

高能强子 - 强子碰撞中喷注性质的 蒙特卡洛研究*

吕 葵 杨利建 杨丽平 毛 田¹⁾

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

摘要 在喷注“圆锥判定法”的基础上,对高能强子-强子碰撞中产生的喷注(微喷注)的性质进行了蒙特卡洛研究.采用以喷注动量为 z 轴的“喷注坐标系”,给出了表征喷注性质的各物理量在新坐标系中的分布情况.结果表明,圆锥判定法能够作为一种有效手段来对高能强子-强子碰撞和相对论重离子碰撞中发生的硬和半硬过程开展实验研究.由有喷注事件和无喷注事件的多重数分布可以看到, $E_T = 2\text{GeV}$ 是用圆锥法确定喷注的合理的横能截断值.

关键词 高能强子-强子碰撞 (微)喷注 (半)硬过程

1 引言

喷注是近似描述高能数据的一种简单工具,它与夸克和胶子的强子化有密切联系.通过对喷注的研究,可以得到有关夸克与胶子以及它们之间相互作用的许多信息^[1].

在强子-强子碰撞中大量发生的是微扰量子色动力学(pQCD)不适用的软过程.但是,在达到 CERN 对撞机能量($\sqrt{s} \geq 100\text{GeV}$)以后,出现了少量的横动量大于 $10\text{GeV}/c$ 的“大横动量喷注”^[2,3]和相当数量的横能约在 4GeV 以上的“微喷注”^[4],表明在这样的能量下,入射强子中有相当数量的部分子发生了能用 pQCD 描述的硬和“半硬”碰撞.

目前,随着新一代相对论重离子对撞机 RHIC 的建成运行^[5],核-核碰撞的单核子质心能量也已达到 200GeV ,预期将会有大量微喷注产生^[6],由 pQCD 描述的硬和“半硬”过程开始起显著作用^[7], (微)喷注作为研究相对论重离子碰撞中产生夸克-胶子等离子体(QGP)的硬探针受到广泛注意^[8-10].因此,深入研究强子-强子和核-核碰撞中产生的(微)喷注的性质,已经是摆在议事日程上的一项重要任务.

本文采用 LUND 的事件产生器 PYTHIA5.5^[11],利用喷注的“圆锥判定法”^[12],对 $\sqrt{s} = 630\text{GeV}$ 的强子-强子碰撞中产生的(微)喷注的物理性质进行蒙特卡洛研究.文章

2000-12-04 收稿

* 国家自然科学基金(19975021)资助

1) 作者系华中师范大学理科(物理学)科学研究和教学人才培养基地学生

的第二部分介绍由实验室坐标系向喷注坐标系的坐标变换. 然后, 在文章的第三部分中利用蒙特卡洛产生器 PYTHIA5.5 产生的事件样本, 作出了喷注的各物理量在喷注坐标系中的几率分布图, 并和全事件的对应分布进行了比较和分析. 最后, 在第四节里作总结和讨论.

2 由实验室系向喷注系的坐标变换

用 $K(x, y, z)$ 表示实验室坐标系. 新的坐标系 K'' 可以在原坐标系 K 的基础上经过两次旋转获得:

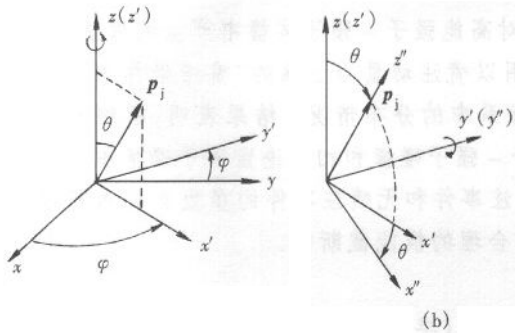


图 1 由实验室坐标系向喷注坐标系的坐标变换
(a) 第一步绕 z 轴转 φ ; (b) 第二步绕 y' 轴转 θ .

第一步, 将每个喷注内所有粒子的动量作矢量和, 得到这一喷注的动量 p_i , 它与 z 轴的夹角为 θ , 方位角为 φ .

