

400GeV/c pp 碰撞多粒子产生过程的混沌行为*

王韶舜 汪兆民 刘冉

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 利用 400GeV/c pp碰撞多粒子产生的实验数据计算了 QCD 分支过程的熵指数,得到了非零值. 熵指数随末态粒子平均多重数的减小而增大. 表明在 400GeV/c pp 碰撞中有存在混沌性的迹象.

关键词 多粒子产生 QCD 分支过程 混沌行为 熵指数

1 引言

如何量度高能粒子碰撞多粒子产生过程中的混沌性是一个复杂的问题. 对于经典的非线性动力学, Lyapunov 指数 λ 能用来表征轨道之间的离散距离. 对于 QCD 分支过程, 不存在如此方便的描述. 最近, 曹珍和华家照研究了能表征高能粒子碰撞多重产生过程中的混沌性的信号问题^[1-3]. 他们定义了一个新的熵指数, 它是一个合适的参数, 能用来测量分支过程中的混沌行为. 它也提供了一种有效的方法以区别 QCD 分支过程中的原始部分是夸克还是胶子. 为了得到熵指数, 人们需要同时研究事例空间和相空间(如赙快度 η 空间). 对于每一个事例, 在 η 空间计算阶乘矩. 对于不同的事例, 阶乘矩的涨落是很大的. 熵指数描述这种涨落的程度, 即能定量地描述末态粒子的多重数分布和空间分布的涨落. 这是一个实验上容易测量的量.

本文利用 400GeV/c pp碰撞多重产生的实验数据来计算熵指数, 以便了解 pp 碰撞多重产生的混沌性问题.

2 事例空间的熵和熵指数

详细论述见文献 [2], 这里简要叙述如下: 赙快度空间被分割成 M 个等间隔的子区间. 对每一个事例 e 按以下公式计算归一化的阶乘矩:

$$F_q^e(M) = f_q^e(M) / (f_1^e(M))^q, \quad (1)$$

1997-09-09收稿

* 国家自然科学基金资助

其中

$$f_q^e(M) = M^{-1} \sum_{j=1}^M n_j (n_j - 1) \cdots (n_j - q + 1), \quad (2)$$

这里 n_j 是事例 e 在第 j 个子区间中的粒子数. 对于不同的事例, $F_q^e(M)$ 的涨落可能很大. 为了量度这种涨落的程度, 定义了一个新的矩^[1]

$$C_{p,q}(M) = \langle F_q^p(M) \rangle / \langle F_q^1(M) \rangle^p, \quad (3)$$

其中

$$\langle F_q^p(M) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{e=1}^N (F_q^e(M))^p, \quad (4)$$

这里 N 是样本的事例总数, p 是一个正的任意实数. 如果 $C_{p,q}(M)$ 随 M 的变化遵循幂数规律, 即

$$C_{p,q}(M) \propto M^{\varphi_q(p)}, \quad (5)$$

则可以定义

$$\mu_q = \left. \frac{d}{dp} \varphi_q(p) \right|_{p=1} \quad (6)$$

为新的熵指数. 事例空间的熵定义为

$$S_q = - \sum_{e=1}^N P_q^e \ln P_q^e, \quad (7)$$

其中

$$P_q^e = F_q^e(M) / \sum_{e=1}^N F_q^e(M). \quad (8)$$

熵与熵指数之间的关系为

$$S_p = \ln(NM^{-\mu_q}). \quad (9)$$

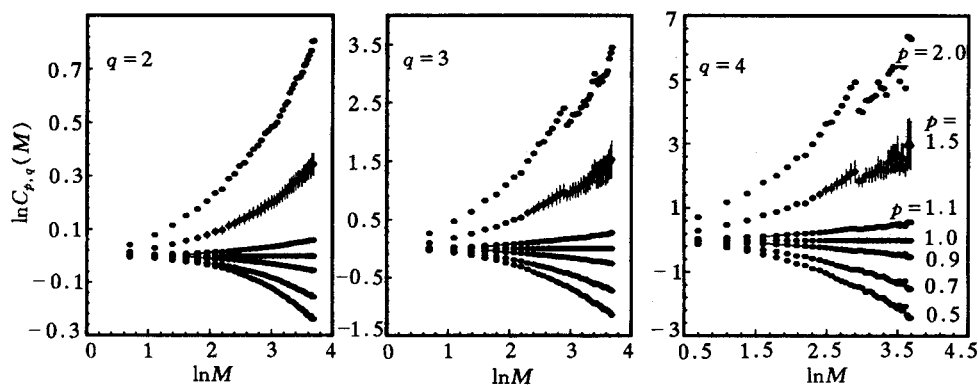
由上述公式可见, 小的熵指数对应于大的熵, 表明无混沌行为. 为了使熵变小, μ_q 必须是大的, 因此大的 μ_q 意味着混沌行为.

