

## 400GeV/c pp 碰撞赙快度间隔长度分布

王韶舜 张 杰 肖臣国 叶云秀 罗 棋 成正东 熊伟军 杨 纯

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

### 摘 要

利用 400GeV/c pp 碰撞产生的带电粒子赙快度分布的实验数据, 计算了两粒子之间含有  $(K - 1)$  个粒子的赙快度间隔长度分布和多粒子关联函数. 根据结团模型对实验结果作蒙特卡罗模拟. 估计了结团的平均大小.

### 一、引 言

为了了解高能粒子碰撞时的多粒子产生机制, 一个重要的方法是研究末态粒子之间的快度(赙快度)间隔长度分布和多粒子快度关联<sup>[1-8]</sup>. 如果次级粒子以结团的形式产生, 那么在结团内的粒子之间的赙快度间隔长度较小, 结团之间的赙快度间隔长度较大. 对于固定多重数为  $n$  的事例, 如果以  $\eta$  增加的次序排列( $\eta_1 < \eta_2 < \dots < \eta_n$ ), 并计算间隔的长度  $G = \eta_{i+1} - \eta_i$ , 从而得到赙快度的间隔长度分布函数  $P(G)$ . 一般认为当结团是独立发射时<sup>[3]</sup>, 对于小的间隔长度  $G$ , 有

$$P(G) \sim \exp(-\bar{\rho} \bar{n}_c G), \quad (1)$$

其中  $\rho$  是赙快度空间的结团密度,  $\bar{n}_c$  是每个结团平均衰变的带电粒子数. 当  $G$  较大时 ( $G > 1.2$ ), 两粒子之间的赙快度间隔实际上是结团之间的间隔, 因此有

$$P(G) \approx \exp(-\rho G). \quad (2)$$

这样, 比较小快度间隔区与大快度间隔区实验曲线的斜率, 就能得到结团平均大小的信息.

这个方法的困难在于每个结团的快度通常有两个单位宽, 它占了可用的全快度相空间的一个显著部分, 特别是多重数高时, 不同结团的衰变粒子快度分布相互重叠, 以及快度本身的测量误差和快度间隔长度的统计涨落, 使简单利用快度间隔长度分布难以确定结团的大小和性质. 另外上述方法与两粒子关联一样, 每次只考虑两个粒子而忽略了事例其它粒子的信息. R. K. Shivpuri 和 Gupta<sup>[5]</sup>提出了一种新的分析方法以决定结团的大小和性质. 其根据是如果有  $K$  个粒子是由一个结团衰变而来的, 那么这  $K$  个粒子之间的快

• 本文 1992 年 3 月 16 日收到.

国家自然科学基金资助.

度间隔长度是小的. 他们研究两个粒子中间含有  $(K - 1)$  个粒子的赙快度间隔长度分布, 并用指数函数来拟合实验曲线, 从而得出结团的大小和关联强度. 但是当  $K > 1$  时, 赙快度间隔长度分布曲线不是指数函数, 因此不能用指数函数来拟合. L. K. Mangotra<sup>[6]</sup>和 W. Bell 等人<sup>[7]</sup>对此方法作了改进, 他们将赙快度间隔分布与两粒子关联函数结合起来进行分析, 从而利用事例的更多信息得到更好的结果. 我们利用他们的方法对 400GeV/c pp 碰撞产生的带电粒子多重数为 8—24 的实验数据作了分析.

## 二、分析方法

众所周知, 对于固定多重数时的两粒子关联函数定义为:

$$C_n(\eta_1, \eta_2) = \rho_n^2(\eta_1, \eta_2) - \rho_n^1(\eta_1)\rho_n^1(\eta_2), \quad (3)$$

或采用归一化形式

$$R_n(\eta_1, \eta_2) = \frac{\rho_n^2(\eta_1, \eta_2)}{\rho_n^1(\eta_1)\rho_n^1(\eta_2)} - 1. \quad (4)$$

其中  $\rho_n^1(\eta)$ ,  $\rho_n^2(\eta_1, \eta_2)$  分别是  $n$  固定时带电粒子赙快度分布的单粒子和两粒子密度. 实验表明在赙快度分布平台区,  $C_n(\eta_1, \eta_2)$  和  $R_n(\eta_1, \eta_2)$  仅依赖于  $|\eta_1 - \eta_2|$ <sup>[9]</sup>, 因此可将关联函数  $C_n$  表示为  $\Delta\eta$  的函数, 并对赙快度平台区 ( $|\eta_1| \leq 1.6$ ,  $|\eta_2| = |\eta_1 + \Delta\eta| \leq 1.6$ ) 积分和归一化, 则有

$$R_n(\Delta\eta) = \frac{\int_{\eta} \rho_n^2(\eta, \eta + \Delta\eta) d\eta}{\int_{\eta} \rho_n^1(\eta)\rho_n^1(\eta + \Delta\eta) d\eta} - 1. \quad (5)$$

