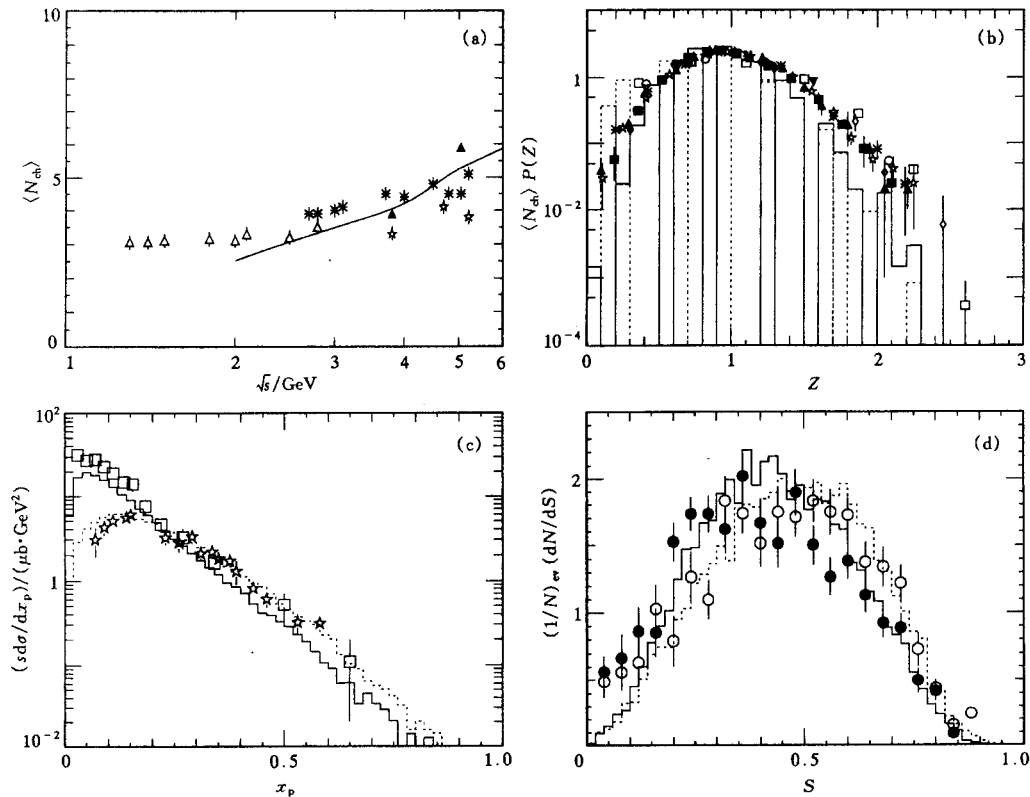


图5 模型产生的数据与发表数据的比较 (图例与图1相同)

也与实验数据相符合。图 5 是调整参数后的 LUND 模型与其它实验组结果的比较, 图中显示, 模拟事例在 5—7 GeV 能区的球度分布得到改善, 其它形态特征分布, 如多重数和横向分布等也与实验数据符合。

## 5 总结与讨论

通过蒙特卡罗模拟与国际上已发表的实验结果的比较, 表明 LUND 模型在高能区能够很好地描述强子事例的产生。本文研究了 BES 在 3.55 GeV 附近得到的正负电子对撞产生的强子事例性质, 并与 LUND 模型产生的事例作比较。研究发现低能区 LUND 模型所预言强子事例的平均多重数、极角、横动量分布与实验基本一致; 而动量、快度、扁度及非平面度分布稍有差别。但在描述事例喷注的整体特性, 即球度和冲度分布方面, 与实验数据存在明显差异, 其喷注特征明显强于 BES 实验结果。经过研究并确定了适合低能区的 LUND 模型碎裂参数, 使模拟强子事例的球度和冲度分布得到明显改善。其它的一些分布如快度、动量、扁度及非平面度分布也与低能区的实验符合得较好。这使得 JETSET 在 BEPC 能区的  $R$  值测量及各种物理分析研究中将得到广泛应用。

