

400GeV/c pp 碰撞中的非热相跃迁*

王韶舜 刘冉 汪兆民

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 利用 CERN NA27 合作组提供的 LEBC 泡室照片测量了 400GeV/c pp 碰撞产生的带电粒子横快度分布. 利用星形积分法计算标度阶乘矩 F_q 直至 $q = 7$. 分析结果表明可能存在非热相跃迁和两种不同的多粒子产生方式. 观察到涨落的多重分形结构支持粒子产生的随机级联模型.

关键词 非热相跃迁 多重分形性 星形积分 尖峰事例

1 引言

对高能粒子碰撞中产生的尖峰事例已研究了很长时间. 尖峰事例可能具有十分不同的特点. 例如 JACEE 事例^[1]包含了許多尖峰和空穴, 而 NA22 事例^[2]则只有一个尖峰. 这可能表明存在不同的间歇事例. Peschanski 指出自相似级联可能在不同相内发生^[3]. 在正常相情况, 事例具有许多尖峰和空穴; 而在旋转玻璃体相 (spin-glass phase) 事例可能只包含一两个尖峰. 为了研究事例的不同的间歇行为, 通常用计算标度阶乘矩的方法来实现. 标度阶乘矩的定义如下:

$$F_q(\delta\eta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\langle n_m(n_m-1)\cdots(n_m-q+1) \rangle}{\langle n_m \rangle^q}, \quad (1)$$

其中 n_m 是一个事例在第 m 个子区间中的粒子数, $\delta\eta$ 是子区间的大小, M 是总的子区间数, $\langle \cdots \rangle$ 表示对所有事例求平均. 动力学涨落是由阶乘矩随 M 的变化具有幂数规律来表征的, 即

$$F_q \sim M^{\phi_q}. \quad (2)$$

间歇指数 ϕ_q 与反常分形维数 d_q 有以下关系:

$$d_q = \phi_q / (q - 1). \quad (3)$$

1998-07-16收稿, 1998-10-21收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目19675033

当 d_q 不随 q 变化时, 涨落的内部结构是用单分形来表征. 这是夸克-胶子等离子体的形成和发生二级相跃迁的一种可能信号. 当 d_q 随 q 变化时, 则为多重分形, 对应于随机级联过程. 这时可能发生非热相跃迁或无相跃迁发生. 存在非热相跃迁的信号是函数^[4,5]

$$\lambda_q = (\phi_q + 1)/q \quad (4)$$

在 $q = q_c$ 时为极小值. 在 $q > q_c$ 和 $q < q_c$ 区域, 多粒子系统的行为是不同的. $q < q_c$ 区域对应于大量的一个子区间中粒子数不超过 q_c 的小的涨落; 而 $q > q_c$ 区域决定于少量的大涨落. 这种情况如同液体 (许多小的涨落) 和灰尘 (几个密度很高的颗粒) 两相共存. 因此观察到 λ_q 分布具有极小值表明可能有非热相跃迁的发生. 到目前为止只有在核-核碰撞中观察到 λ_q 分布具有极小值^[6]. 由于在强子-强子碰撞中 F_q 只计算到 $q = 5$, 观察不到 λ_q 分布有极小值的行为. 本文利用星形积分法计算阶乘矩达到较高的阶数以观察 λ_q 分布的行为.

2 实验结果

利用 CERN NA27 合作组提供的 LEBC 泡室照片测量了 400 GeV/c pp 碰撞产生的带电粒子赝快度分布, 测量方法详见参考文献 [7], 总共测量了 3730 个 $N_{ch} \geq 4$ 的非单衍事例. 其中 3217 个在赝快度区间 $[-2, 2]$ 内有 4 个以上带电粒子的事例被用于分析.

利用通常方法计算 F_q 不可能得到有统计意义的高阶 F_q . 因为赝快度空间 $\Delta\eta$ 被分割成 M 个子区间. 一个粒子集团的最大间隔小于子区间的宽度 $\delta\eta = \frac{\Delta\eta}{M}$, 但由于分割的偶然性, 集团的粒子可能并不处于同一子区间而是处于相邻的两个子区间, 计算高阶矩时则被抛弃了. 这导致高阶矩随 $\delta\eta$ 的减小而强烈地变化. 另一原因是事例的平均多重数不大 ($\bar{n} \approx 10$), 由于 F_q 的阶数越高要求子区间内的粒子数越多, 这种事例的统计数越小, 统计涨落也越大.

