

# 强子-强子碰撞中硬分量存在的 又一实验证据\*

刘红平 刘峰 吴元芳 刘连寿

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

1996-06-27 收稿

## 摘 要

对  $\sqrt{s} = 540\text{GeV}$  能量下的高能强子-强子碰撞得到的单事件平均横动量  $\bar{p}_t$  对多重数  $N$  的散点图进行了仔细分析后指出: 其中大多重数、大  $\bar{p}_t$  事件是碰撞过程中出现硬分量的又一个实验证据, 并用仅含软分量的单分量模型和既含软分量又含硬分量的二分量模型的 Monte Carlo 模拟定性证实了这一论断。

**关键词** 强子-强子碰撞, 硬分量, 软分量, 单分量模型, 二分量模型。

## 1 引 言

强子-强子碰撞中观察到的大横动量喷注事件<sup>[1]</sup>, 是对 QCD 理论的强有力支持, 但是, 这类入射强子中部分子间的硬碰撞事件只占整个非弹性散射截面的一小部分. 1985 年, UA1 实验组<sup>[2]</sup>用他们寻找微喷注的方法, 探测到微喷注的存在. 他们发现, 在质心系能量  $\sqrt{s} = 540\text{GeV}$  时, 强子-强子碰撞中微喷注事件占有所有非单衍事件的 12%. 因为这种微喷注和非喷注事件具有不同的多重数分布, 文献 [2] 的作者认为, 这种不同分布正好说明, 除了传统的软分量外还有一个新的“微喷注”或半硬分量. 但是, 文献 [3] 的作者则指出, 这种不同分布也可以归因于软过程中的剧烈统计起伏.

硬过程存在的直接证据最初来自横动量分布. 例如, 在能量低于和高于 ISR 能量时, 平均横动量对多重数的不同依赖行为表明, 在对撞机能量下出现了新的分量——硬分量. 即在 ISR 能量以上, 由于产生喷注或其它硬过程, 致使平均横动量与多重数关系曲线的斜率增大<sup>[4]</sup>.

1992 年, 吴元芳等<sup>[5]</sup>指出, 单事件平均横动量  $\bar{p}_t$  是一个较好地反映事件软硬程度的量. 这里,  $\bar{p}_t$  定义为:

$$\bar{p}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{ti}, \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金、国家教委优秀教师基金和武汉市青年科技展光基金资助。

其中,  $p_{i\perp}$  是第  $i$  个粒子的横动量.

1994 年, 她们用 1985 年 UA1 最小无偏数据绘出了单事件平均横动量  $\bar{p}_\perp$  对多重数  $N$  的散点图<sup>[6]</sup>, 见图 1(a). 由图可见, 事件主要密集于随  $N$  增大  $\bar{p}_\perp$  分布变窄的区域, 同时在这个区域的右上方仍有相当多的大  $\bar{p}_\perp$  事件.

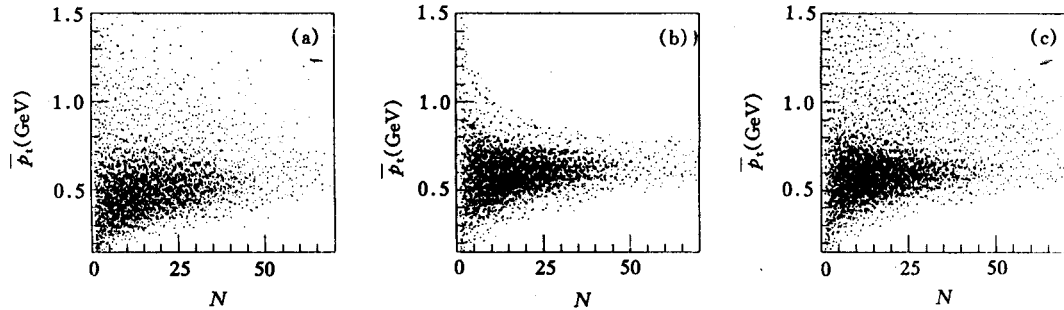


图 1  $\bar{p}_\perp$  对  $N$  散点图

(a) UA1 实验数据; (b) 单分量模型; (c) 二分量模型. 实验数据取自文献 [6].

事件密集的区域随  $N$  增大而  $\bar{p}_\perp$  分布变窄, 这是很容易理解的. 因为在此碰撞能量下, 大部分事件是由软过程产生的, 其末态粒子的横动量都比较小; 由于统计起伏, 多重数很小时  $\bar{p}_\perp$  的分布展得很宽. 这一过程的统计起伏将随  $N$  的增加而减小, 使  $\bar{p}_\perp$  迅速趋于总的平均横动量  $\langle p_\perp \rangle$ .