在上述公式中并不考虑  $\Delta\eta$  中间包含多少个粒子. 现在将两个粒子中间含有固定  $(K - 1)$  个带电粒子时的赙快度间隔长度定义为  ${}_m G_K$ , 其中  $m$  为一个事例在  $|\eta| \leq 1.6$  区间内所包含的粒子数. 令  ${}_m f_K(G)$  表示实验上测到的归一化赙快度间隔长度分布, 即在  $|\eta| \leq 1.6$  时含有  $m (> K)$  个粒子的所有事例中两个粒子中间含有  $(K - 1)$  个粒子的归一化间隔长度分布. 理论上假定, 不存在关联时可根据半单举单粒子赙快度分布  $\rho_m^1(\eta)$  来计算赙快度间隔长度的分布, 即

$${}_m f_K(G) = K \binom{m}{K} \int_{\eta} \frac{\rho_m^1(\eta)}{m} \frac{\rho_m^1(\eta + G)}{m} \cdot \left\{ \int_{\eta}^{\eta+G} \frac{\rho_m^1(\eta')}{m} d\eta' \right\}^{K-1} \cdot \left\{ 1 - \int_{\eta}^{\eta+G} \frac{\rho_m^1(\eta')}{m} d\eta' \right\}^{m-K-1} d\eta, \quad (6)$$

其中  $K \binom{m}{K} = \frac{m!}{(K-1)!(m-K)!}$ ,  $\rho_m^1(\eta)$  是在  $|\eta| \leq 1.6$  区间内有  $m$  个粒子的所有事例中统计得到的单粒子赙快度分布密度. 积分中的因子分别表示一个粒子的赙快度为  $\eta$ , 另一个为  $\eta + G$ ,  $(K - 1)$  个粒子在  $\eta$  和  $\eta + G$  之间,  $(m - K - 1)$  个粒子在此区间外的几率. 现在定义  $K$  级归一化半单举赙快度间隔关联函数为

$${}_m R_K(G) = \frac{{}_m f_K(G)}{{}_m f_K(G)} - 1. \quad (7)$$

为了增加统计性, 把不同多重数的间隔长度分布按比例累加起来, 即

$$F_K(G) = \frac{\sum_{m>K} \pi(m)(m-K) {}_m f_K(G)}{\sum_{m>K} \pi(m)(m-K)} \quad (8)$$

和

$$F'_K(G) = \frac{\sum_{m>K} \pi(m)(m-K) {}_m f'_K(G)}{\sum_{m>K} \pi(m)(m-K)}, \quad (9)$$

其中 $\pi(m)$ 是由实验决定的在指定赝快度区间( $|\eta| \leq 1.6$ )多重数为 $m$ 的事例数, $(m-K)$ 是多重数为 $m$ 的事例中两粒子中间有 $(K-1)$ 个粒子的间隔数.最后赝快度间隔分布的关联函数定义为:

$$R_K(G) = \frac{F_K(G)}{F'_K(G)} - 1. \quad (10)$$

如果 $R_K(G) = 0$ ,则表示不存在关联.

### 三、实验结果

利用 CERN NA27 合作组提供的 LEBC 泡室照片对 400GeV/c pp 碰撞产生的带电粒子多重数为 8—24 的 1479 个事例的赝快度分布进行了测量<sup>[10]</sup>. 对于每一个事例统计落在赝快度平台区 ( $|\eta| \leq 1.6$ ) 内的带电粒子数, 由此求得在平台区内带电粒子数为  $m$  的事例数  $\pi(m)$  及单粒子密度  $\rho_m^1(\eta)$ . 由这些事例可以求得固定  $m$  时的赝快度间隔分布  ${}_m f_K(G)$  和  ${}_m f'_K(G)$ . 对不同的  $m$  作同样的运算, 然后按公式 (8) 和 (9) 求得归一化的赝快度间隔长度分布  $F_K(G)$  和  $F'_K(G)$ , 如图 1 所示. 由单粒子分布  $\rho_m^1(\eta)$  的涨落引起的  $F'_K(G)$  的统计误差, 除了很小的快度间隔外, 比  $F_K(G)$  的统计误差小很多<sup>[6-8]</sup>, 因此在图 1 中我们忽略了  $F'_K(G)$  的误差. 由图 1 可见, 对于所有的  $K$  值,  $F'_K(G)$  和  $F_K(G)$  基本相符.

