

高能强子 - 强子碰撞中喷注的产生 与演化过程的动力学起伏*

尹建武¹⁾ 刘峰²⁾

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

摘要 用蒙特卡洛方法对 630GeV/c 质子 - 反质子碰撞中的无偏样本、喷注事件样本和喷注内样本中的动力学起伏进行了研究. 结果表明, 喷注事件样本和电子 - 正电子对撞的全事件样本相似, 近似地有各向同性的动力学起伏, 而喷注内样本则和电子 - 正电子对撞的喷注一样, 有类似于强子 - 强子碰撞软过程的各向异性动力学起伏. 这表明, 强子 - 强子碰撞中喷注的产生和演化分别和电子 - 正电子碰撞中喷注的产生和演化有类似的动力学性质.

关键词 高能强子 - 强子碰撞 蒙特卡洛方法 (微)喷注 动力学起伏 自仿射分形

1 引言

高能电子 - 正电子对撞产生喷注的过程是能够用微扰量子色动力学 pQCD 描述的硬过程, 但是, 这样的硬过程中产生的部分子最终碎裂成末态强子, 一定要经历非微扰的强子化. 因此, 喷注的产生与演化遵从不同的动力学.

在文献[1]中用蒙特 - 卡洛方法研究了电子 - 正电子对撞中喷注的产生和演化过程的动力学起伏, 证明了喷注的产生有各向同性的动力学起伏, 而喷注的演化则和 CERN-ISR 顶峰能量以下的强子 - 强子软过程有相似各向异性动力学起伏.

我们知道, 在达到 CERN-SppS 对撞机能量以后, 强子 - 强子碰撞中也会出现部分子的硬(半硬)碰撞, 从而产生喷注或微喷注^[2]. 这些喷注或微喷注的产生也是微扰量子色动力学 pQCD 过程, 而由此形成的部分子碎裂成末态强子喷注, 同样要经历非微扰过程. 利用动力学起伏应该也可以研究 SppS 对撞机能区以上的高能强子 - 强子碰撞中喷注的产生和演化过程动力学的定性差别^[3]. 本文对此作一个初步尝试.

2001 - 07 - 16 收稿

* 国家自然科学基金(19975021)和湖北省教育厅科学研究重点项目(2001A43008)资助

1) 永久通讯处: 黄冈师范学院物理系 湖北 438000

2) E-mail: fliu@iopp.ccnu.edu.cn

需要注意的是,强子是由大量部分子组成的复杂系统,因而强子-强子碰撞和电子-正电子碰撞不一样,即使是在一个事件中发生了部分子的对头硬碰产生喷注,仍然会伴随有大量的软碰撞过程.因此,在强子-强子碰撞中不可能有电子-正电子碰撞那样的纯由喷注组成的事件.强子-强子碰撞中的喷注总是和大量软碰撞产生的粒子混在一起.在将强子-强子碰撞中喷注的产生和演化过程和电子-正电子碰撞中喷注的产生和演化过程加以比较时,应该注意到这一点.

2 蒙特-卡洛样本

采用 LUND 强子-强子碰撞的事件产生器 PYTHIA5.5(Jetset7.4)^[4],首先产生质心能量 $\sqrt{s} = 630\text{GeV}$ 的 500 万个质子-反质子碰撞事件.在快度区间 $|y| \leq 1.5$ 中,利用喷注的“圆锥判定法”^[5]判别喷注,圆锥半径取为 $R = 1$,横能截断 $E_t = 4\text{GeV}$,得到 353498 个含有喷注的事件,其中有 389747 个喷注.为了和这种含喷注的事件样本对比,从全部 500 万个事件中随机地抽出 399081 个事件形成一个对比样本.这一对比样本实际上是对 $\sqrt{s} = 630\text{GeV}$ 的质子-反质子碰撞未作任何选择的无偏样本.这样,就有 3 个样本.一个是含有喷注的 353498 个事件中的全部粒子组成的“喷注事件样本”,另一个是由随机抽出的 399081 个事件中的全部粒子形成的“无偏样本”.第三个是由 389747 个喷注内部的粒子形成的“喷注内样本”.

