

## 400 GeV/c pp 碰撞前后多重数关联\*

王韶舜 张杰 叶云秀 肖臣国 罗棋 成正东  
张学谦 徐万里 熊伟军

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

### 摘 要

利用 LEBC 泡室照片, 对 400 GeV/c pp 碰撞产生的带电粒子赝快度分布进行了测量。得到了固定总多重数时前向半球的多重数分布; 计算了全相空间、赝快度中心区以及中心区以外的前后多重数关联强度; 得到了关联强度随赝快度窗口的变化图。用结团模型分析了前后关联的实验数据, 结果表明, 结团的平均大小与是否考虑领头粒子效应有关。

### 一、引 言

为了研究末态高能强子的产生机制, 一个引起人们广泛兴趣的课题是研究前后半球的多重数关联。它对各种强子产生模型提供了一个很好的检验方法, 也是比较不同类型碰撞过程的一个有用的工具。实验表明<sup>[1,2]</sup>, 在 高能强子-强子碰撞中前后半球带电粒子多重数关联随着质心系能量的增加而增强。如果用  $\langle n_B \rangle_{n_F}$  表示当前向半球多重数  $n_F$  固定时后向半球的平均多重数, 则前后半球多重数关联能很好地用以下公式来描述:

$$\langle n_B \rangle_{n_F} = a + b n_F, \quad (1)$$

关联强度  $b$  在很宽的能量范围 ( $10 \leq \sqrt{s} \leq 900 \text{ GeV}$ ) 内是正的, 并且随能量的增加而对数地增加。然而在  $e^+e^-$  对撞实验<sup>[3]</sup>以及轻子-强子<sup>[4]</sup>碰撞实验中, 这种类型的关联或者没有观察到或者很弱。许多理论模型<sup>[5]</sup>用来解释这种关联的本质。大多数基于末态粒子成结团产生的模型<sup>[6]</sup>都假定结团是中性的, 每个结团衰变为两个带电粒子, 计算结果与实验在能量高时符合得较好, 但在低能时符合得不够好。S. L. Lim 等人<sup>[7]</sup>提出结团的平均大小是随能量变化的, 得到与实验符合得较好的结果。但他们在计算中没有考虑领头粒子效应, 因而低能时求得的结团平均大小显著偏小。我们利用 CERN NA27 合作组提供的 LEBC 泡室照片对 400 GeV/c pp 碰撞产生的带电粒子赝快度分布进行了测量, 计算了全快度空间、赝快度中心区和中心区以外的前后关联以及关联强度  $b$  随赝快度窗口的变化关系。并用结团模型对实验数据进行了拟合, 得到了与实验符合得较好的结果。

本文 1991 年 11 月 14 日收到。

\* 国家自然科学基金资助。

## 二、实验结果

在 400GeV/c pp 碰撞产生的带电粒子多重数分布的实验工作基础上<sup>[8]</sup>,对其中多重数为 4—24 的 1798 个非单衍事例进行了空间几何的重建,得到了实验室系和质心系的赝快度分布(测量方法见文献[9]),由此求得固定多重数时前向半球的多重数分布如图 1 所示.