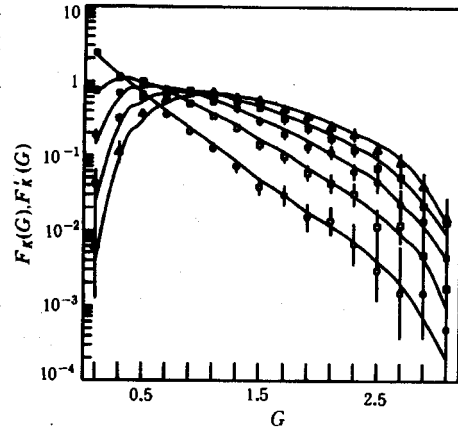


图 1 赝快度间隔长度分布  
带误差棒的点为实验测得的分布  $F_K(G)$ , 曲线是假定没有关联时计算得到的分布  $F'_K(G)$ .  $\circ$   $K=1$ ,  $\square$   $K=2$ ,  $\bullet$   $K=3$ ,  $\blacksquare$   $K=4$ ,  $\blacktriangle$   $K=5$ .

### 四、用结团模型作蒙特卡罗模拟

根据 (10) 式计算得到的赝快度间隔分布的关联函数  $R_K(G)$  示于图 2 中. 为了由  $R_K(G)$  获得有关结团大小的信息, 利用简单的结团模型作蒙特卡罗模拟计算. 一个赝快

度为  $\eta_0$  的结团衰变成  $n_c$  个带电粒子, 这些粒子的赙快度分别为  $\eta_i (i=1, 2, \dots, n_c)$ , 它们服从高斯分布, 其平均值为  $\eta_0$ , 宽度为  $\delta$ , 即

$$f(\eta)d\eta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\{- (\eta - \eta_0)^2 / 2\delta^2\} d\eta. \quad (11)$$

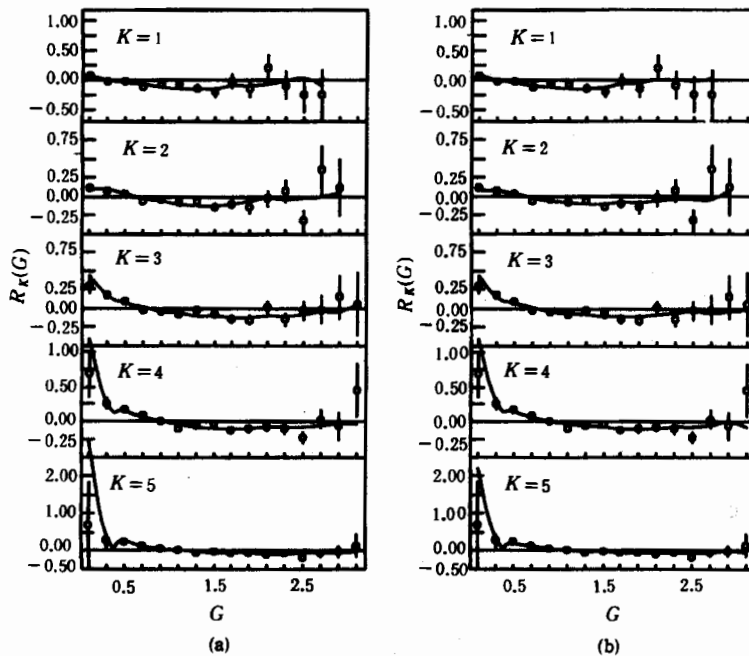


图2 归一化赙快度间隔分布关联函数  $R_K(G)$ , 曲线是蒙特卡罗拟合的结果

(a) 假定每个结团衰变成两个带电粒子;

(b) 假定结团衰变产物的多重数服从泊松分布.