3 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多重数分布和赝快度分布, 测量方法详见参考文献 [4]. 共测量了 3730 个多重数 $N_{ev} \geq 4$ 的非单衍事例. 其中 $N_{ev} \geq 10$ 的事例有 2145 个.

由于在赝快度空间, 实验测得的单粒子密度分布是不均匀的. 为了消除单粒子密度分布 $\rho(\eta)$ 的不均匀性引起的效应, 利用累积变量 $x(\eta)$ 来代替 η , 其定义为^[5,6]

$$x(\eta) = \int_{\eta_1}^{\eta} \rho(\eta') d\eta' / \int_{\eta_1}^{\eta_2} \rho(\eta') d\eta', \quad (10)$$

图1 $\ln C_{p,q}(M)$ 随 $\ln M$ 的变化 (对 $N_{ev} \geq 4$ 的事例样本)

其中 η_1 和 η_2 是分布 $\rho(\eta)$ 的两个极端值. 在 x 空间单粒子密度在 0—1 范围内是均匀分布的. 将区间 0—1 分割成 M 个子区间并计算矩 $C_{p,q}(M)$, 其中 $q = 2, 3, 4; p = 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.5, 2.0; M = 1, 2, \dots, 40$. 图 1 画出了 $\ln C_{p,q}(M)$ 随 $\ln M$ 的变化. 在 $M = 5—25$ 范围内分别对 $q = 2, 3, 4$ 和 $p = 0.9, 1.1$ 的实验数据作线性拟合. 拟合结果示于表 1 中. 由这些参数可以得到熵指数, 其值示于图 2 中. 由图 2 可见熵指数确实很大.

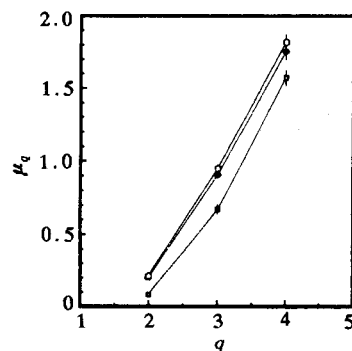
表1 对 $N_{ev} \geq 4$ 的事例样本的实验数据作线性拟合 ($y=ax+b$) 得到的拟合参数

q	p	a	b
2	0.9	-0.0197 ± 0.0009	0.0284 ± 0.0018
2	1.1	0.0209 ± 0.0009	-0.0289 ± 0.0018
3	0.9	-0.0897 ± 0.0022	0.1101 ± 0.0046
3	1.1	0.0923 ± 0.0020	-0.1064 ± 0.0042
4	0.9	-0.1743 ± 0.0049	0.1788 ± 0.0104
4	1.1	0.1760 ± 0.0060	-0.1659 ± 0.0127

对于 QCD 部分子簇射, 当固定的耦合常数 α_s 很小时, 特别是对于夸克喷注情况, 部分子的多重数是低的. 当平均多重数较低时, 涨落较大, 导致较大的 μ_q 值. 可以预期随着事例平均多重数的增加, μ_q 将减小. 为了了解 400GeV/c pp 碰撞多重产生过程是否具有类似的情况, 对以下四种多重数分布样本分别作同样的分析.

- (1) $N_{ev} \geq 8$;
- (2) $N_{ev} \geq 10$;
- (3) $4 \leq N_{ev} \leq 16$;
- (4) $4 \leq N_{ev} \leq 18$.

事例样本 (1) 和 (2) 对应于低多重数部分截断; 事例样本 (3) 和 (4) 对应于高多重数部分截断. 计算得到的 $\ln C_{p,q}(M)$ 随 $\ln M$ 的变化示于图 3 中. 为清楚起见, 图中

图2 μ_q 随 q 的变化

● $N_{ev} \geq 4$; □ $N_{ev} \geq 10$; ○ $4 \leq N_{ev} \leq 16$.

