

400 GeV/c pp 碰撞产生的带电 粒子多重数分布*

王韶舜 张杰 肖臣国 叶云秀

施国顺 方荣 杨洁

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥)

摘 要

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多重数分布进行了研究. 叙述了对原始数据的校正方法. 与其他能量的实验结果比较表明, 在不高于 ISR 能量的能区, 非单衍过程的多重数分布具有 KNO 标度行为, 而非弹性过程的多重数分布则偏离 KNO 标度.

一、引 言

高能强子碰撞的多重产生是高能物理中一个重要的研究课题, 是了解强相互作用动力学机制的一个重要途径. 在多重数的研究中, 一个热烈争论的焦点是 KNO 标度规律是否保持的问题. 最近几年的实验数据表明 KNO 标度规律只在一定的能量范围内近似成立, 能量较低或较高时, 对于强子非弹性碰撞产生的带电粒子多重数分布并不遵循 KNO 标度规律. 但对于非单衍过程的多重数分布, 则在较宽的能量范围(直至 $\sqrt{s} = 62.2 \text{ GeV}$) 仍具有良好的 KNO 标度行为^[1,2]. 由于 405 GeV/c pp 碰撞的实验数据与附近能区有不一致之处^[2-6], 因此重新研究 400 GeV/c pp 碰撞产生的带电粒子多重数分布问题是有一定意义的.

二、实验数据处理

利用 CERN NA27 合作组提供的 LEBC 泡室照片, 对 400 GeV/c pp 碰撞中产生的带电粒子多重数分布进行了研究. LEBC 是一个“干净”的快循环液氢泡室, 气泡直径约为 $17 \mu\text{m}$, 有效室体积沿束流径迹方向有 12 cm 长, 气泡密度为 80 cm^{-1} , 照片从两个角度

* 国家自然科学基金资助的课题.
本文 1988 年 12 月 29 日收到.

同时拍摄,以便能再现事例的立体图象。

分成两个小组对 4588 张照片进行独立的扫描。两组扫描的结果有 15% 不符合,对不符合的部分进行了第三次扫描,最后共得到 2334 个大于 2 分叉的反应事例。其中单衍事例数为 4 分叉的 28 个, 6 分叉的 7 个和 8 分叉的 1 个。它们是根据以下标准确定的^[7,8]:

(1) 事例中有一个慢质子的径迹。

(2) 快粒子之间的赝快度 η 之差 $|\Delta\eta| < 1$ 。这里采用的是实验室系赝快度 $\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right)$, 其中 θ 是实验室系中粒子径迹与束流径迹之间的夹角。

(3) 慢质子与最接近的快带电粒子之间的赝快度 η 之差 $|\Delta\eta| > 3$ 。

实验中发现的单衍事例数小于应有值,这是由于 NA27 实验的触发条件要求泡室下游两个多丝正比室同时探测到两个以上带电粒子径迹,这就去掉了大部分弹性散射事例和单衍事例。但对于分叉数大于 2 的非单衍事例,则触发效率接近 100%。

由于接近初始顶点的次级相互作用;中性粒子衰变和 γ 转换成 e^+e^- 对;达里兹(Dalitz)对;奇分叉事例以及事例触发效率等对多重数分布的影响,需对实验数据进行以下修正:

(一) 奇分叉事例

总共有 14 个奇分叉事例。它们可能是由于一个慢质子没有被探测到,或者由于次级相互作用顶点太靠近初始顶点而无法区分。前者主要出现在低多重数情况,后者主要出现在高多重数情况。所以小于 8 的奇分叉事例都归并到多重数增加 1 的偶多重数事例中去,而多重数大于 8 的奇分叉事例都归并到多重数减少 1 的偶分叉事例中。