第二步, 如图 1(a), 保持 z 轴固定, 将 x, y 轴绕它旋转 φ 角, 形成坐标系 K' . 喷注的动量 p_i 位于 K' 系中的 $x'oz'$ 平面上.

第三步, 如图 1(b), 保持 y' 轴固定, 将 x', z' 绕它旋转 θ 角, 就得到以 p_i 为 z'' 轴的喷注坐标系 K'' .

相应的动量分量的转换式为:

$$\begin{aligned} x'' &= x \cos \theta \cos \varphi + y \cos \theta \sin \varphi - z \sin \theta, \\ -x \sin \varphi + y \cos \varphi, \quad z'' &= x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \sin \theta \cos \varphi. \end{aligned} \quad (1)$$

3 描述喷注性质的物理量在喷注坐标系中的分布

3.1 多重数分布

用 PYTHIA5.5 产生 $\sqrt{s} = 630 \text{ GeV}$ 的质子-反质子碰撞事件. 选择参数使得弹性碰撞, 单衍和双衍散射都排除掉, 只保留软过程和 $2 \rightarrow 2$ 的硬过程. 这样可以使得喷注事件的作用更明显, 更便于研究喷注的性质. 在将所得结果和实验比较时, 要注意所包含的过程.

取相空间区域 $\Delta: |\eta| \leq 4, p_t \geq 0.005 \text{ GeV}, 0 \leq \varphi < 2\pi$ 中的带电粒子, 形成“全事件样本”. 取圆锥法的参数 $R = 1, E_t = 4 \text{ GeV}$ 来选定喷注^[12]. 用所得到的喷注形成“喷注样本”. 分别计算它们的多重数分布, 如图 2.

由图可见, 对于全事件样本(图 2(a))中的实心圆)奇偶多重数有相同的分布. 这是由于, 快度截断使得局域电荷不平衡^[13].

另一方面, 可以看到, 全事件的多重数分布有两个峰. 为了了解其原因, 在同一图上按出现的比例分别画出了有喷注的事件和无喷注的事件的多重数分布. 可以看到, 有喷注事件的分布位于大多重数处, 只有一个单峰. 这表明, 全事件的多重数分布的两个峰很

可能是由两种不同过程产生,其中一个是无喷注的软过程,另一个是有喷注的硬过程. 如果能将这两种过程干净地分开,应该分别得到两个单峰分布. 现在我们得到的有喷注事件的多重数分布是单峰分布,而无喷注事件的分布仍有一个“肩”,表明所采用的选择喷注的参数还未能将这两种过程干净地分开.

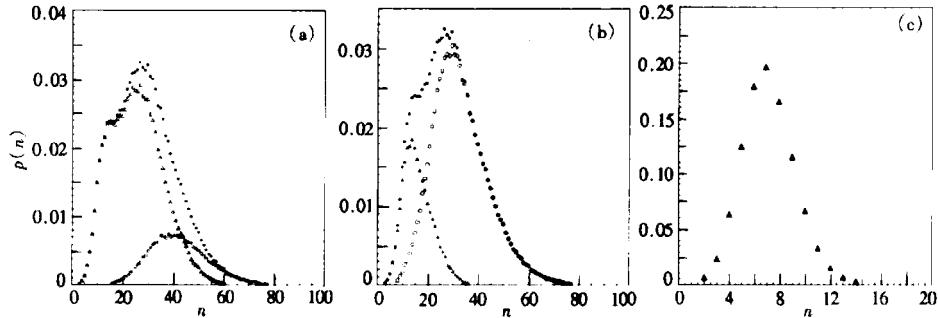


图 2 多重数分布

(a) 全事件 $E_t = 4\text{GeV}$; (b) 全事件 $E_t = 2\text{GeV}$; (c) 喷注.

● all events, Δ no-jet events, \circ jetty events.

为了将这两种过程干净地分开,我们尝试将选择喷注的条件改为 $E_t = 2\text{GeV}$. 结果得到的多重数分布如图 2(b). 由图可见,对于用这种条件决定的喷注,有喷注事件和无喷注事件分别是位于高多重数和低多重数处的两个单峰,它们叠加的结果,使得全事件样本的多重数分布呈现为双峰结构. 由此可见,用 $E_t = 2\text{GeV}$ 决定喷注比用 $E_t = 4\text{GeV}$ 决定喷注更为合理,能将无喷注的软过程和产生喷注的硬过程更干净地分开.