在密集区域的右上方还有相当多的事件, 其  $\bar{p}_\perp$  远大于  $\langle p_\perp \rangle$ , 这些事件点不能仅由软过程的统计起伏得到. 这表明, 在这一对撞能量下除了软过程外还出现了另一产生粒子的机制——硬过程.

为了更定量地说明  $N$  大时相当宽的  $\bar{p}_\perp$  分布是出现硬分量的证据, 我们用单分量和二分量模型的 Monte Carlo 模拟来作具体的演示.

## 2 单分量模型

单分量模型即只有一个产生粒子机制的模型. 所以, 在此模型中横动量分布具有唯一的形式, 取为<sup>[7]</sup>:

$$P^{(N)}(p_\perp) = a e^{-bp_\perp^2}, \quad (2)$$

$P^{(N)}(p_\perp)$  是固定多重数时平均横动量分布. 其中参数  $a, b$  由归一化和固定多重数时的平均横动量决定 (由于实验测量中有横动量截断  $p_\perp > 0.15 \text{ GeV}/c$ , 所以积分下限从 0.15 开始):

$$\int_{0.15}^{\infty} P^{(N)}(p_\perp) dp_\perp = 1, \quad (3)$$

$$\int_{0.15}^{\infty} P^{(N)}(p_\perp) p_\perp dp_\perp = \langle p_\perp \rangle^{(N)}, \quad (4)$$

这里,  $\langle p_\perp \rangle^{(N)}$  是由实验数据得到的固定多重数时的平均横动量, 其多重数分布由负二项

式分布<sup>[8]</sup>

$$P(N) = \frac{(N+K-1)!}{N! (K-1)!} \left(1 + \frac{K}{\langle N \rangle}\right)^{-N} \left(1 + \frac{\langle N \rangle}{K}\right)^{-K}$$

给出, 其参数  $\langle N \rangle = 15.55$ ,  $K = 2.9$ .

用这个简单模型我们产生了 200000 个 Monte Carlo 模拟事件(图 1(b)), 其分布式(2)中的主要参数见表 1. 由图可见, 事件点的分布与实验得到的散点图 1(a)中事件点密集的区域相似, 即统计起伏导致小  $N$  时  $\bar{p}_t$  分布较宽; 随着  $N$  的增大,  $\bar{p}_t$  的分布宽度迅速变窄, 并趋于其平均横动量  $\langle p_t \rangle^{(N)}$ . 但是这一单分量模型无法得到实验的散点图中大  $N$  处的大  $\bar{p}_t$  点. 换句话说, 实验中观察到的大  $N$  时  $\bar{p}_t$  的分布仍有相当的宽度无法由单分量模型中的统计起伏得到.

表 1 各种多重数区间(2)式中参数  $\langle p_t \rangle$ ,  $b$  的取值.

$N$	1—5	6—10	11—15	16—20	21—25	26—30	31—35	35—40
$\langle p_t \rangle$	0.469	0.471	0.485	0.502	0.520	0.537	0.550	0.565
$b$	2.335	2.283	2.049	1.808	1.589	1.417	1.303	1.181
$N$	41—45	46—50	51—55	56—60	61—65	66—70	71—75	76—80
$\langle p_t \rangle$	0.577	0.585	0.601	0.606	0.615	0.626	0.646	0.641
$b$	1.100	1.045	0.949	0.925	0.877	0.825	0.738	0.758

为了更定量地描述上述现象, 我们计算了固定多重数时  $\bar{p}_t$  分布的标准偏差, 它定义为:

$$\sigma(\bar{p}_t)|_N = \sqrt{\langle \bar{p}_t^2 \rangle_N - \langle \bar{p}_t \rangle_N^2}. \quad (5)$$

由 UA1 实验数据和上述单分量模型得到的结果见图 2. 可以看出, 由单分量模型得到的  $\sigma(\bar{p}_t)|_N$  随着  $N$  的增大而迅速减小, 这表明只有一个分量的简单统计起伏不足以解释实验现象.

单分量模型不能再现实验得到的  $\bar{p}_t - N$  散点图这一事实从物理上是很容易理解的. 因为在单分量模型中, 仅有一个产生末态粒子的机制, 或者说唯一的横动量分布形式(2)式. 对多重数  $N$  很大的事件,  $\bar{p}_t$  的值将非常接近  $\langle p_t \rangle^{(N)}$ , 即大  $N$  事件的  $\bar{p}_t$  分布将变得越来越窄, 而不可能保持一定的宽度. 这一定性结论不依赖于模型中所用的  $p_t$  分布具体形式及参数.