本文所采用的 BES 在 3.55 GeV 附近的数据是在 BES 合作组全体成员的共同努力下获得的, BES 数据组、刻度组为这批数据重新作了重建工作。LUND 组的 B. Andersson 和 T. Sjostrand 和高能所四室的台安、物理一室的朱永生和张达华在讨论中提供了有益的建议, 在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Bjorken J D, Brodsky S J. Phys. Rev., 1970, **D1**:1416
- 2 Andersson B, Gustafson G, Sjostrand T. Z. Phys., 1980, **C6**:235; Sjostrand T. Computer Physics Commun, 1982, **27**:243; Sjostrand T. Computer Physics Commun, 1994, **82**:74
- 3 Zhao Z G. BES Group ed. Proc of the 6th BES Annual Meeting. Beijing: BES Group, 1997, 288—311
- 4 Li Jin, Zheng Zhipeng, Chen Hesheng ed. Proc. of 17th Inter. Symp. on Lepton-photon Interactions (LP95, 10—15 Aug. 1995 Beijing). Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1996. 94 and ref. there in
- 5 Bai J Z, Bian Q, Chen G M et al. Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., 1994, **A344**:319—334
- 6 Koba Z, Nielsen H B, Olesen P. Nucl. Phys., 1972, **B40**:317
- 7 DASP Collab., Brandelik R et al. Nucl. Phys., 1979, **B148**:189
- 8 Marshall R. 1989, RAL-89-021, 3.10-3.17
- 9 TASSO Collab., Brandelik R et al. Phys. Lett., 1980, **94B**:91
- 10 Bacci C et al. Phys. Lett., 1979, **86B**:234
- 11 LENA Collab., Niczporuk B et al. Z. Phys., 1981, **C9**:1
- 12 Siegrist J L et al. Phys Rev., 1982, **D26**:969
- 13 PLUTO Collab., Gerke Ch. Private Communication. Data Collected at 3.61, 5.0, 7.73, 9.39, 12.0, 13.0, 16.98, 22.02, 27.53, and 30.58 GeV
- 14 JADE Collab., Bartel W et al. Z. Phys., 1983, **C20**:187
- 15 HRS Collab., Derrick M et al. Phys. Lett., 1986, **168B**:299
- 16 TASSO Collab., Braunschweig W et al. 1989, DESY 89—038



- 17 HRS Collab., Derrick M et al. Phys. Lett., 1986, **168B**:299; Phys. Rev., 1986, **D34**:3304
- 18 Brandt S, Peyrou Ch, Sosnowski S et al. Phys. Lett., 1964, **12**:57
- 19 Fahri E. Phys. Rev. Lett., 1977, **39**:1587
- 20 TASSO Collab., Althoff M et al. Z. Phys., 1984, **C22**:307
- 21 Edward C, Patridge R, Peck C et al. 1990., SLAC-PUB-5160
- 22 TASSO Collab., Althoff M et al. Phys. Lett., 1984, **141B**:264
- 23 TASSO Collab., Brandelik R et al. Phys. Lett., 1980, **89B**:41; TASSO Collab., Althoff M. 1983, DESY 83-130

## Study and Simulation of the Features of Hadronic Events in the BEPC Energy Region \*

Qi Xiangrong Chen Jiangchuan Hu Haiming Hu Tao Huang Guangshun  
Ju Xin Li Jin Li Xinhua Mao Zepu Xue Shengtian Zhao Zhengguo  
Zheng Zhipeng Zhou Li

*(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039)*

**Abstract** Using hadronic events sample collected around 3.55 GeV with Beijing Spectrometer (BES) at Beijing Electron Positron Collider (BEPC) and the published data, we studied distributions characterizing the hadronic events produced from the  $e^+e^-$  annihilation and the most sensitive parameters in the LUND model and found that the characterizing distributions of the hadronic events of the BEPC data agree well with that predicted by the LUND model with tuned parameters.

**Key words** BEPC energy region, hadronic event, LUND model