图 2(c)画出了由 $E_t = 4\text{GeV}$ 决定的喷注内部多重数分布. 它是一个简单的单峰分布.

3.2 赝快度分布

以下着重讨论 $|\eta| < 1.5$ 的情况. 在这一区间中用 PYTHIA5.5 产生 5000000 个事件形成全事件样本. 再用圆锥法,仍取参数 $R = 1$, $E_t = 4\text{GeV}$ 来选喷注. 得到有喷注事件的“事件样本”和由所有事件中的单个喷注组成的“喷注样本”.

这两个样本的赝快度(η)分布画在图 3(a),(b)上.

由图可见,事件样本(以入射粒子的运动方向为纵向)的赝快度分布(图 3(a))基本上是前后对称的. 这是由于所模拟的是对撞机事件,实验室系就是质心系,相对于 $\eta = 0$ 有前后对称.

喷注样本(以喷注轴为纵向)的赝快度分布(图 3(b))全部朝前方. 这和喷注的物理图像一致.

这一物理图像可以用另一办法来显示. 将所有的喷注轴(即喷注动量的方向)经过旋转重叠在一起来作为极轴,画出所有粒子的数目和动量在极坐标中的分布,如图 4(a)和(b). 将这个图绕极轴旋转就得到喷注中粒子数和动量的空间分布图像. 可以看到,粒子数在向前方向($\theta = 0$)和 $\theta \approx 22^\circ$ 的锥面上有极大值(图 4(a)). 而动量分布在向前方向上有非常尖锐的极大值(图 4(b)). 如果按比例画动量分布,则为了画出这一极大值,其它方向

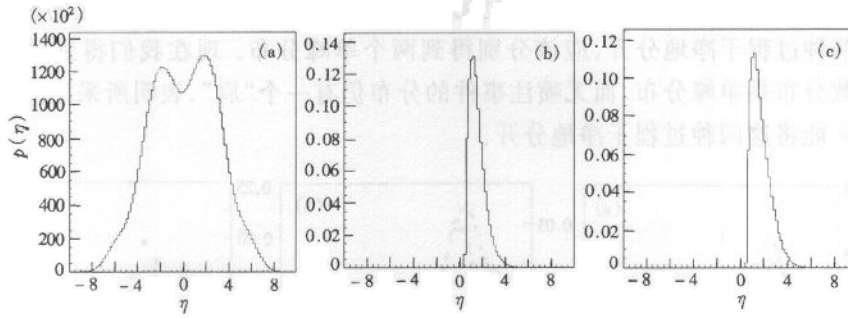


图 3 赝快度分布

(a) 事件样本; (b) 微喷注样本; (c) 大横动量喷注样本.

上的分布将完全看不到. 因此, 在图 4(b)中对 $\theta = 0$ 的极大值加以截断, 缩小 100 倍. 从这个图可以得到喷注是一个尾上带有“倒毛”的长“箭”的图像.

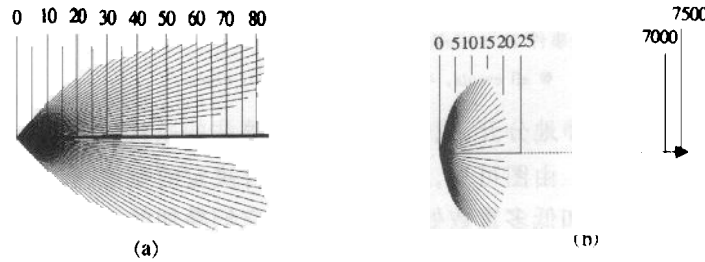


图 4 喷注中的粒子数(a)和动量(b)在极坐标中的分布

(b)中 $\theta = 0$ 的极大值被截断, 比其它方向缩小 100 倍.

3.3 方位角分布

图 5(a)上画出了喷注中粒子的方位角分布. 由图可见, 这一分布在 $\varphi = 0, \pi$ 和 2π 处有极小值. 说明在新坐标下, 分布在平面 $x''oz''$ 上的粒子数较少; 而在 $\varphi = \pi/2, 3\pi/2$ 时出现了极大值, 即分布在垂直于 $x''oz''$ 平面的 y'' 轴上的粒子多. 产生这种分布情况与我们对 x'' 轴的选择有关.