喷注内样本以单个喷注为研究对象^[6].其动力学起伏是喷注演化过程中的动力学起伏.喷注事件样本则是由部分子硬(半硬)碰撞产生的喷注和背景软碰撞粒子一道形成的样本.其动力学起伏主要是喷注产生过程的动力学起伏,但也在一定程度上受到背景软碰撞粒子的“污染”.无偏样本的情况比较复杂,其中既有包含部分子硬(半硬)碰撞产生喷注的事件,也有不含喷注的事件.应当注意,我们所研究的 $\sqrt{s} = 630\text{GeV}$ 属于通常所谓的“对撞机能区”,比 ISR 顶峰能量 $\sqrt{s} = 63\text{GeV}$ 高一个量级.在这一能量下,即使是无喷注的事件也不是纯软过程,而包含有大量的从软到硬的过渡过程,其中已经有较硬的胶子发射,只是尚未被判定为“喷注”.这类过程中的动力学起伏既不同于纯软过程中的动力学起伏也不同于纯硬过程中的动力学起伏. $\sqrt{s} = 630\text{GeV}$ 强子-强子碰撞的无偏样本是这样的事件和喷注事件的混合,其中的动力学起伏比较复杂,和喷注的产生(硬过程)和演化(软过程)的动力学起伏都不相同.

根据以上的分析可以预期,强子-强子碰撞的喷注内样本将会和电子-正电子碰撞的喷注内样本有相同的动力学起伏行为;强子-强子碰撞的喷注事件样本将近似地和电子-正电子碰撞的全事件样本有类似的动力学起伏;而无偏样本则不具有这样简单的动力学起伏性质.

3 阶乘矩方法

和通常一样,采用阶乘矩消除统计起伏,研究动力学起伏^[7].考虑相空间中的 q 阶归

一化阶乘矩

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

其中 M 为相空间的一个(一维,二维或三维)区域的分割数, n_m 是第 m 个子区域中的多重数. 当统计起伏是泊松型时,阶乘矩 $F_q(M)$ 等于几率矩 $C_q(M)$. 如果存在动力学起伏, 则阶乘矩 $F_q(M)$ 在相空间分割数 M 增大时将有反常标度性

$$F_q(M) \propto M^\beta \quad (M \rightarrow \infty). \quad (2)$$

然而实验结果发现^[8],当相空间分割数增大时,一维阶乘矩不具有这一反常标度性,而是趋于饱和. Ochs 指出^[9],这是因为间歇存在于高维相空间中,由高维向一维投影时出现饱和现象. 他用二维随机级联 α 模型推出了二阶几率矩(即实验中的二阶阶乘矩)由二维向一维的投影公式为

$$C_2 = A - BM^{-\gamma}. \quad (3)$$

上式当 $M \rightarrow \infty$ 时, $C_2 \rightarrow A$ 饱和.

对于 ISR 顶峰能量以下的强子-强子碰撞,多粒子产生主要是软过程. 动力学起伏各向异性. 只有当相空间在不同方向以不同比例收缩,才能观察到阶乘矩的反常标度性^[10]. 这称为自仿射分形. 标志自仿射分形的特征量是不同方向收缩率 λ_i 和 λ_j 的对数比

$$H_{ij} = \frac{\ln \lambda_i}{\ln \lambda_j}, \quad (4)$$

称为赫斯特(Hurst)指数.

为了确定不同方向的收缩率 λ_i 和 λ_j 的比值,必须先求出赫斯特指数 H . 文献[11]给出了用实验测定赫斯特指数的方法,即

$$H_{ij} = \frac{\ln \lambda_i}{\ln \lambda_j} = \frac{1 + \gamma_j}{1 + \gamma_i} \quad (i, j = \gamma, p_i, \varphi), \quad (5)$$

其中参数 γ 可以由从高维向低维的投影公式(3)求出. 在现在考虑的三维情况下,这一公式推广为

$$F_2^{(i)}(M_i) = A_i - B_i M_i^{-\gamma_i} \quad (i = \gamma, p_i, \varphi). \quad (6)$$

多粒子产生硬、软过程动力学的定性差别体现在^[3],前者是由微扰量子色动力学 pQCD 产生,因而动力学起伏各向同性

$$\gamma_\gamma = \gamma_{p_i} = \gamma_\varphi; \quad (7)$$

而后者是非微扰过程,其动力学起伏的特征是纵横各向异性,而在横平面内各向同性^[1].