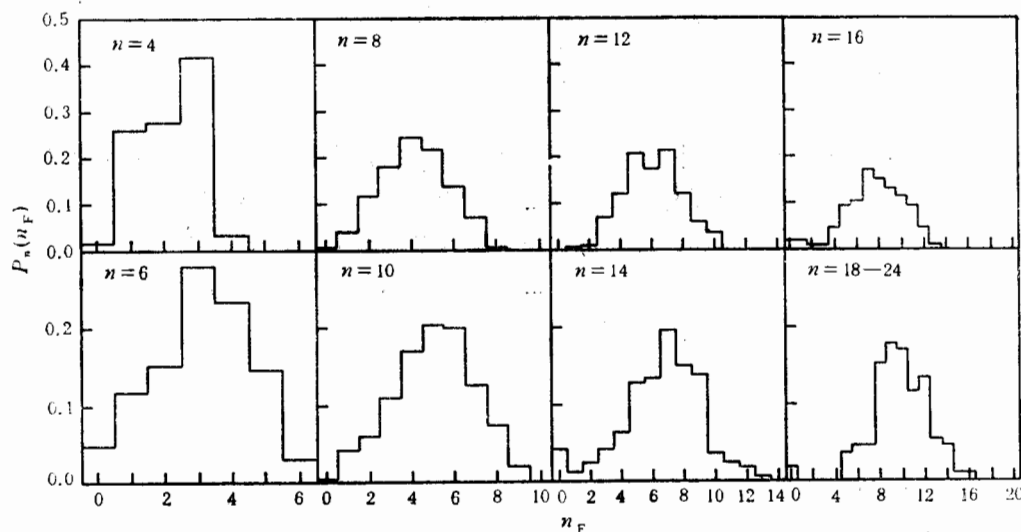


图 1  $n$  固定时前向半球的多重数分布

由于没有测量发生在泡室有效体积边缘和径迹模糊的事例,在求  $\langle n_B \rangle_{n_F}$  时,需用观察到的事例数<sup>[8]</sup>来校正几何重建的事例数.图 2 指出了全相空间以及  $|\eta_c| \leq 1$  和  $|\eta_c| > 1$  时  $\langle n_B \rangle_{n_F}$  随  $n_F$  的变化,并根据(1)式对实验数据进行线性拟合,得到的参数  $a$  和  $b$  列于表 1 中.

表 1 不同赝快度区间参数  $a$  和  $b$  的数值

| 赝快度区间 | $ \eta_c  \geq 0$ | $ \eta_c  \leq 1$ | $ \eta_c  > 1$     |
|-------|-------------------|-------------------|--------------------|
| $a$   | $3.660 \pm 0.067$ | $1.291 \pm 0.047$ | $2.861 \pm 0.041$  |
| $b$   | $0.221 \pm 0.028$ | $0.314 \pm 0.023$ | $-0.030 \pm 0.024$ |

与其它能量<sup>[1,10]</sup>的实验结果比较示于图 3 中<sup>1)</sup>.由图 3 可见,对于全相空间情况,实验点很好地落在  $b = d + c \ln S$  的直线上.其中  $S$  为质心系能量的平方.对于赝快度中心区,低能时与此规律有偏离.由图 2 和表 1 可见,对于 400GeV/c pp 碰撞,在全相空间和赝快度中心区前后关联较强,而在  $|\eta_c| > 1$  区间,在实验误差范围内不存在关联.

1) 赝快度中心区  $\sqrt{S} = 24\text{GeV}$  的实验值已根据文献[1]作了修正.

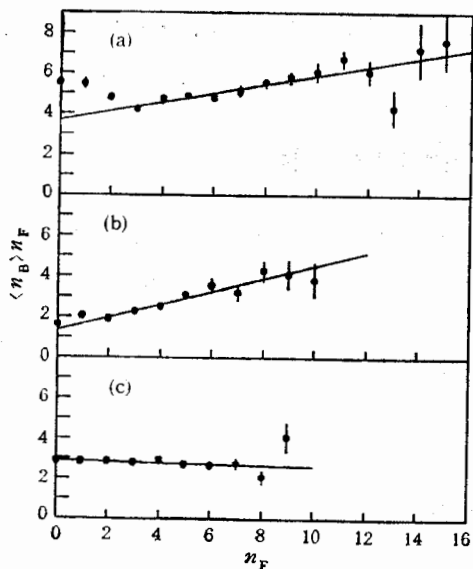


图 2 后向半球平均多重数随前向半球多重数的变化

(a) 全相空间 ( $|\eta_c| \geq 0$ ); (b) 赝快度中心区 ( $|\eta_c| \leq 1$ ); (c) 赝快度中心区以外 ( $|\eta_c| > 1$ ).  
直线是对实验数据的线性拟合。