图 1 是利用通常方法计算的阶乘矩 F_q 随 M 的变化. 由图可见, 当矩的阶数 $q > 5$ 时, 涨落太大, 得不到有意义的结果. 为了移去粒子集团被偶然分割而导致的人为的涨落以及增加统计数, 采用 E. C. Eggers 等人提出的星形积分法来计算阶乘矩^[8]. 其要点是: 在归一化自变量空间, 选定粒子集团大小 $\delta\eta$, 以某一事例的某一粒子 x_i 为中心, 凡是与 x_i 的距离不大于 $\delta\eta$ 的粒子均属于同一粒子集团, 并记录集团中的粒子数. 此过程遍历该事例中的每一粒子. 对所有事例重复上述过程, 最后得到各种粒子集团的大小和数目并计算各阶 F_q . 归一化因子则采用事例混合技术^[8]. 改变 $\delta\eta$ (即 M) 的大小重复以上过程, 可得 F_q 随 M 的变化图.

为了避免赝快度空间粒子密度 $\rho(\eta)$ 分布不均匀引起的附加涨落, 计算时采用累积变量^[9]

$$x(\eta) = \frac{\int_{\eta_{\min}}^{\eta} \rho(\eta') d\eta'}{\int_{\eta_{\min}}^{\eta_{\max}} \rho(\eta') d\eta'} \quad (5)$$

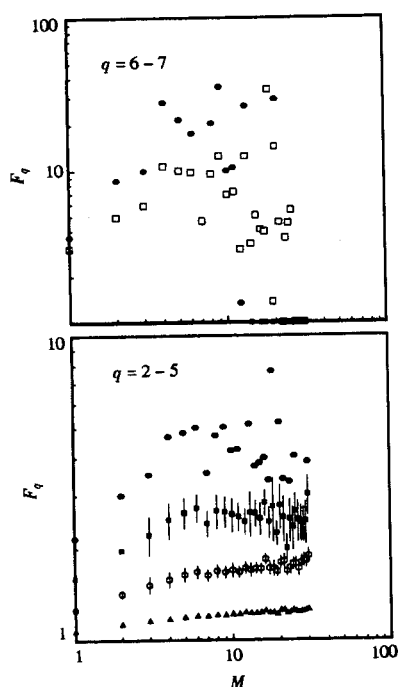


图 1 利用通常方法得到的 F_q 随 M 的变化
 $q = 2-5$: \blacktriangle $q = 2$, \circ $q = 3$, \blacksquare $q = 4$, \bullet $q = 5$;
 $q = 6-7$: \square $q = 6$, \bullet $q = 7$.
 高阶矩的误差棒被略去了。

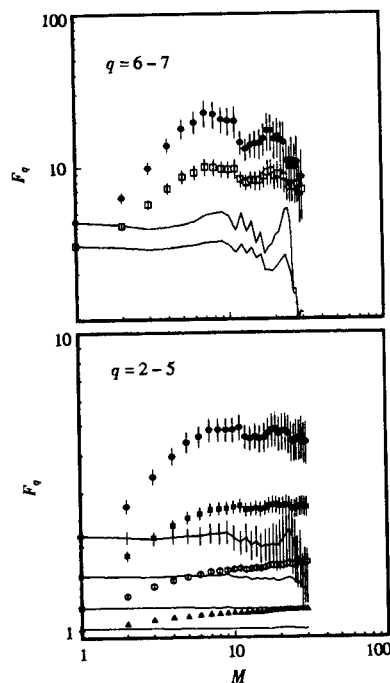


图 2 利用星形积分法得到的 F_q 随 M 的变化
 $q = 2-5$: \blacktriangle $q = 2$, \circ $q = 3$, \blacksquare $q = 4$, \bullet $q = 5$;
 $q = 6-7$: \square $q = 6$, \bullet $q = 7$.
 实线是蒙特卡罗事例的结果。

其中 $[\eta_{\min}, \eta_{\max}]$ 被选择为 $[-2, 2]$, x 在 $[0, 1]$ 区间内均匀分布. 利用星形积分法计算的结果示于图 2 中. 由图 2 清楚可见, 统计涨落被显著地降低了.