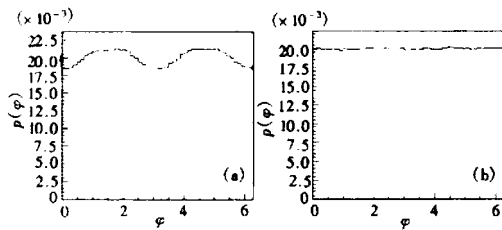


图 5 方位角 φ 的分布

方位角分布的这一不均匀性可以形式地加以解决. 注意到作为喷注系, 只要求 z 轴沿喷注动量方向, 而对 x, y 轴没有任何

要求, 可以将以上得到的喷注系统 z'' 轴旋转一个任意角度, 也就是对每个喷注选一个在 $[0, 2\pi]$ 中均匀分布的随机数, 将它加到这一喷注中所有粒子的方位角上. 由此得到的方位角分布就消除了明显的极大和极小, 而只存在由于统计量的限制产生的小起伏, 见图 5(b).

3.4 横动量分布

横动量分布画在图 6 上.

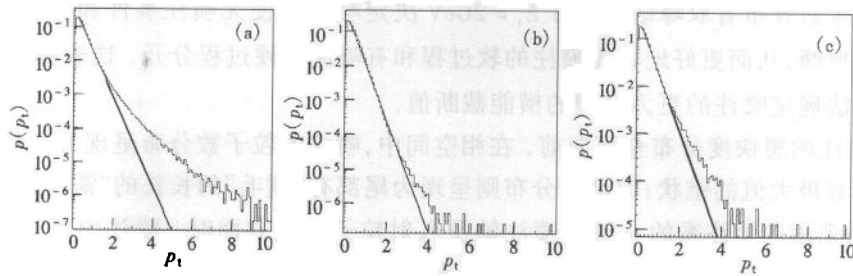


图 6 横动量分布

(a) 全事件; (b) 喷注($E_t = 4\text{GeV}$); (c) 喷注($E_t = 10\text{GeV}$).

应注意的是,对于全事件(图 6(a)),“横向”指的是和入射粒子动量垂直方向;而对于喷注(图 6(b)),“横向”指的是和喷注动量垂直方向. 图中直线是用来标志低横动量处的近似指数分布. 由图可见,全事件的横动量分布(图 6(a))在 $p_t > 2\text{GeV}$ 时显著偏离简单的指数分布,表明高横动量的几率很大. 其原因是考虑的全部是有喷注的事件,而喷注本身就是有很高横动量的粒子束. 它使得高横动量的几率显著提高. 而喷注内部粒子相对于喷注轴的分布(图 6(b))基本上可以近似为指数分布,表明喷注内部演化过程是软过程.

3.5 大横动量喷注的横动量和赝快度分布

以上的讨论中对圆锥法的横能截断取的是 $E_t = 4\text{GeV}$. 这对应于“微喷注”. 为了考查大横动量喷注的性质,对以上得到的 $\sqrt{s} = 630\text{GeV}$ 的 500000 个事件,仍取相空间为 $|\eta| \leq 1.5$, $p_t \geq 0.005\text{GeV}$, $0 \leq \varphi < 2\pi$,将圆锥法的横能截断改为 $E_t = 10\text{GeV}$ 来挑选喷注. 这样得到的喷注的横动量分布画在图 6(c)上. 可以看到,它和 $E_t = 4\text{GeV}$ 的喷注的横动量分布(图 6(b))一样呈现为指数下降的形状,但尾部抬得略高.

大横动量喷注的赝快度分布画在图 3(c)上. 可以看到,它们和 $E_t = 4\text{GeV}$ 的相应分布(图 3(b))几乎完全一样,只是由于在同样多的事件中大横动量喷注数量比微喷注少,所以统计起伏较大.