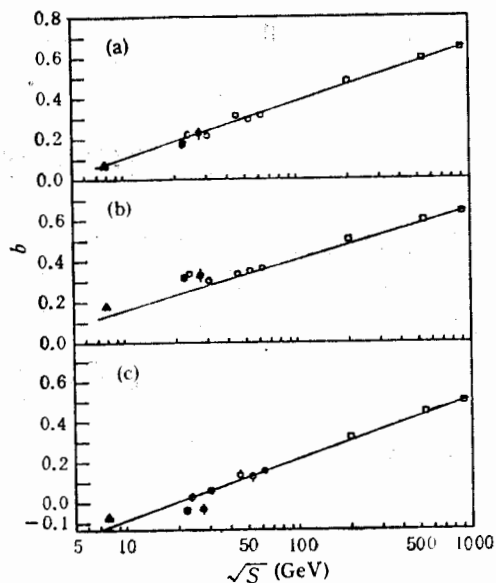


图 3 不同赝快度区间的关联强度  $b$  随质心系能量的变化

(a) 全相空间; (b) 赝快度中心区; (c) 赝快度中心区以外。  
○ R701(ISR) □ UA5 ■ NA22 ▲ USSR<sup>[1]</sup> ● 本实验

为了研究在  $\sqrt{s} = 27.4\text{GeV}$  能量下关联集中在赝快度空间哪一个区间, 选取不同的赝快度窗口  $\eta_w$ , 求出在  $|\eta_c| < \eta_w$  时的  $\langle n_B \rangle_{n_F}$  值以及相应的参数  $a$  和  $b$  值。图 4

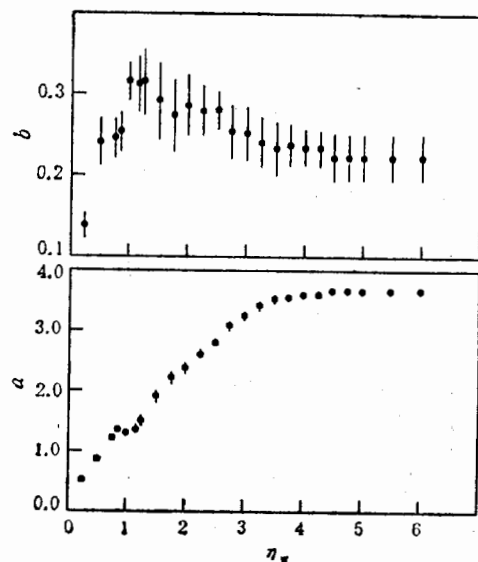


图 4 关联强度  $b$  和截距  $a$  随  $\eta_w$  的变化

绘出  $b$  和  $a$  随  $\eta_w$  的变化。由图 4 可见,随着  $\eta_w$  的增加,截距  $a$  几乎线性地增长,直到  $\eta_w > 3$  时趋向于饱和值;关联强度  $b$  则先随  $\eta_w$  的增加而增加,在  $\eta_w = 1$  附近达到最大值,然后逐渐下降至全相空间的关联值。

### 三、用结团模型拟合实验结果

从分析前后关联的实验数据出发,Chou 和 Yang<sup>[11]</sup> 认为带电粒子多重数分布分为随机的和非随机的方面,即带电粒子在前后半球以成对的方式遵循二项式分布,同时总的带电粒子数  $n = n_F + n_B$  遵循 KNO 标度,即

$$P(n, n_B) = \psi\left(\frac{n}{\bar{n}}\right) C_{n_B}^{n/2} \left[B\left(\frac{n}{2}\right)\right]^{-1}, \quad (2)$$

