

高能 $p\bar{p}$ 碰撞末态粒子的结团产生 和前后关联*

张 阳 刘连寿

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430070)

1992年11月24日收到

摘 要

本工作在三火球模型的基础上引进结团 (cluster) 机制对多种窗口的前后关联进行 Monte Carlo 模拟。与 $\sqrt{s} = 200, 546, 900 \text{ GeV}$ 的实验数据的符合表明了模型的合理性。同时从理论上说明了 cluster 机制对多重数关联的影响表现为短程加强, 长程减弱。

关键词 高能 $p\bar{p}$ 碰撞, 关联, KNO 标度无关, 三火球模型, 结团机制, Monte Carlo 模拟。

1 引 言

随着高能碰撞质心系能量的不断提高, 末态粒子数越来越多, 然而人们至今仍不完全了解这些末态粒子产生的动力学机制。末态粒子之间的前后多重数关联的研究是探测这种动力学机制的重要手段。

在快度轴上我们取两个窗口, 假定碰撞末态粒子落在前后两个窗口的多重数分别为 n_F, n_B 。实验表明有

$$\langle n_B(n_F) \rangle = a + bn_F,$$

其中斜率 b 表明了 n_F 和 n_B 之间的关联程度。我们把它定义为关联系数。而从统计学的意义上讲, n_F 和 n_B 之间的关联系数可定义为:

$$\rho = \frac{\text{cov}(n_F, n_B)}{[\text{var}(n_F)\text{var}(n_B)]^{1/2}} = \frac{\langle (n_F - \langle n_F \rangle) \cdot (n_B - \langle n_B \rangle) \rangle}{[\langle (n_F - \langle n_F \rangle)^2 \rangle \cdot \langle (n_B - \langle n_B \rangle)^2 \rangle]^{1/2}}, \quad (1)$$

它与 b 都反映了 n_F, n_B 关联的强弱, 两者之间有关系

$$b = \rho \left[\frac{\text{var}(n_B)}{\text{var}(n_F)} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

实验表明, 末态粒子的前后关联 b 存在以下特征^[1]:

1. 从 $\sqrt{s} = 5.6 \text{ GeV}$ 开始, 末态粒子就开始呈现出正的前后多重数关联, 关联强度

* 国家自然科学基金资助。

近似地随 $\ln \sqrt{s}$ 线性增长(图 2)。由图 2 可以看出,在同一能量下, $|y| < 4$ 与 $|y| < 1$ 的前后关联强度基本相等,而 $1 < |y| < 4$ 的前后关联强度比 $|y| < 4$ 的前后关联强度约小 0.15。

2. 对于挖去中心区(宽度为 y_{gap})的情况,前后关联强度随 y_{gap} 的增大线性地减小(图 3),关联强度减小到零的位置大致对应于快度平台宽度。

3. 如果考虑中心在 y_0 的前后快度窗口 ($1 < |y - y_0| < 2$) 的关联情况,则当 $|y_0| < 0.5$ 时,关联强度 b 基本不变,但当 y_0 继续增大时, b 将逐渐减小(图 4)。

4. 对于 $y_{gap} = 0$ 的窗口 ($|y| < y_{cut}$), 前后关联并不随着窗口大小而有显著变化(图 5)。

对于这一系列实验现象,我们用三火球模型进行了 Monte Carlo 模拟。发现如果模型中不包括 cluster 机制^[2], 则前后关联短程部分比实验值弱,因此在此基础上引入 cluster 机制,在 $\sqrt{s} = 200,546,900\text{GeV}$ 下,有 cluster 三火球模型模拟结果与实验值基本符合。

本文将首先说明我们所采用的模型框架,然后介绍模拟结果与实验值的比较情况,最后对 cluster 效应对前后关联的影响进行讨论。

2 模 型

2.1 三火球模型

三火球模型认为^[2],在 h-h 碰撞过程中,入射粒子相互穿过,然后在不同快度区域形成三个产生粒子的系统,对应于相应的快度区间称之为射弹火球 P^* , 中心火球 C^* 和侧边火球 T^* ,最后这三个火球分别独立地碎裂为末态强子。

对于末态粒子的产生过程,三火球模型有两个假定:

(1) 每个火球的横能随机地从两个人射能源中取得,即火球的横能分布为:

$$P(E_{i\perp}) = 4 \frac{E_{i\perp}}{\langle E_{i\perp} \rangle^2} e^{-2E_{i\perp}/\langle E_{i\perp} \rangle}, \quad (3)$$

$$i = C^*, P^*, T^*$$

(2) 在能量守恒和横动量截断的约束下,每个火球所产生的粒子的快度等几率地分布,即末态粒子的动量分布为:

$$P(p_{\parallel}, p_{\perp}) \propto \frac{e^{-\alpha p_{\perp}} e^{-\sqrt{p_{\parallel}^2 + p_{\perp}^2 + m^2}/T}}{\sqrt{p_{\parallel}^2 + p_{\perp}^2 + m^2}}, \quad (4)$$

2.2 快度关联及 cluster 机制

许多实验表明,碰撞末态粒子存在二粒子快度关联,关联函数 $C_n(y_1, y_2)$ 近似服从高斯分布,分布宽度 δ 不随能量而改变,当 y_1 在中心区内变化时, $C_n(y_1, y)$ 的图象几乎不变。这一系列现象可以被 cluster 机制所解释^[3]:

假定高能碰撞首先形成 cluster, 然后每个 cluster 各向同性地衰变成末态粒子,即:

$$\rho(y, y_c) = \frac{0.5}{\cosh^2(y - y_c)} \doteq \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{(y-y_c)^2}{\delta^2}}, \quad (5)$$

y, y_c 分别为末态粒子和 cluster 的快度。则可推得, cluster 机制能产生的快度关联函数为:

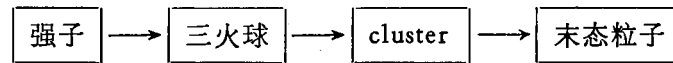
$$C_n(y_1, y_2) = \frac{\langle k(k-1) \rangle}{\langle k \rangle} \Big|_n \rho_n^1\left(\frac{y_1 + y_2}{2}\right) \frac{1}{2\sqrt{\pi\delta_n}} e^{-\frac{(y_1 - y_2)^2}{\delta_n^2}} - \frac{\rho_n^1(y_1)\rho_n^1(y_2)}{n} \left(1 + \frac{\langle k(k-1) \rangle}{\langle k \rangle} \Big|_n\right), \quad (6)$$

其中 k, δ_n 分别为 cluster 衰变的末态粒子数和衰变宽度。(6)式能很好地符合实验。将(6)式与实验测得的短程关联分布比较,可知衰变宽度 δ_n 和 $\langle k(k-1) \rangle / \langle k \rangle \Big|_n$ 的值随 \sqrt{s} 和多重数 n 变化不大。如果假定 cluster 衰变产物的多重数分布为 δ 函数或泊松分布,就可得到 $\langle k \rangle$ 。UA5 实验组假定 k 的分布为泊松分布,得^[1]:

$$\langle \delta_n \rangle = 0.71, \quad \langle k \rangle = 1.9.$$

2.3 引进 cluster 机制的三火球模型

鉴于粒子有成团产生的迹象,我们在原有三火球模型^[2]基础上引入 cluster 机制。这样粒子产生过程变为:



考虑到实验结果: 每个 cluster 约衰变成 2 个粒子, cluster 的衰变宽度不随 \sqrt{s} 改变,我们假定:

每个 cluster 质量一样大,并且每个 cluster 只衰变成正负两个 π 介子。这样,由能量动量守恒可知,在 cluster 质心系中两个 π 介子的速率大小恒定。如果 cluster 质量为 M , π 介子质量为 m ,则在 cluster 的静止系中 π 介子的速率为:

$$v = \frac{\sqrt{M^2 - 4m^2}}{M}.$$

π 介子的角分布为:

$$p(\theta)d\theta = \frac{1}{2} \sin \theta d\theta.$$

快度分布为:

$$\rho(y) = \frac{d\sigma}{dy} = \frac{1}{2\nu \cosh^2 y}, \quad (7)$$

由上式所确定的衰变宽度为:

$$\delta = \sqrt{y^2 - \bar{y}^2} = \left[- \int_{\tanh^{-1} v}^{\tanh^{-1}(-v)} \frac{y^2}{2\nu \cosh^2 y} dy \right]^{\frac{1}{2}}.$$

由实验值 $\delta = 0.71$ 可得 cluster 系中 π 介子速率为:

$$v \doteq 0.93c,$$

$$M = 0.76 \text{ GeV}/c^2.$$

值得一提的是,几年前蔡勳、赵维勤、孟大中等也在三火球模型中引进了 cluster 机制,他们假定 cluster 在某一快度区间中均匀分布,且各向同性衰变,由此计算了几个固定窗口的情况^[4]。本工作与此不同之处在于假定在能量守恒和横动量截断的约束下,三火球所产生的 cluster 快度等几率分布,并且用 Monte Carlo 方法模拟了多种变化窗口的关联情况。