(二) 达里兹对的修正

达里兹对是反应中与带电粒子同时产生的 π^0 衰变产物,其衰变方式为 $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+e^-$ 。由于 π^0 寿命很短,基本上是在初级顶点附近完成衰变,因此这种未能分辨的达里兹对使多重数增加 2,为此需进行修正。利用经验公式^[9]:

$$\langle n_{\pi^0} \rangle = \langle n_{\pi^-} \rangle + 0.4, \quad (1)$$

其中 $\langle n_{\pi^0} \rangle$ 和 $\langle n_{\pi^-} \rangle$ 分别是每次非弹性碰撞中产生的 π^0 和 π^- 的平均数。在 400 GeV/c pp 碰撞中, $\langle n_{\pi^-} \rangle \approx 3.3$, 故 $\langle n_{\pi^0} \rangle \approx 3.7$ 。 $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+e^-$ 的分支比为 1.213%, 即每一非弹性相互作用事例平均产生 4.49% 达里兹对。近似地以观察到的非弹性相互作用事例总数乘此数值,约得到 105 个达里兹对,按事例数多少分配给多重数大于 4 的事例。

(三) V^0 衰变、 γ 产生 e^+e^- 对和中子星

很靠近初级顶点的中性粒子衰变、 γ 产生正负电子对和中子星也能造成多重数误差。观察到的 V^0 衰变(包括 γ 产生的 e^+e^- 对)共 118 个,中子星 22 个。由衰变长度的分布外推到零衰变长度时,得到未分辨的 V^0/γ 事例数远小于事例数本身的统计误差,因此这项修正可以略去。

(四) 二分叉事例数

由于触发条件的限制,大部分弹性和非弹性二分叉事例丢失了。加之泡室无磁场,难

以区分 δ 电子和慢质子的径迹。因此从实验上测定二分支事例的误差太大。从文献[4, 6]中查出 400GeV/c pp 相互作用时的总截面、弹性散射截面和二分支非弹性散射截面分别为:

$$\sigma_t = (40.00 \pm 0.50) \text{mb};$$

$$\sigma_{e1} = (7.20 \pm 0.31) \text{mb};$$

$$\sigma_{2in} = (2.10 \pm 0.36) \text{mb}.$$

由于缺乏可靠的单衍过程的截面数据^[1], 特别是 405GeV/c 单衍过程的截面数据偏离一般趋势较大^[2,5], 因此利用能量较高和较低时单衍过程的截面数据内插, 得到 400GeV/c pp 单衍过程的截面为:

$$\sigma_{2D} = (1.70 \pm 0.32) \text{mb};$$

$$\sigma_{4D} = (2.18 \pm 0.46) \text{mb};$$

$$\sigma_{6D} = (0.80 \pm 0.20) \text{mb};$$

$$\sigma_{8D} = (0.12 \pm 0.05) \text{mb}.$$

由此得到单衍过程的总截面为: $\sigma_D = (4.80 \pm 0.60) \text{mb}$, 二分支非单衍截面为: $\sigma_{2ND} = (0.40 \pm 0.16) \text{mb}$. 二分支非单衍事例数可按以下公式求得:

$$N_{2ND} = N_2 \cdot \sigma_{2ND} / (\sigma_t - \sigma_{e1} - \sigma_D - \sigma_{2ND}), \quad (2)$$

其中 N_2 是修正后除二分支以外的非单衍事例总数。二分支非弹性事例数可按以下公式求得:

$$N_{2in} = \frac{\sigma_{2in}}{\sigma_{2ND}} \times N_{2ND}. \quad (3)$$

(五) 触发效率的修正

为求得非弹性过程的多重数分布, 必须对单衍事例损失进行修正。利用两种办法作近似估计。

(1) 利用由内插法得到的单衍过程截面数据计算得到的单衍事例数为:

$$N_{4D} = 185 \pm 39; N_{6D} = 68 \pm 17; N_{8D} = 10 \pm 4.$$

(2) 本实验观察到的是炮弹碎裂单衍过程, 且相互作用顶点分布在泡室前半部, 约占泡室总有效长度的三分之一, 因此用 6 倍观察到的单衍事例数作为真正单衍事例数的近似。两种方法的结果在误差范围内是相符的。