为了观察纯统计涨落对 F_q 的贡献, 产生一蒙特卡罗事例样本. 与实验数据相比, 蒙特卡罗事例具有同样的多重数分布和同样的事例数, 但是无关联. 对于一个具有 n 个粒子的事例, 将这 n 个粒子等几率随机地分布于 $[0, 1]$ 区间. 蒙特卡罗事例的计算结果用实线示于图 2 中. 在图中仅画出 $q = 5$ 时的误差棒, 高 q 值大 M 区域的涨落是由统计误差引起的. 由图可见, 对于蒙特卡罗事例, F_q 在误差范围内不随 M 的变化而变化, 即其值不超过 $M = 1$ 时的值. 表明无间歇现象发生.

对于实验数据, 在整个 M 变化区域不存在严格的幂律行为. 但在不同的 M 区间, 阶乘矩具有幂律行为. 在不同的 M 变化区间, 对 $\ln F_q$ 随 $\ln M$ 的变化作线性拟合, 得到的间歇指数 ϕ_q 列于表 1 中. 根据 (3) 和 (4) 式可以求得 d_q 和 λ_q .

表 1 在不同的 M 区间拟合得到的间歇指数 ϕ_q

	$q=2$	$q=3$	$q=4$	$q=5$	$q=6$	$q=7$
$15 \leq M \leq 19$	0.0488 ± 0.0070	0.102 ± 0.021	0.170 ± 0.030	0.358 ± 0.040	0.675 ± 0.095	0.971 ± 0.210
$13 \leq M \leq 19$	0.0382 ± 0.0040	0.0776 ± 0.0117	0.104 ± 0.024	0.202 ± 0.051	0.435 ± 0.084	0.759 ± 0.112
$12 \leq M \leq 22$	0.0384 ± 0.0018	0.0678 ± 0.0059	0.0646 ± 0.0131	0.106 ± 0.029	0.213 ± 0.058	0.361 ± 0.118
$2 \leq M \leq 11$	0.0453 ± 0.0031	0.117 ± 0.009	0.212 ± 0.020	0.336 ± 0.040	0.492 ± 0.068	0.678 ± 0.107

图 3 指出 λ_q 随 q 的变化. 由图可见至少有两种粒子产生方式存在. 一种是 λ_q 的分布有极小值出现. 即对于 $15 \leq M \leq 19$ 和 $13 \leq M \leq 19$ 区间拟合, λ_q 在 $q \approx 5$ 时出现极小值, 表明可能发生非热相跃迁或两相共存无相跃迁发生^[10]. 另一种是 λ_q 的分布没有极小值出现, 粒子的产生是一个非相变过程, 随机级联过程在单相内发生.

图 4 指出 d_q 随 q 的变化. 对于不同的拟合区间得到的 d_q 随 q 的变化是不同的. 这进一步表明存在不同的多粒子产生机制. d_q 不等于常数表明高能强子碰撞多粒子产生是多分形级联过程, 无夸克-胶子等离子体出现.

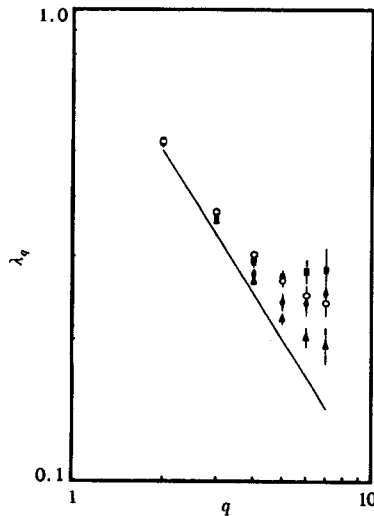


图 3 λ_q 随 q 的变化

直线表示无间歇现象发生.

■ $M = 15-19$, ◆ $M = 13-19$, ▲ $M = 12-22$,
○ $M = 2-11$.