3 Monte Carlo 模拟

3.1 流程图

下面给出按照以上提出的衰变图象进行 MC 模拟的流程图(图 1):

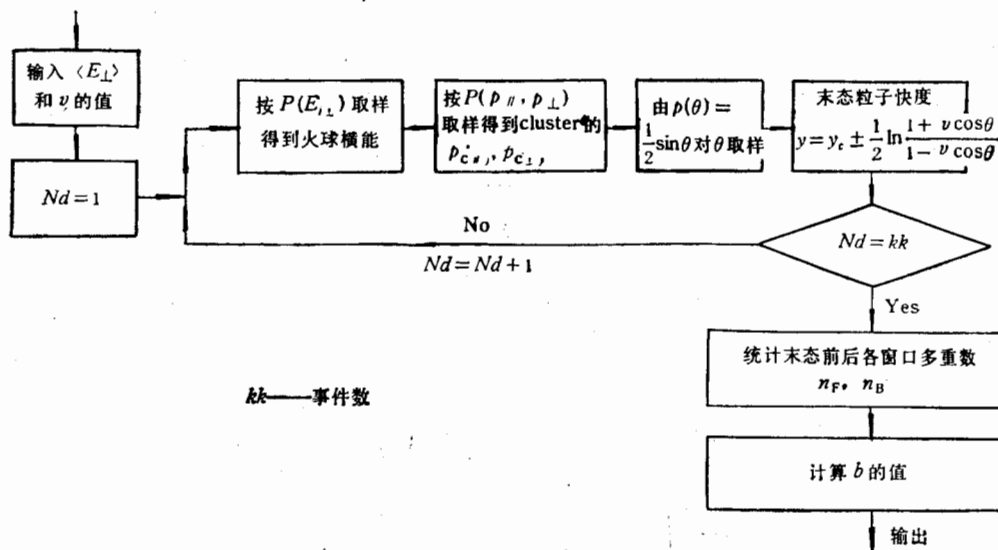


图 1

如果在流程图把 cluster 的快度直接当成末态粒子的快度,则得到无 cluster 三火球模型的流程图^[4]。

引入 cluster 机制后,为了使得末态粒子的多重数分布和快度分布仍与实验结果相符,对模型参数作了如下调整:

	\sqrt{s}	$\alpha = \langle n_c \rangle / \langle n \rangle$	总平均横能 $\langle E_{\perp} \rangle$	中心火球配分温度
无 cluster	200	0.646	18.35	4.0
	540	0.743		8.0
	900	0.770		10.5
有 cluster	200	0.531	12.80	1.3
	540	0.612	17.189	3.8
	900	0.650	21.31	5.0

3.2 模拟结果与实验的比较

按照前面所述前后关联的实验特点,我们分别对 $\sqrt{s} = 200, 546, 900\text{GeV}$ 的四种关联情况进行了模拟。下列图中“ Δ ”,“ \circ ”,“ \square ”分别代表实验、有 cluster 三火球模型和无 cluster 三火球模型的结果。