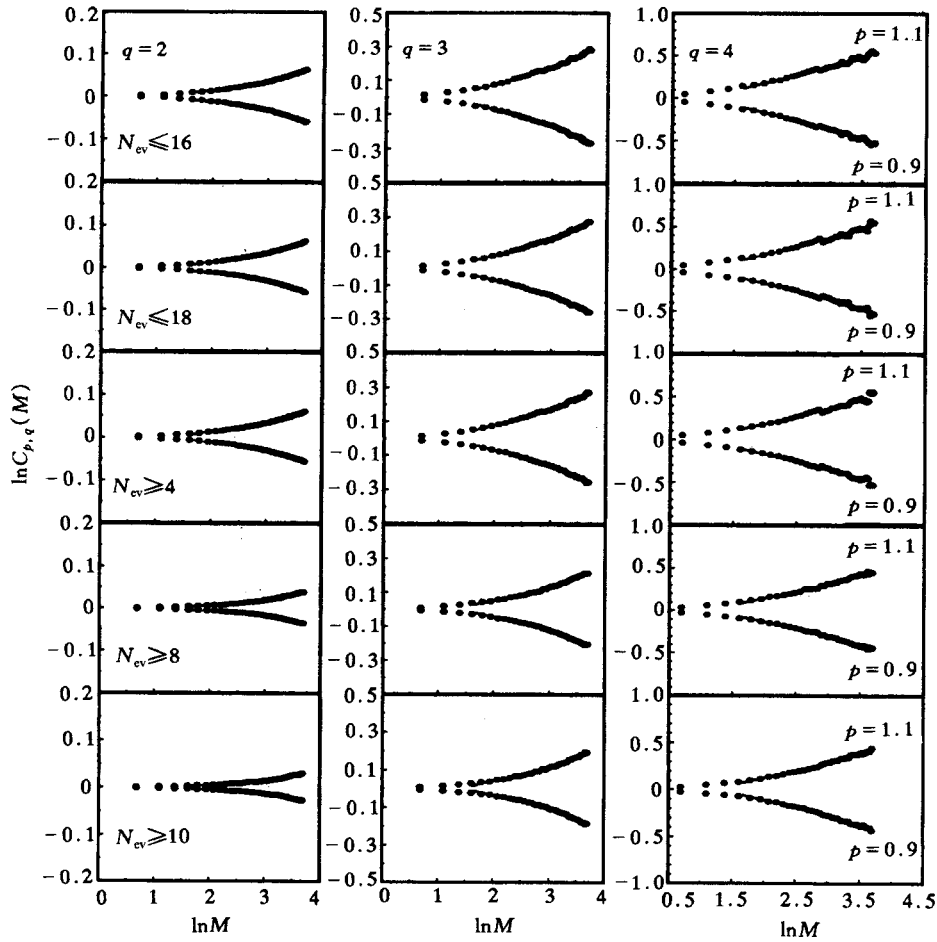
图3 平均多重数不同时 $\ln C_{p,q}(M)$ 随 $\ln M$ 的变化

表2 熵指数及有关参数

事例样本	事例数 N	平均多重数 η	熵指数		
			μ_2	μ_3	μ_4
$4 \leq N_{ev} \leq 16$	3478	9.61	0.214 ± 0.009	0.951 ± 0.022	1.818 ± 0.052
$4 \leq N_{ev} \leq 18$	3612	9.92	0.206 ± 0.009	0.934 ± 0.023	1.787 ± 0.060
$N_{ev} \geq 4$	3730	10.27	0.203 ± 0.009	0.909 ± 0.021	1.752 ± 0.054
$N_{ev} \geq 8$	2864	11.74	0.119 ± 0.007	0.753 ± 0.030	1.627 ± 0.050
$N_{ev} \geq 10$	2145	12.99	0.084 ± 0.005	0.670 ± 0.029	1.571 ± 0.052

只画出 $p = 0.9$ 和 $p = 1.1$ 的情况。

由图 3 可见, 平均多重数增大时, 矩 $C_{p,q}(M)$ 的值变小. 由此得到的熵指数以及有关参数列于表 2 中. 在图 2 中仅画出部分结果. 由图表可见, 随着平均多重数的增加, 熵指数确实变小了. 这与预期的结果是一致的.

4 结论

利用 400GeV/c pp 碰撞多重数分布和赝快度分布的实验数据, 计算了 QCD 分支过程的熵指数. 结果表明对于能量较低的 pp 碰撞过程, 熵指数明显不为零, 熵指数随末态粒子平均多重数的增加而减小. 表明在这一能量的 pp 碰撞中有存在混沌性的迹象, 平均多重数愈低, 混沌性越强.

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] Cao Zhen, Hwa Rudolph C. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:1268
- [2] Cao Zhen, Hwa Rudolph C. Phys. Rev. 1996, **D53**:6608
- [3] Cao Zhen, Hwa Rudolph C. Phys. Rev. 1996, **D54**:6674
- [4] Wang Shaoshun et al. Z. Phys., 1995, **C68**:415
- [5] Bialas A, Gardzicki M. Phys. Lett., 1990, **B252**:483
- [6] Ochs W. Z. Phys., 1991, **C50**:339

Chaotic Behavior of Multiparticle Production in pp Collisions at 400GeV/c*

Wang Shaoshun Wang Zhaomin Liu Ran

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

Abstract The entropy indices of QCD branching process are calculated from the data of 400GeV/c pp collisions. The nonzero values of entropy indices are obtained. The entropy indices are increased with decreasing average multiplicities of the final states. It means that there is a chaotic sign in pp collisions at 400GeV/c.

Key words multiparticle production, QCD branching process, chaotic behavior, entropy index

Received 9 September 1997

* Supported by the National Natural Science Foundation of China