三、结果和讨论

在对原始数据进行上述修正后, 共得 2693 个非弹性相互作用事例和 2332 个非单衍事例。带电粒子多重数分布及拓扑截面如表 1 所示。由此得到非弹性过程带电粒子平均多重数为:

$$\langle n \rangle = 8.99 \pm 0.18.$$

非单衍过程的平均多重数为:

$$\langle n_{ND} \rangle = 9.84 \pm 0.10.$$

表1 400GeV/c pp 碰撞产生的带电粒子多重数分布及拓扑截面

多重数	初始数据		未见达里兹对	修正后数据		拓扑截面 (mb) 非弹性
	非弹性	单衍		非单衍	非弹性	
2				34	179±30	2.10±0.36
3	2					
4	199	28		192	360±40	4.22±0.47
5	1					
6	391	7	19	390	432±34	5.07±0.40
7	1					
8	486	1	24	486	492±25	5.77±0.30
9	3					
10	428		21	423	423±22	4.96±0.26
12	333		16	329	329±20	3.86±0.23
13	2					
14	211		10	209	209±15	2.45±0.18
15	1					
16	132		7	131	131±12	1.54±0.14
17	1					
18	81		5	78	78±10	0.92±0.12
20	32		2	32	32±6	0.38±0.07
21	1					
22	16		1	16	16±5	0.19±0.06
23	1					
24	9			10	10±4	0.12±0.03
25	1					
26	2			2	2±1	0.023±0.012
总	2334	35	105	2332	2693	31.8±0.8

对于非单衍的带电粒子多重数分布,刘连寿等^[10]根据三火球模型导出了一个能量无关的拟合公式:

$$\phi_{\text{NSD}}(z) = \frac{16}{5} (3z)^5 \exp(-6z), \quad (4)$$

其中 $z = n/\langle n \rangle$. 另一个与能量无关的拟合公式是^[11]:

$$\phi_{\text{NSD}}(z) = 45.1z^{3.97} \exp(-2.63z - 0.61z^2). \quad (5)$$

我们的实验点与这两条拟合曲线符合得较好(见图1). 对于非弹性过程带电粒子多重数分布,实验点与 Slattery 的能量无关(50—300GeV/c)拟合曲线^[11]符合得较好,但与三火球模型的拟合曲线偏离较大(见图2). 这是因为三火球模型只考虑非单衍过程.

表2列出了一些多重数分布参数的计算结果,同时列出了其他能量^[2,4,16]的参数以作比较. 图3是非单衍过程带电粒子多重数分布的矩随能量的变化,其他能量的数据取自文献[2]和[12].

图4指出了非弹性过程的色散 $D = \sqrt{\langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2}$ 与平均多重数 $\langle n \rangle$ 之间的 Wroblewski 线性依赖关系^[14]. 图中的实线由以下公式计算得到^[15]:

$$D(\langle n \rangle) = 0.575(\langle n \rangle - 0.946). \quad (6)$$

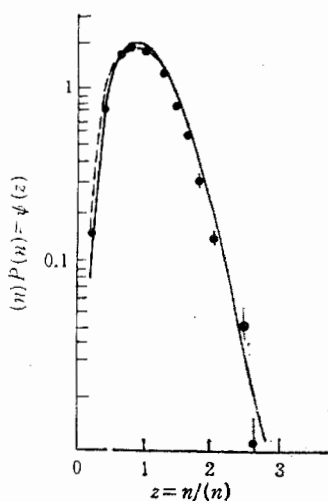


图 1 非单衍过程带电粒子多重数分布
——三火球; ----拟合公式(5)