(1) 不同能量下的多重数关联(见图 2)。

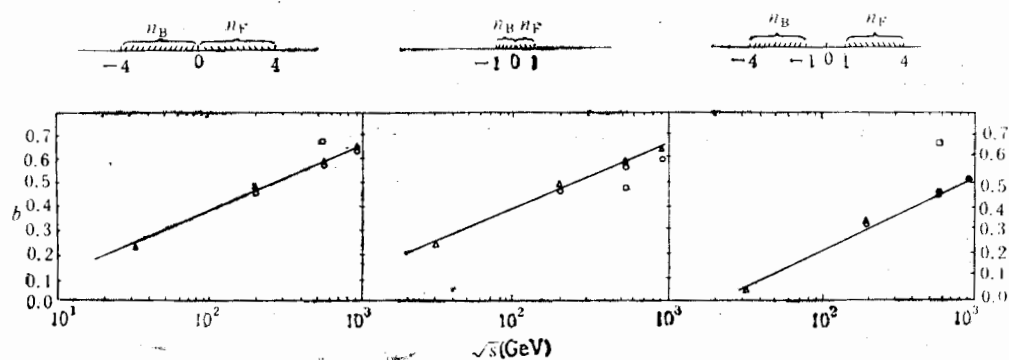


图 2

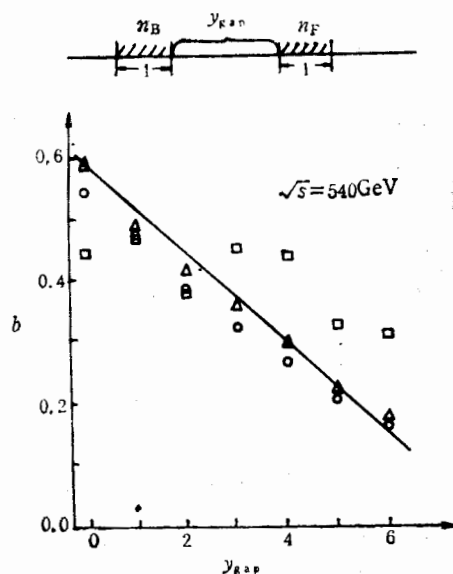


图 3

显然,有 cluster 三火球模型的模拟结果与实验相符, b 随 \sqrt{s} 单调递增。后面将讨论这一结果的物理原因。

(2) 中心 gap 增大时的前后关联(见图 3)。

由图 3 中可见,无 cluster 模拟结果短程部分明显低于实验值而长程部分高于实验值。加上 cluster 机制使前后关联的短程部分加强,长程部分减弱,接近于实验结果。

(3) gap 中心移动时的前后关联(见图 4)。

由于这涉及到不对称窗口的情况, b 和 ρ 有些不同(见(2)式)。与实验一样, 此处我们统计 ρ 的值。

图 4 中长程部分的关联系数 b 比实验值偏大。这可能是由于模型关于 cluster 的大小一样大, 且只衰变成两个粒子的假定过于粗糙。因为飞到长程处的 cluster 较小, 由此在长程处引起的关联较小。关于这一点, 我们将在今后的工作中进一步讨论。

(4) 窗口扩大时的前后关联(见图 5)。

实验和模拟都表明窗口扩大时, 关联强度变化不大。

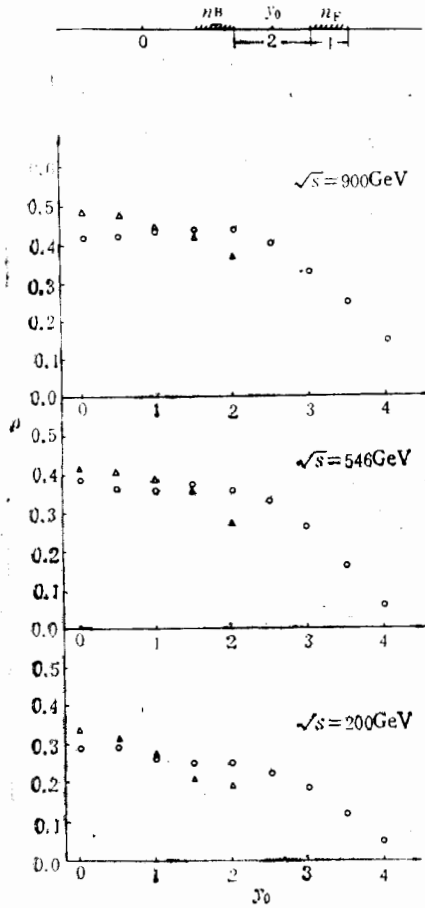


图 4

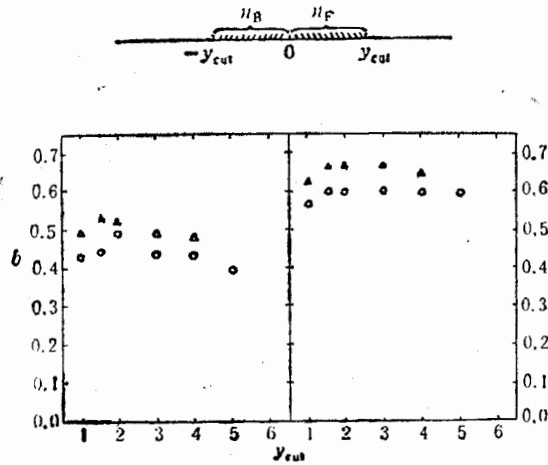


图 5

4 讨 论

以上模拟结果表明, 有 cluster 三火球模型的关联与实验数据符合得较好。从图 2 和图 3 中, 我们注意到, cluster 机制的引入对前后多重数关联长程部分和短程部分有不同的影响, 即长程部分减弱, 短程部分加强。下面我们讨论为什么会产生这样的影响。

考虑质心系中对 $y = 0$ 对称的前后窗口, 假定前后窗口中的多重数分别为 n_F, n_B , 令 $n_W = n_F + n_B$ 。UA5 实验组的实验表明, 在给定 n_W 的情形下, n_F 有一定的起伏, 假定 n_F 的分布为 $g_W(n_F)$, 其方差为 $d_W^2(n_F)$, 代入(1)式有:

$$b = \frac{D_w^2 - 4\langle d_w^2(n_F) \rangle n_w}{D_w^2 + 4\langle d_w^2(n_F) \rangle n_w}, \quad (8)$$