其中  $\psi(n/\bar{n})$  是 KNO 标度函数,

$$B\left(\frac{n}{2}\right) = \sum_{n_B=0}^n C_{n_B}^{n/2}$$

是归一化常数。S.L.Lim 等人对此作了推广,认为带电粒子以平均大小为  $r$  的结团在前半球(或后半球)遵循二项式分布, $r$  随能量而变化,每个结团衰变的粒子落在同一个半球内,忽略两个半球之间的泄漏效应,于是当  $n$  固定时后向半球带电粒子的分布几率为

$$P(r, n_B, n) = P(n) C_{n_B}^{n/r} \left[B\left(\frac{n}{r}\right)\right]^{-1}, \quad (3)$$

其中  $P(n)$  是描述带电粒子多重数分布的负二项式分布,即

$$P(n) = \frac{\Gamma(n+k)}{\Gamma(n+1) \cdot \Gamma(k)} \left(\frac{k}{\bar{n}+k}\right)^k \left(\frac{\bar{n}}{\bar{n}+k}\right)^n,$$

这里  $k$  是自由参数, $\bar{n}$  是平均多重数。对于 400 GeV/c pp 碰撞, $\bar{n} = 9.84, k = 12.7^{[8]}$ 。归一化常数

$$B\left(\frac{n}{r}\right) = \sum_{n_B=0}^n C_{n_B}^{n/r}.$$

系数  $C_{n_B}^{n/r}$  的计算方法见附录。由此可得

$$\langle n_B \rangle_{n_F} = \frac{\sum n_B \cdot P(r, n_B, n)}{\sum P(r, n_B, n)}, \quad (4)$$

其中

$$\Sigma = \begin{cases} \sum_{n_B=0,2,4,\dots} & \text{当 } n_F = \text{偶数时;} \\ \sum_{n_B=1,3,5,\dots} & \text{当 } n_F = \text{奇数时.} \end{cases}$$

根据(3)式和(4)式,利用  $\chi^2$  拟合法对全相空间的实验数据进行了拟合, $\chi^2$  随  $r$  的变化示于图 5(a) 中。由此求得的结团平均大小为  $r = 1.23 \pm 0.09$ 。拟合结果示于图 6(a) 中,在图 6(a) 中也示出了  $r = 1$  和 2 时的结果,显然  $r = 1.23 \pm 0.09$  时与实验结果符

合得较好. 这个数值与 S. L. Lim 等人算得的结果是一致的(见图 7),但是与其它方法得到的结团平均大小相比显著偏小<sup>[12]</sup>, 其中一个重要原因是上述公式中没有考虑领头粒子效应. 然而, 在 pp 碰撞中领头粒子效应起着重要的作用, 特别是低能时, 平均多重数较低, 领头粒子效应更不能忽略. 考虑领头粒子效应后, 假定在前后半球总是各有一个末态粒子, 其余末态粒子则按结团平均大小在前后半球遵循二项式分布. 因此(3)式应改为

$$P(r, n_B, n) = P(n) C_{(n_B-1)/r}^{(n-2)/r} [B(n/r)]^{-1}, \quad (5)$$

其中

$$B(n/r) = \sum_{n_B=1}^{n-1} C_{(n_B-1)/r}^{(n-2)/r}$$

相应地

$$\langle n_B \rangle_{n_F} = \frac{\sum n_B \cdot P(r, n_B, n)}{\sum P(r, n_B, n)}, \quad (6)$$

其中

$$\Sigma = \begin{cases} \sum_{n_B=2,4,\dots} & \text{当 } n_F = \text{偶数时;} \\ \sum_{n_B=1,3,\dots} & \text{当 } n_F = \text{奇数时.} \end{cases}$$

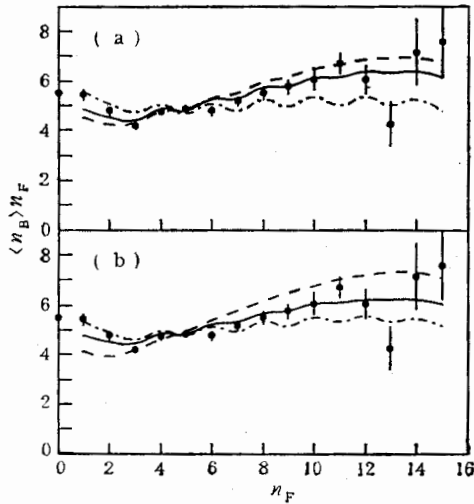


图 6 全相空间前后多重数关联实验结果与结团模型的拟合

(a) 不考虑领头粒子效应; (b) 考虑领头粒子效应.