由此可见, 单分量模型的统计起伏不可能导致大  $N$  时实验所得到的宽度. 这一分析表明, 我们的模型还必须至少引进另一种

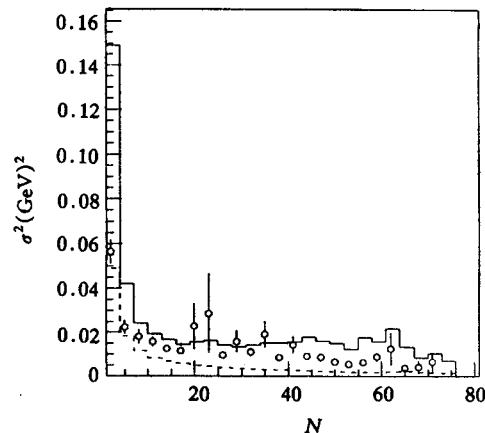


图 2 固定  $N$  时  $\bar{p}_t$  的标准偏差随  $N$  的变化

圆点: UA1 实验数据; 虚线: 单分量模型;

实线: 二分量模型. 实验数据取自文献 [6].

横动量分布, 即另一种产生粒子的机制.

### 3 二分量模型

对分子间的硬碰撞事件与非硬碰撞事件, 其末态粒子的横动量分布是不同的, 即硬分量衰减得慢, 软分量衰减得快. 在我们的二分量模型中, 两个分量的横动量分布选为:

$$P_{(h)}^{(N)}(p_t) = a_{(h)} e^{-b_{(h)} p_t}, \quad (6)$$

$$P_{(s)}^{(N)}(p_t) = a_{(s)} e^{-b_{(s)} p_t^2}, \quad (7)$$

其中参数  $a_{(i)}$ ,  $b_{(i)}$ ,  $i = h, s$  仍由归一化条件及实验测量到的平均横动量定出, 即

$$\int_{0.15}^{\infty} P_{(i)}^{(N)}(p_t) dp_t = 1, \quad (8)$$

$$\int_{0.15}^{\infty} P_{(i)}^{(N)}(p_t) p_t dp_t = \langle p_t \rangle_{(i)}^{(N)} \quad (9)$$

决定. 其中, 两种分量的固定多重数时的总平均横动量  $\langle p_t \rangle_{(s)}^{(N)}$  和  $\langle p_t \rangle_{(h)}^{(N)}$  可分别由实验数据得到, 即用单事件平均横动量  $\bar{p}_t = 0.65 \text{ GeV} / c$  把事件样本分成两部分,  $\bar{p}_t < 0.65 \text{ GeV} / c$  的事件对应“软分量”,  $\bar{p}_t > 0.65 \text{ GeV} / c$  的事件对应“硬分量”, 分别测出其横动量的值. 其具体取值见表 2.

表2 各种多重数区间(6)–(9)式中参数  $\langle p_t \rangle_i$ ,  $b_i(i=h, s)$  及  $\alpha_h$  的取值

$N$	1–5	6–10	11–15	16–20	21–25	26–30	31–35	35–40
$\langle p_t \rangle_{(h)}$	0.804	0.753	0.734	0.728	0.730	0.727	0.718	0.725
$\langle p_t \rangle_{(s)}$	0.424	0.450	0.468	0.484	0.501	0.515	0.527	0.540
$b_h$	1.553	1.820	2.098	2.192	2.171	2.212	2.378	2.249
$b_s$	3.396	2.719	2.354	2.073	1.822	1.645	1.521	1.397
$\alpha_{(h)}$	0.117	0.071	0.067	0.075	0.084	0.102	0.121	0.140
$N$	41–45	46–50	51–55	56–60	61–65	66–70	71–75	76–80
$\langle p_t \rangle_{(h)}$	0.713	0.711	0.719	0.708	0.702	0.695	0.694	0.701
$\langle p_t \rangle_{(s)}$	0.550	0.557	0.566	0.572	0.577	0.589	0.605	0.581
$b_h$	2.472	2.541	2.341	2.584	2.715	2.353	2.366	2.726
$b_s$	1.299	1.247	1.173	1.133	1.096	1.022	0.928	1.071
$\alpha_{(h)}$	0.161	0.184	0.227	0.249	0.302	0.348	0.462	0.500