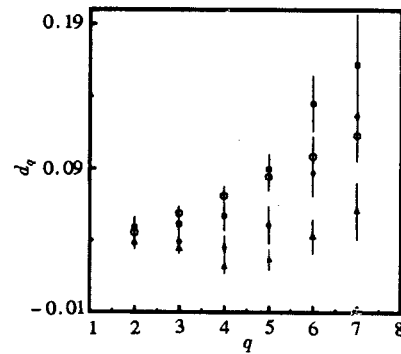


图 4 d_q 随 q 的变化

■ $M = 15-19$, ◆ $M = 13-19$, ▲ $M = 12-22$,
○ $M = 2-11$.

3 结果与讨论

利用 $400\text{GeV}/c$ pp 碰撞产生的带电粒子赝快度分布研究了多粒子产生中的动力学涨落和分形. 利用星形积分法计算标度阶乘矩直至 7 阶. 在不同的区间对 $\ln F_q$ 随 $\ln M$ 的变化作线性拟合得到的 d_q 和 λ_q 随 q 的变化具有不同的行为, 表明存在两种不同的粒子产生方式. λ_q 在 $q \approx 5$ 附近出现极小值表明可能存在非热相跃迁或两相共存无相跃迁发生. 另一种情况是 λ_q 无极小值出现表明随机级联过程是在单相内发生. d_q 不等于常数表明赝快度密度涨落具有多重分形结构. 阶乘矩的星形积分计算提供了一种可能区分两种粒子产生机制的方法. 由于星形积分的特点, 当 M 的变化范围取得适当时, 即子区间的大小与少数类似于自旋玻璃体的尖峰事例 (事例具有一、二个密的粒子集团) 的高密度粒子集团的宽度相当时, 这些事例对 F_q 的贡献就突出出来了. 在此 M 值附近 F_q 随 M 的变化反映了这些事例的特征. 当 M 的值过大或过小, 则大量的具有多个小粒子集团的事例对 F_q 的贡献掩盖了少数高密度粒子集团的贡献, 因此不同的 M 区间的拟合结果可能反映了不同

的粒子产生机制.

作者对 CERN NA27 合作组提供 LEBC 泡室照片和测量设备深表感谢.

参 考 文 献

- 1 Burnett T H et al (JACEE Coll.). Phys. Rev. Lett., 1983, **50**:2062
- 2 Adamus M et al (NA22 Coll.). Phys. Lett., 1987, **B185**:200
- 3 Peschanski R. Nucl. Phys., 1989, **B327**:144; Int. J. Mod. Phys., 1991, **A6**:3681
- 4 Bialas A. Nucl. Phys., 1991, **A525**:345c
- 5 Bialas A, Zalewski K. Phys. Lett., 1990, **B238**:413
- 6 Sarkisyan E K et al. Phys. Lett., 1995, **B347**:439; Jain P L, Singh G. Phys. Rev., 1991 **C44**:854; Ghosh D et al. Z. Phys., 1997, **C73**:269
- 7 Wang Shaoshun et al. Z Phys, 1995, **C68**:415
- 8 Eggers E C et al. Phys. Rev., 1993, **D48**:2041
- 9 Ochs W. Z. Phys., 1991, **C50**:339; Bialas A, Gazdzicki M. Phys. Lett., 1990, **B252**:483
- 10 Wolf E A, Dremin I M, Kittel W. Phys. Rep., 1996, **270**:1—141

Non-thermal Phase Transition in pp Collisions at 400 GeV/c*

Wang Shaoshun Liu Ran Wang Zhaomin

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract The pseudorapidity distribution for charged particles produced in pp collisions at 400 GeV/c has been measured by using the LEBC films offered by the CERN NA27 collaboration. The factorial moments up to $q=7$ have been calculated by star integral method. The analytic results indicate that a non-thermal phase transition and two different regimes of multiparticle production may exist. The multifractal structure of the fluctuation has been observed supporting the random cascade model of particle production.

Key words non-thermal phase transition, multifractality, star integral, spike events

Received 16 July 1998, Revised 21 October 1998

* Project 19675033 supported by Natinal Natural Science Foundation of China