—  $r$  = 最佳值; ---  $r$  = 1; - · - · -  $r$  = 2.

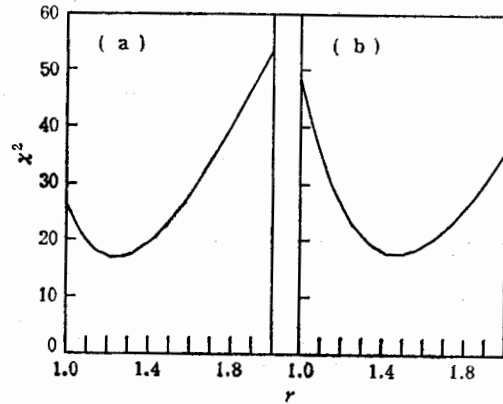


图 5  $\chi^2$  随拟合参数  $r$  的变化

(a) 不考虑领头粒子效应;  
(b) 考虑领头粒子效应.

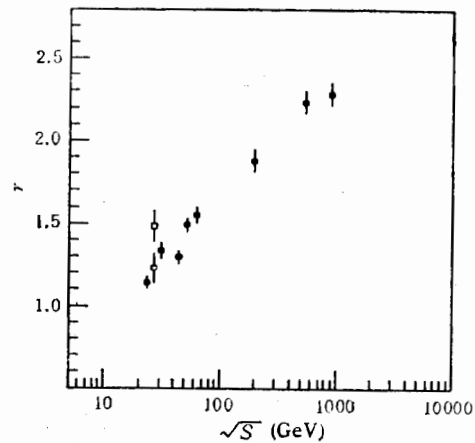


图 7 结团平均大小随质心系能量的变化

● S. L. Lim 等人计算的结果;  
○ 本实验(不考虑领头粒子效应);  
□ 本实验(考虑领头粒子效应).

利用同样的方法求得  $\chi^2$  随拟合参数  $r$  的变化示于图 5(b) 中, 由此得到的结团平均大小为  $r = 1.47 \pm 0.10$ . 图 6(b) 为  $r = 1, 2$  和最佳值时的拟合曲线, 由图可见, 当  $r = 1.47 \pm 0.10$  时与实验结果符合得较好.

#### 四、结果和讨论

1. 在全赝快度空间和赝快度中心区存在明显的前后关联. 在赝快度中心区以外, 即  $|\eta_c| > 1$  时, 对于  $400\text{GeV}/c$  pp 碰撞, 在实验误差范围内不存在前后关联.

2. 在全赝快度空间, 前后关联强度  $b$  随质心系能量的变化满足  $b = d + c \ln s$  的线性关系.

3. 在小的赝快度中心区  $|\eta_c| < \eta_w$ , 关联强度  $b$  随  $\eta_w$  的增加而增加, 在  $\eta_w = 1$  附近达到最大值, 然后逐渐减小到全相空间的值.

4. 前后关联的实验数据能用于定出结团的平均大小. 能量低时在决定结团的平均大小时应考虑领头粒子效应.

作者对 CERN NA27 合作组提供 LEBC 照片深表感谢.