$$\gamma_{p_i} = \gamma_\varphi \neq \gamma_\gamma. \quad (8)$$

换句话说,

$$\text{产生喷注的硬过程} \quad H_{\gamma p_i} = H_{\gamma \varphi} = H_{p_i \varphi} = 1, \quad (9)$$

$$\text{喷注演化的软过程} \quad H_{\gamma p_i} = H_{\gamma \varphi} \neq H_{p_i \varphi} = 1. \quad (10)$$

4 结果和讨论

在定义快度和横动量的时候,对于喷注事件和无偏事件,以入射强子的动量方向为纵向,相空间区域选为: $y_{\min} = -6, y_{\max} = 6, p_{t,\min} = 0, p_{t,\max} = 2\text{GeV}/c, \varphi_{\min} = 0, \varphi_{\max} = 2\pi$; 而对于喷注内样本中的单个喷注,则以喷注内全部粒子的总动量方向为纵向^[12],相空间区域为: $y_{\min} = 0, y_{\max} = 6, p_{t,\min} = 0, p_{t,\max} = 2\text{GeV}/c, \varphi_{\min} = 0, \varphi_{\max} = 2\pi$. 为了消除平均分布不平的影响,采用了累积变量^[13].

在图 1 中画出了 3 个样本的一维阶乘矩. 从图 1(a) 可以看到,无偏事件中 3 个变量

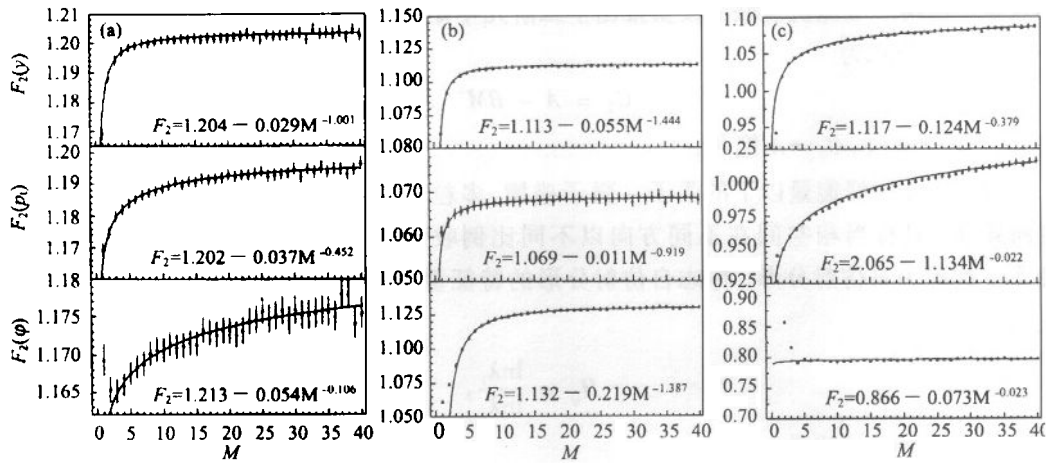


图 1 3 个样本的一维阶乘矩
(a) 无偏事件样本; (b) 喷注事件样本; (c) 喷注内样本.

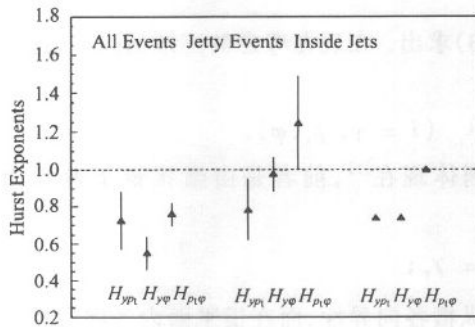


图 2 3 个样本的赫斯特指数

y, p_t, φ 的一维阶乘矩的参数 $\gamma, \gamma_{p_t}, \gamma_{\varphi}$ 各不相同,既不符合于(7)式也不符合于(8)式. 可是,喷注事件图 1(b) 的 3 个 γ 接近相等,近似地符合于(7)式;而喷注内样本的 3 个 γ 则很好地符合于(8)式.