由于硬事件和软事件的末态粒子横动量分别由(6)式和(7)式产生, 因此在进行 Monte Carlo 时还必须知道什么条件下运用(6)式产生硬事件, 什么条件下运用(7)式产生软事件, 即硬事件、软事件分别出现的几率  $\alpha_h$  和  $1 - \alpha_h$ . 固定多重数时, 硬分量比例常数  $\alpha_h$  可由等式

$$(1 - \alpha_h) \langle p_t \rangle_{(s)}^{(N)} + \alpha_h \langle p_t \rangle_{(h)}^{(N)} = \langle p_t \rangle^{(N)} \quad (10)$$

得到. 见表 2 中最后一行. 当多重数  $N > 10$  以后,  $\alpha_h$  值随多重数的增加单调上升, 这和

人们普遍认为的随多重数的增加, 硬分量出现的可能性变大相一致.

由二分量模型 Monte Carlo 模拟得到的  $\bar{p}_t$  对  $N$  散点图 1(c) 中, 除了单分量模型中出现的那部分外, 其右上方还有相当多的事件点. 二分量模型的结果与实验得到的散点图 1(a) 定性吻合. 而且, 由二分量模型得到的标准偏差与实验结果有很类似的变化行为, 见图 2.

## 4 结论与讨论

我们详细地分析了对撞机能量下强子-强子碰撞中硬过程存在的实验现象, 实验中以多重数和单事件平均横动量为变量的散点图中存在随  $N$  增大而  $\bar{p}_t$  分布宽度变窄的事件点较为密集的区域, 并且在其右上方仍有相当多的大  $N$ 、大  $\bar{p}_t$  事件点. Monte Carlo 模拟表明, 单分量模型中的统计起伏不能解释这种现象, 而二分量模型得到的结果与实验的散点图基本吻合.  $\bar{p}_t$  分布的标准偏差随多重数增加在单分量模型中迅速减小, 而在二分量模型中缓慢变小并与实验结果相一致. 这些事实和分析说明, 在对撞机能量下新的, 即硬分量的出现.

在我们的单分量模型和二分量模型中, 横动量分布形式是不唯一的, 然而, 这并不影响我们得到的定性结果, 即单分量模型不能象实验中的散点图那样, 既得到随  $N$  增大  $\bar{p}_t$  分布宽度变窄的密集区域, 又得到其右上方的大  $N$  大  $\bar{p}_t$  事件点, 而二分量模型可以得到这些分布特征.

作者感谢 B. Buschbeck 和 M. Markytan 的有益讨论.

## 参 考 文 献

- [1] M. Banner *et al.* (UA2), *Phys. Lett.*, **118B**(1982)203; G. Arnison *et al.* (UA1), *Phys. Lett.*, **123B**(1983)115.
- [2] G. Ciapetti (UA1), in Proceedings of the Fifth Topical Workshop on Proton-Antiproton Collider Physics, St. Vincent Aosta Valley, Italy, 1985, edited by M. Greco (World Scientific, Singapore, 1985) p.488;
- [3] Chao Wei-qin, Meng Ta-chung, Pan Ji-cai, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987)1399.
- [4] X. N. Wang, R. C. Hwa, *Phys. Rev.*, **D39**(1989)187.
- [5] Wu Yuanfang, Liu Lianshou, *Phys. Lett.*, **269B**(1991)28.
- [6] Y. F. Wu *et al.* (UA1), *Acta Phys. Slov.*, **44**(1994)141.
- [7] Liu Feng, Wu Yuanfang, Liu Lianshou, *Chinese J. of Nucl. Phys.*, **15**(1993)7.
- [8] UA5 Collaboration, *Phys. Lett.*, **160B**(1985)199.

## An Experimental Evidence for the Appearance of Semihard Processes in Hadron-Hadron Collisions at Collider Energies

Liu Hongping   Liu Feng   Wu Yuanfang   Liu Lianshou

*(Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430070)*

Received 27 June 1996

### Abstract

After carefully analysing the scatter plot of  $\bar{p}_t$  vs.  $N$  of hadron-hadron collisions at  $\sqrt{s}=540\text{GeV}$ , we point out that the appearance of large average transverse momentum per event  $\bar{p}_t$  and large multiplicity  $N$  is a new experimental evidence of existing hard component at the collision. The Monte Carlo simulation for one (soft) and two (both hard and soft) component model demonstrates qualitatively correctness of this argument.

**Key words** hadron-hadron collision, hard component, soft component, one-component model, two-component model.