#### 附 录

$C_{n_B}^{n_A/r}$  的求法如下:

令  $n_A/r = a$ ,  $n_B/r = b$ , 即

$$C_{n_B}^{n_A/r} = C_b^a = \frac{\Gamma(a+1)}{\Gamma(b+1)\Gamma(a-b+1)}.$$

当  $a, b$  不是整数时,

$$\Gamma(a) = \sqrt{2\pi} a^{a-\frac{1}{2}} e^{-a} (c_0 + c_1 + c_2 + c_3 + \dots),$$

$$\text{其中 } c_0 = 1, c_1 = \frac{a^{-1}}{12}, c_2 = \frac{a^{-2}}{288}, c_3 = -\frac{139a^{-3}}{51840}, \dots$$

#### 参 考 文 献

- [1] S. Uhlig et al., *Nucl. Phys.*, **B132**(1978), 15.
- [2] R. E. Anson et al., *Z. Phys. C-Particles and Fields*, **37**(1989), 191. G. J. Alner et al., *Nucl. Phys.*, **B291**(1987), 445. K. Alpgard et al., *Phys. Lett.*, **123B**(1983), 361.
- [3] M. Althoff et al., *Z. Phys. C-Particles and Fields*, **29**(1985), 347. M. Derrick et al., *Phys. Rev.*, **D34**(1986), 3304. W. Braunschwig et al., *Z. Phys. C-Particles and Fields*, **45**(1989), 193.
- [4] M. Arneodo et al., *Nucl. Phys.*, **B258**(1985), 249.
- [5] A. Capella, J. Tran Thanh Van, *Z. Phys. C-Particles and Fields*, **18**(1983), 85.  
K. Fialkowski et al., *Phys. Lett.*, **115B**(1982), 425;  
J. Kuhn, *Nucl. Phys.*, **B140**(1978), 179;  
S. Barshay, *Z. Phys. C-Particles and Fields*, **32**(1986), 513.  
V. V. Lugovoiand and V. M. Chudako, *Sov. J. Nucl. Phys.*, **50**(1989), 490;  
F. W. Bopp et al., *Z. Phys. C-Particles and Fields*, **51**(1991), 99.
- [6] P. Carruthers and C. C. Shih, *Phys. Lett.*, **165B**(1985), 209.

- Cai Xu et al., *Phys. Rev.*, **D33**(1986), 1287.  
M. Biyajima et al., *Z. Phys. C-Particles and Fields*, **44**(1989), 199.  
M. Biyajima et al., *Phys. Rev.*, **D39**(1989), 293.  
[7] S. L. Lim et al., *Z. Phys. C-Particles and Fields*, **43**(1989), 621.  
[8] 王韶舜等, 高能物理与核物理, **13**(1989), 673.  
[9] 王韶舜等, 高能物理与核物理, **15**(1991), 1057.  
[10] V. V. Avivazyan et al., *Z. Phys. C-Particles and Fields*, **42**(1989), 533.  
L. V. Bravina et al., *Sov. J. Nucl. Phys.*, 50(1989), 245.  
[11] T. T. Chou and C. N. Yang, *Phys. Lett.*, **135B**(1984), 175.  
[12] 王韶舜等, 高能物理与核物理, **16**(1992)

## Forward-Backward Multiplicity Correlations in pp Collisions at 400GeV/c

WANG SHAOSHUN    ZHANG JIE    YE YUNXIU    XIAO CHENGUO    LUO QI    CHENG ZHENGDONG  
ZHANG XUEQIAN    XU WANLI    XIONG WEIJUN

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

### ABSTRACT

The pseudo-rapidity distributions of charged particles produced in pp collisions at 400 GeV/c have been measured using LEBC films. The multiplicity distributions in forward hemisphere at fixed total multiplicities are obtained. The forward-backward multiplicity correlation strength in full phase space, central region and off-central region of the pseudo-rapidity distribution are calculated.

The figures of the correlation strength versus pseudo-rapidity windows are obtained. The experimental data of the forward-backward correlation have been analyzed with cluster model. The results show that the average cluster size is dependent on whether the leading-particle effect is taken into account.