根据所得到的 γ 值按(5)式算出赫斯特指数画在图 2 上. 由图可以看到,喷注事件的 3 个赫斯特指数在误差范围内接近于 1,近似地符合于硬过程中动力学起伏的特征(9)式. 其误差较大是由于有背景软过程粒子和硬碰撞产生的喷注混在一起,产生污染. 与此同时,喷注内样本的横平面赫斯特指数 $H_{p_t, \varphi}$ 非常接近于 1;而两个纵-横赫斯特指数 H_{y, p_t} 和 $H_{y, \varphi}$ 都不等于 1,但是彼此相等,很好地符合于软过程的特征

(10)式.

图 3 上画出了 3 种情况下的三维阶乘矩对相空间分割数的双对数图. 图中的空心圆圈是各向同性分析(自相似分析)的结果. 可以看到,喷注事件样本各向同性分析的三维阶乘矩对分割数的双对数图图 3(b)大体上符合于直线. 也就是说,喷注事件样本各向同性分析的三维阶乘矩近似地有反常标度性((2)式). 这表明,产生喷注的硬过程是各向同性的自相似分形. 另一方面,由图 3(c)和(a)可以看到,喷注内样本和无偏事件样本则不具有这样的性质.

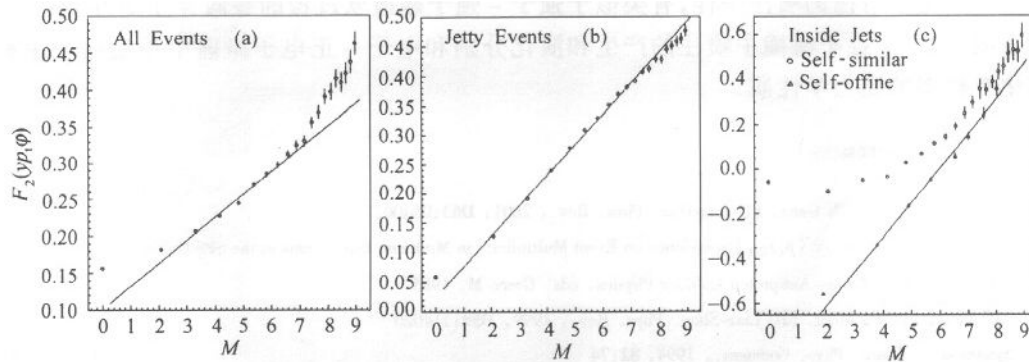


图 3 3 个样本的三维阶乘矩
(a) 无偏事件样本;(b) 喷注事件样本;(c) 喷注内样本.

但是,由图 2 可见,喷注内样本较好地符合于(10)式. 这很类似于 ISR 顶峰能量以下的强子-强子碰撞软过程. 为了证明喷注内样本和强子-强子碰撞软过程一样是横平面内各向同性而纵-横各向异性的三维自仿射分形^[14,15],需要进一步按所得到的赫斯特指数作各向异性分割来计算三维阶乘矩^[10]. 近似地将赫斯特指数的值取为

$$H_{y,p_1} = 0.74, H_{y,\varphi} = 0.74, H_{p_1,\varphi} = 1.00, \tag{11}$$

进行三维自仿射分析. 所得结果如图 3(c)中的三角形点. 由图可见,自相似分析($H_{y,p_1} = H_{y,\varphi} = H_{p_1,\varphi} = 1.00$)的三维阶乘矩对分割数的双对数图(图 3 中的圆圈)显著上弯,而采用(11)式的赫斯特指数进行自仿射分析的结果(图 3 中的三角),上弯趋势明显减小,近似为直线,即:对于喷注内样本,当相空间各向同性分割时,反常标度性(2)式不成立;而当相空间按(11)式的赫斯特指数各向异性分割时,反常标度性(2)式近似成立.

分割数最小的头两个点偏离直线是由于横动量守恒的影响^[16]. 图 3(c)中的直线是自仿射分析的结果丢掉头两个点后的线性拟合 $\ln F_2 = a \ln M + b$. 拟合参数和 χ^2/DF 列在表 1 中.