定性的讲, $g_w(n_F)$ 分布越尖锐, $d_w^2(n_F)$ 越小, 相应地 b 值就越大. 引进 cluster 机制后, 原来的末态粒子就被 cluster 所代替, 而一个 cluster 会衰变成 k 个末态粒子, 这样就使原来的 $g_w(n_F)$ 分布变宽, 相应地 b 值就变小了. 为了更清楚地看到这一点, 下面作具体说明.

由于 $p\bar{p}$ 碰撞的前后对称性, 我们可以假定 $g_w(n_F)$ 是二项式分布, 对于对称窗口, 每个粒子在 n_F 中的几率为 $p = \frac{1}{2}$, 而对于二项式分布 $C_{n_w}^{n_F}$

$$d_w(n_F) = p(1-p)n_w = \frac{1}{4}n_w,$$

引进 cluster 机制后, 如果忽略每个 cluster 末态粒子飞出母窗口的渗漏效应, 则 cluster 的分布服从二项式分布 $C_{n_w/k}^{n_F/k}$, 这种分布的方差为:

$$d_w(n_F) = \frac{1}{4}kn_w. \quad (9)$$

由(8)(9)式可见, 由于 $k > 1$, 故引入 cluster 机制后, $d_w(n_F)$ 变大, 前后关联系数变小.

显然, 对于前后关联短程部分, 也可以作类似地讨论, 但 cluster 效应还包含另一种效应: 每个 cluster 衰变的粒子可能分别落到相邻的两个窗口中, 这种效应显然会导致前后关联短程部分加强. 我们的模拟结果表明, 这种效应比二项式分布效应更强. 故 cluster 对前后关联的总体效应是: 短程加强, 长程减弱.

用同样的方法也可以说明为什么前后关联随 \sqrt{s} 的升高而增强.

将(9)式代入(8)式可得:

$$b = \frac{\langle n_w \rangle (D_w / \langle n_w \rangle)^2 - k}{\langle n_w \rangle (D_w / \langle n_w \rangle)^2 + k}, \quad (10)$$

由于 cluster 的衰变宽度及衰变多重数 k 对 \sqrt{s} 的依赖性很弱, \sqrt{s} 升高时, 火球的激发能升高导致 $\langle n_w \rangle$ 随 \sqrt{s} 升高而显著增加, 而低能时窗口 W 中的多重数分布满足 KNO 标度无关, $D_w / \langle n_w \rangle$ 不变, 高能时窗口 W 中的 KNO 标度无关破坏, $D_w / \langle n_w \rangle$ 随 \sqrt{s} 变大^[6], 故由(10)式, b 将随能量 \sqrt{s} 的升高而增大(图 2).

作者感谢同吴元芳和杨杰同志的有益讨论.

参 考 文 献

- [1] R. E. Ansorge et al., *Z. Phys. C*, **37**(1988) 191.
- [2] Liu Lianshou and Meng Tachung, *Phys. Rev.*, **D27**(1983) 2640; Liu Lianshou, Qin Lihong and Zhuang Pengfei, *Scientia Sinica*, **A29**(1986)1063.
- [3] E. L. Berger., *Nucl. Phys.*, **B85**(1975)61.
- [4] 吴元芳, 刘连寿, 华中师大学报(自然科学版), **23**(1989)35.
- [5] Cai Xu, Chao Weiqin, Meng Tachung and Huang Chaoshang, *Phys. Rev.*, **D33** (1986)1287.
- [6] G. J. Alner et al., *Phys. Lett.*, **160B**(1985)199.

The Clustered Production of Final Particles and Forward-Backward Correlation in High Energy $p\bar{p}$ Collision

Zhang Yang Liu Lianshou

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

Received on November 24, 1992

Abstract

In this paper, forward-backward multiplicity correlation in various rapidity windows in high energy $p\bar{p}$ collision is obtained by using Monte Carlo simulation based on Three Fire Ball model with cluster mechanism. The results fit the experimental data of $\sqrt{s} = 200,546,900\text{GeV}$, indicating that the model is reasonable. It is shown that the effect of cluster mechanism makes forward-backward multiplicity correlation increase in short range and decrease in long range.

Key words High energy $p\bar{p}$ collision, Correlation, KNO scaling, Three Fire-ball model, Cluster mechanism, Monte Carlo simulation.