假定结团衰变的带电粒子数  $n_c$  服从泊松分布, 其平均值为  $\bar{n}_c$ . 由于结团衰变产物的赙快度  $\eta_i$  围绕结团本身的赙快度  $\eta_0$  有一个分布, 因此在选定的赙快度窗口 ( $|\eta| \leq 1.6$ ) 内产生的结团衰变时, 其产物的赙快度可能落在窗口外, 反之也一样. 作蒙特卡罗计算时, 假定结团在赙快度区间  $|\eta| \leq 2.6$  范围内产生, 其产生的几率正比于实验测到的赙快度分布  $\rho_m^1(\eta)$ , 它是由  $|\eta| \leq 1.6$  区间内有  $m$  个带电粒子的事例统计得到的. 结团一个接一个地随机产生, 在选定参数  $\bar{n}_c$  和  $\delta$  的条件下, 累计落在  $|\eta| \leq 1.6$  区间内的带电粒子数, 当此数值等于  $m$  时即完成一个事例的模拟 (当此数值大于  $m$  时则取消此事例), 重新开始模拟下一个事例, 直至所产生的事例数  $\pi(m)$  为实验值  $\pi(m)$  的 100 倍, 即可得模拟事例的单粒子密度  $\bar{\rho}_m^1(\eta)$ . 保持  $\bar{n}_c$  和  $\delta$  不变, 对所有可能的  $m$  重复上述过程, 得到所有的  $\bar{\rho}_m^1(\eta)$  和  $\pi(m)$  值. 由此求得  $\bar{F}_K(G)$ ,  $\bar{F}'_K(G)$  和  $\bar{R}_K(G)$  并与实验得到的  $R_K(G)$  比较以求得  $\chi^2$  值. 改变参数  $\bar{n}_c$  和  $\delta$ , 重复上述过程, 当  $\chi^2$  值最小时即得最佳的拟合参数  $\bar{n}_c$  和  $\delta$ . 表 1 列出了  $K=1$  时  $\chi^2$  随  $\bar{n}_c$  和  $\delta$  的变化. 表 2 列出了最佳拟合参数, 其中结团平均大小  $\bar{n}_c$  已对全部衰变成中性粒子的结团作了校正. 相应的最佳拟合曲线示于图 2(b) 中. 由表 2 可见, 对于不同的  $K$  值, 最佳的拟合参数 (结团的平均大小  $\bar{n}_c$  和宽度  $\delta$ ) 在实验误差范围内是一致的,

即只有一种类型的结团,其平均值为

$$\bar{n}_c = 1.62 \pm 0.12.$$

这与 R. E. Ansorge 等人的结果<sup>[8]</sup>是一致的.

表 1  $K=1$  时  $\chi^2$  随拟合参数  $\bar{n}_c$  和  $\delta$  的变化 ( $NDF = 13$ )

$\delta \backslash \bar{n}_c$	1.42	1.47	1.53	1.60	1.65	1.72	1.78	1.85	1.92	2.01
0.55	26.8	20.8	17.7	14.7	12.5	12.1	10.3	13.3	16.6	23.1
0.58	31.7	23.7	20.2	15.4	11.1	11.8	9.2	9.6	13.3	16.1
0.60	34.6	28.1	22.6	17.5	15.1	11.3	9.6	9.9	10.8	12.7
0.65	42.7	33.7	26.1	26.0	20.4	14.1	13.8	12.3	10.3	10.8
0.70	48.7	43.8	38.7	30.3	25.8	21.5	17.8	15.3	13.4	13.8

表 2 最佳的拟合参数  $\bar{n}_c$  和  $\delta$

$K$	1	2	3	4	5
$\bar{n}_c$	$1.78 \pm 0.13$	$1.60 \pm 0.12$	$1.60 \pm 0.12$	$1.60 \pm 0.12$	$1.53 \pm 0.14$
$\delta$	$0.59 \pm 0.05$	$0.58 \pm 0.05$	$0.58 \pm 0.05$	$0.58 \pm 0.05$	$0.60 \pm 0.05$
$\chi^2/NDF$	9.4/13	11.8/14	11.9/15	12.1/15	6.9/15

为了说明能否由赙快度间隔长度分布确定结团衰变的多重数分布,还作了以下的蒙特卡罗模拟.即假定每个结团衰变成两个带电粒子,其衰变粒子的赙快度服从高斯分布.改变参数  $\delta$  进行蒙特卡罗模拟,求得不同  $K$  值时  $\chi^2$  随  $\delta$  的变化示于图 3,由此得到的最佳拟合参数列于表 3.相应的拟合曲线示于图 2(a).由图 2 可见,假定结团衰变产物的多重数服从泊松分布或每个结团衰变成两个带电粒子均能与实验结果符合,这与两粒子短程关联的实验结果是一致的<sup>[11]</sup>.