表 1 对自仿射分析的阶乘矩作线性拟合的参数

a	b	χ^2/DF
0.154 ± 0.003	-0.923 ± 0.012	$16.7/8 \approx 2.08$

5 结论

本文用蒙特卡洛方法对 $630\text{GeV}/c$ 质子 - 反质子碰撞事件的 3 种不同样本中的动力学起伏进行了研究. 一种是不加任何选择的无偏样本, 另一种是含有喷注的喷注事件样本, 第三种是喷注内粒子组成的样本. 喷注用圆锥法判定. 结果表明, 喷注事件样本和电子 - 正电子对撞的全事件样本相似, 近似地有各向同性的动力学起伏, 而喷注内样本则和电子 - 正电子对撞的喷注一样, 有类似于强子 - 强子碰撞软过程的各向异性动力学起伏. 这表明, 强子 - 强子碰撞中喷注的产生和演化分别和电子 - 正电子碰撞中喷注的产生和演化有类似的动力学性质.

参考文献 (References)

- 1 LIU Lian-Shou, CHEN Gang, FU Jing-Hua. Phys. Rev., 2001, **D63**:054002
- 2 Ciappetti (UA1 Collab.). $\langle p_t \rangle_{\text{CH}}$ Dependence on Event Multiplicity in Minimum Bias Events at the SPS Collider. Proc. 5th Topical Workshop on Proton-Antiproton Collider Physics, eds. Greco M, 1985
- 3 LIU Feng, LIU Fu-Ming, LIU Lian-Shou. Phys. Rev., 1999, **D59**:114020
- 4 Sjöstrand T. Comp. Phys. Commun., 1994, **82**:74
- 5 LIU Feng (y), LIU Feng, LIU Lian-Shou. HEP & NP, 1997, **21**:138 (in Chinese)
(柳峰, 刘峰, 刘连寿. 高能物理与核物理, 1997, **21**:138)
- 6 GUO Yuan-Yuan, ZENG Jie, YIN Jian-Wu. HEP & NP, 2001, **25**:1084 (in Chinese)
(郭媛媛, 曾杰, 尹建武. 高能物理与核物理, 2001, **25**:1084)
- 7 Bialas A, Peschanski R. Nucl. Phys., 1986, **B273**:703; 1988, **B308**:857
- 8 De Wolf E A, Dremm I M, Kittel W. Phys. Rep., 1996, **270**:1
- 9 Ochs W. Phys. Lett., 1990, **B247**:101
- 10 WU Yuan-Fang, LIU Lian-Shou. Phys. Rev. Lett., 1993, **21**:3197
- 11 WU Yuan-Fang, LIU Lian-Shou. Science in China, 1995, **A38**:435
- 12 YIN Jian-Wu, LIU Feng, LIU Lian-Shou. HEP & NP, 2002, **26**:157 (in Chinese)
(尹建武, 刘峰, 刘连寿. 高能物理与核物理, 2002, **26**:157)
- 13 Ochs W. Z. Phys., 1991, **C50**:339
- 14 Agabayan N M et al (NA22). Phys. Lett., 1996, **B382**:305; 1998, **B431**:451
- 15 WANG S, WANG Z, WU C. Phys. Lett., 1997, **B410**:323
- 16 LIU Lian-Shou, ZHANG Yang, DENG Yue. Z. Phys., 1997, **C73**:535

On the Dynamical Fluctuations in the Production and Evolution of Jets in High Energy Hadron-Hadron Collisions^{*}

YIN Jian-Wu¹⁾ LIU Feng²⁾

(Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract The dynamical fluctuations in 3 different samples of 630 GeV/c proton-antiproton collisions are studied using Monte Carlo method. These are the mini-bias event sample, the jetty event sample and the sample consisting of the hadrons inside jets. The jets are identified using cone-algorithm. The results show that the jetty event sample mimic the whole event sample in high energy e^+e^- collisions has isotropic dynamical fluctuations, while the dynamical fluctuations inside jets are similar to those of the soft hadronic collisions, being isotropic in the transverse plane but anisotropic in the longitudinal-transverse planes. This shows that the production and evolution of jets (minijets) have similar dynamical fluctuation property as the production and evolution of jets in e^+e^- collisions, respectively.

The mini-bias event sample is a mixture of the jet-production processes of hard (semi-hard) parton collisions and the soft hadron-hadron collision processes. Therefore, it does not have simple dynamical fluctuation property.

Key words high energy hadron-hadron collision, Monte Carlo method, (mini) jet, dynamical fluctuation, self-affine analysis

Received 16 July 2001

* Supported by NSFC (19975021) and Education Commission of Hubei Province (2001A43008)

1) Permanent address: Huanggang Normal College, Hubei 438000

2) E-mail: fliu@iopp.ccnu.edu.cn