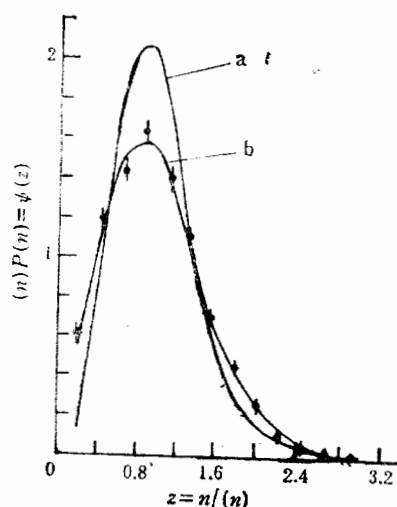


图 2 非弹性过程带电粒子多重数分布
a. 三火球; b. P. Slattery

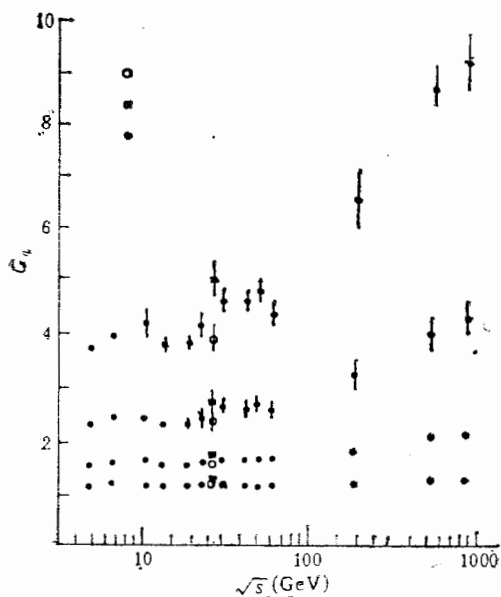


图 3 非单衍过程带电粒子多重数分布的矩
随质心系能量的变化

○ 本实验结果; ■ C. Bromberg et al.;
● 其他能量的实验结果

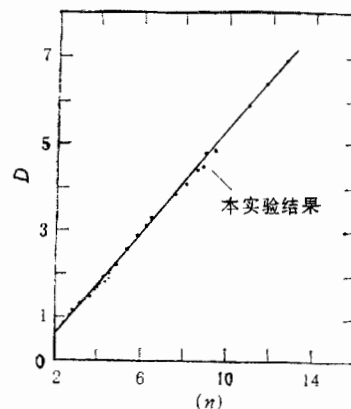


图 4 非弹性过程的色散 D 与平均多重数 $\langle n \rangle$ 的依赖关系

我们的实验点符合这种线性依赖关系。

图 5 是非弹性过程带电粒子多重数分布的矩随实验室系动量的变化, 其他动量的数据取自文献[4]和[2].

由图 1 和图 3 所示的结果表明, 400GeV/c pp 非单衍过程的多重数分布满足 ISR

36
47
40
30
26
23
18
14
12
17
16
3
12
的
4)
5)
数
三
作
自
ro-
6)

表2 多重数分布参数

参数	非单衍		非弹性					
	本实验	三火球*	303GeV/c	360GeV/c	本实验	$\sqrt{s} = 30.4\text{GeV}$	$\sqrt{s} = 44.5\text{GeV}$	$\sqrt{s} = 62.2\text{GeV}$
$\langle n \rangle$	9.84 ± 0.10		8.86 ± 0.16	9.06 ± 0.09	8.99 ± 0.18	9.43 ± 0.18	10.86	12.25
$D = \sqrt{\langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2}$	4.12 ± 0.10		4.37 ± 0.13	4.49 ± 0.05	4.42 ± 0.12	5.05 ± 0.11	5.76 ± 0.10	6.62 ± 0.10
$\frac{\langle n \rangle}{D}$	2.39 ± 0.09	2.449	2.03 ± 0.10	2.02 ± 0.04	2.06 ± 0.09	1.87 ± 0.08	1.89 ± 0.06	1.85 ± 0.06
$C_2 = \langle n^2 \rangle / \langle n \rangle^2$	1.18 ± 0.03	1.167	1.24 ± 0.04	1.25 ± 0.01	1.24 ± 0.03	1.29 ± 0.02	1.28 ± 0.01	1.29 ± 0.01
$C_3 = \langle n^3 \rangle / \langle n \rangle^3$	1.58 ± 0.06	1.556	1.81 ± 0.08	1.81 ± 0.03	1.77 ± 0.07	1.97 ± 0.06	1.96 ± 0.05	1.97 ± 0.05
$C_4 = \langle n^4 \rangle / \langle n \rangle^4$	2.36 ± 0.15	2.333	2.99 ± 0.18	2.97 ± 0.08	2.85 ± 0.17	3.44 ± 0.17	3.41 ± 0.15	3.40 ± 0.15
$C_5 = \langle n^5 \rangle / \langle n \rangle^5$	3.86 ± 0.36	3.889	5.42 ± 0.44	5.33 ± 0.25	5.03 ± 0.42	6.66 ± 0.49	6.60 ± 0.45	6.44 ± 0.41