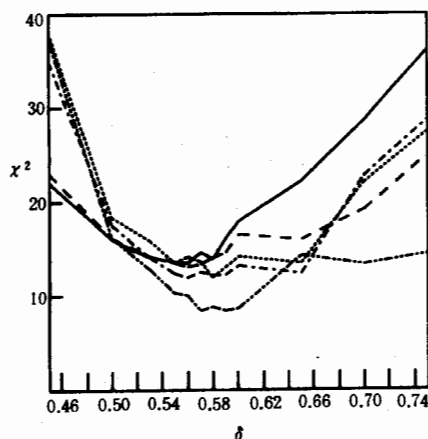


图 3 结团衰变成两个带电粒子时蒙特卡罗模拟得到的  $\chi^2$  随  $\delta$  的变化

——  $K=1$ , ---  $K=2$ , - · - · -  $K=3$ ,  
 .....  $K=4$ , - · - · - · -  $K=5$ .

表3 结团衰变成两个带电粒子时的最佳拟合参数

K	1	2	3	4	5
$\delta$	$0.55 \pm 0.05$	$0.56 \pm 0.05$	$0.56 \pm 0.07$	$0.58 \pm 0.05$	$0.59 \pm 0.04$

## 五、讨 论

本实验与其他分析方法得到的结团平均大小列于表4.

表4 不同分析方法获得的结团平均大小

分析方法	结团平均大小
前向半球多重数分布 <sup>[10]</sup>	$1.63 \pm 0.09$
前后多重数关联 <sup>[12]</sup>	$1.47 \pm 0.08$
两粒子赙快度关联 <sup>[11]</sup>	
假定结团衰变多重数分布为 $\delta$ 函数	$2.01 \pm 0.10$
假定结团衰变多重数服从泊松分布	$1.61 \pm 0.10$
赙快度间隔分布和多粒子关联	
假定每个结团衰变成两个带电粒子	2
假定结团衰变多重数服从泊松分布	$1.62 \pm 0.12$

由上面的结果可以认为结团衰变产物的多重数分布为泊松分布,低能时结团平均大小为1.6左右,因此低能时,结团以低质量共振态为主.

作者对 CERN NA27 合作组提供 LEBC 照片深表感谢.

## 参 考 文 献

- [1] T. Ludlan and R. Slansky, *Phys. Rev.*, **D12**(1975), 65.
- [2] A. Arneodo and G. Plaut, *Nucl. Phys.*, **B107**(1976), 262.
- [3] C. Quigg et al., *Phys. Rev. Lett.*, **34**(1975), 290.
- [4] P. Pirira, G. H. Thomas and C. Quigg, *Phys. Rev.*, **D12**(1975), 92.
- [5] R. K. Shivpuri and C. Gupta, *Phys. Rev.*, **D15**(1977), 3333.  
R. K. Shivpuri and C. Gupta, *Phys. Rev.*, **D17**(1978), 1778.
- [6] L. K. Mangotra, I. Otterlund and E. Stenlund, *Z. Phys. C-particles and fields*, **31**(1986), 199.
- [7] W. Bell et al., *Z. Phys. C-particles and fields*, **32**(1986), 335
- [8] R. E. Ansorge et al., *Z. Phys. C-particles and fields*, **37**(1988), 191.
- [9] G. J. Alner et al., *Phys. Rep.*, **154**(1987), 247.  
W. Bell et al., *Z. Phys. C-particles and fields*, **22**(1984), 109.
- [10] 王韶舜等, 高能物理与核物理, **15**(1991), 1057.
- [11] 王韶舜等, 高能物理与核物理, **16**(1992), 487.
- [12] 王韶舜等, 高能物理与核物理, **17**(1992), 1.

## Pseudorapidity Gap Length Distributions in pp Collisions at 400GeV/c

WANG SHAOSHUN ZHANG JIE XIAO CHENGUO YE YUNXIU

LUO QI CHENG ZHENGDONG XIONG WEIJUN YANG CHUN

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

### ABSTRACT

The distributions of the pseudorapidity gap length between two particles, which included (K-1) particles between them, and many-particle pseudorapidity correlation functions have been calculated by using the experimental data of the charged particles pseudorapidity distributions produced in 400GeV/c pp collisions. The Monte Carlo simulations for the experimental data have been made based on a cluster model. The average cluster size has been estimated.