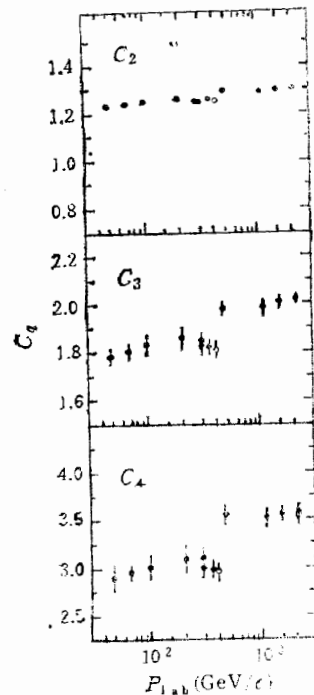
* 三火球模型的计算值^[13].

图5 非弹性过程带电粒子多重数分布的矩随实验室系动量的变化

○ 本实验; ● 其他能量

能量以下数据的 KNO 标度行为。

由图2、图4和图5所示的结果表明,在实验室系动量为50—400GeV/c范围内,pp非弹性过程的多重数分布具有KNO标度行为。但是,到ISR能区,非弹性过程的多重数分布已偏离KNO标度,例如色散 D 和平均多重数 $\langle n \rangle$ 满足Wroblewski关系;多重数分布的矩 C_q 在实验误差范围内并不是与能量无关的常数。

三火球模型对于描述非单衍过程的多重数分布是成功的。

作者对CERN NA27合作组提供LEBC照片和蔡昶教授的有益讨论表示感谢。

参 考 文 献

- [1] UA5 Collaboration, G. J. Alner et al., *Phys. Reports*, **154**(1987), 247.
 [2] A. Breakstone et al., *Phys. Rev.*, **D30**(1984), 528.
 [3] C. Bromberg et al., *Phys. Rev. Lett.*, **31**(1973), 1563.
 [4] EHS-RCBC Collaboration, J. L. Bailly et al., *Z. Phys. C-Particles and Fields*, **23**(1984), 205.
 [5] J. Whitmore, *Phys. Reports*, **10C** (1974), 273.
 [6] M. Roos et al., Review of Particle Properties, *Phys. Lett.*, **111B**(1982), 1.
 [7] M. Derrick et al., *Phys. Rev.*, **D9**(1974), 1853.
 [8] J. Benecke et al., *Nucl. Phys.*, **B76**(1974), 29.
 [9] A. Wroblewski, Review of Experimental Data on Multiparticle Hadronic Reactions, Kayserberg, June, 1977.
 [10] 刘连寿, 高能强子碰撞多重产生的三火球模型, 华中师范大学出版社, 1987.
 [11] P. Slattery, *Phys. Rev. Lett.*, **29**(1972), 1624.
 [12] Ina Sarcevic, *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 403.
 [13] Liu Lian-sou and Meng Ta-chung, *Phys. Rev.*, **D27**(1983), 2640.
 [14] A Wroblewski, *Acta Phys. Pol.*, **B4**(1973), 857.
 [15] W. Thome et al., *Nucl. Phys.*, **B129**(1977), 365.
 [16] F. T. Dao et al., *Phys. Rev. Lett.*, **29**(1972), 1627.

MULTIPLICITY DISTRIBUTIONS OF CHARGED PARTICLES PRODUCED IN pp COLLISIONS AT 400 GeV/c

WANG SHAOSHUN ZHANG JIE

XIAO CHENGUO YE YUNXIU SHI GUOSHUN

FANG RONG YANG JIE

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

ABSTRACT

Charged particle multiplicity distributions in pp collisions at 400 GeV/c have been studied by using the LEBC films which were offered by CERN NA27 Collaboration.

The corrections to the raw data are described. The results are compared with data at other energies. It is shown that the charged particle multiplicity distribution for the non single diffractive process has KNO scaling behavior, whereas for the inelastic process shows a deviation from KNO scaling up to ISR energy.