4 总结和讨论

在这篇文章里,采用 LUND 的事件产生器 PYTHIA5.5,利用喷注的“圆锥判定法”,对 $\sqrt{s} = 630\text{GeV}$ 的强子-强子碰撞中产生的微喷注和大横动量喷注的物理性质进行了蒙特卡洛研究. 对每个喷注,采用以喷注动量为 z 轴的“喷注坐标系”,给出了表征喷注性质的各物理量在新坐标系中的分布情况,结果表明:

1) 在喷注内部,奇偶多重数遵循同一分布,达到了完全的局域电荷不平衡. 其原因

是,判定喷注时所用的圆锥在 η, φ 平面上的半径为 1. 对于局域电荷不平衡而言,这和 $|\eta| < 1$ 的快度区间相当. 在这种窄相空间区域中,电荷守恒的影响完全消失.

2) 有喷注的事件和无喷注的事件遵循不同的多重数分布. 它们叠加的结果,使得全事件的多重数分布有双峰结构. 用 $E_t = 2\text{GeV}$ 决定喷注能使无喷注事件和有喷注事件呈现为两个单峰,从而更好地将无喷注的软过程和有喷注的硬过程分开. 这表明, $E_t = 2\text{GeV}$ 是用圆锥法确定喷注的更为合理的横能截断值.

3) 喷注的横快度分布全部向前. 在相空间中,喷注的粒子数分布呈现为在张角约 22° 的锥面上有极大值的锥状;而动量分布则呈现为尾部有“倒毛”的长长的“箭”的形状.

4) 当采用的喷注系的 x 轴和喷注轴及入射粒子动量共面时. 喷注中粒子的方位角分布在 $\varphi = 0, \pi$ 和 2π 处有极小值. 说明分布在平面 $x''oz''$ 上的粒子数较少;而分布在垂直于 $x''oz''$ 平面的 y'' 轴上的粒子多. 方位角分布的这一不均匀性可以通过将喷注系统 z'' 轴旋转一个任意角度而形式地加以解决. 由此得到的方位角在 $[0, 2\pi]$ 中均匀分布.

5) 喷注横动量分布呈现为尾部略抬高的指数下降形状,表明喷注内部演化是软过程.

6) 大横动量喷注的各种物理量和微喷注中的相应量有类似的分布,但横动量分布的尾部抬得更高些.

以上结果给用圆锥判定法得到的喷注提供了一个清晰的物理图像. 它进一步说明,所用的圆锥判定法是可靠的. 用它的确能得到有物理意义的喷注,能够作为一种有效手段来对高能强子-强子碰撞和相对论重离子碰撞中发生的硬和半硬过程开展实验研究.

以上用 PYTHIA5.5 得到的具体结果在定量上有一定程度的模型依赖性,但所用的分析方法对于研究实际强子-强子和相对论重离子碰撞实验中产生的喷注性质有参考价值.

作者感谢刘连寿,刘明,刘峰的指导 and 帮助.

参考文献 (References)

- 1 LIU Lian-Shou, WU Yuan-Fang. *Multiparticle Production in High Energy Collisions*. Shanghai: Science and Technique Publisher of Shanghai, 1998 (in Chinese)
(刘连寿,吴元芳. 高能碰撞多粒子产生. 上海:上海科学技术出版社,1998)
- 2 Arnison G et al (UA1 Collab). *Phys. Lett.*, 1982, **B118**:167
- 3 Arnison G et al (UA1 Collab). *Phys. Lett.*, 1983, **B123**:115
- 4 Ciapetti (UA1 Collab). $\langle p_T \rangle_{CH}$ 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
- 5 Harris J W. *Nucl. Phys.*, 1994, **A566**:277
- 6 Kajantie K, Landshoff P V, Lindfors J. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**:2527
- 7 Wang X N. *Phys. Reports*, 1997, **280**:287
- 8 Gyulassy M, Plümer M. *Phys. Lett.*, 1990, **B243**:432
- 9 Gyulassy M et al. *Nucl. Phys.*, 1992, **A538**:37
- 10 Wang X N, Huang Z, Sarcevic I. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**:231
- 11 Sjöstrand T. *Comp. Phys. Commun.*, 1994, **82**:74
- 12 LIU Ming et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1997, **21**:138 (in Chinese)

(刘明等. 高能物理与核物理, 1997, 21:138)

13 WU Yuan-Fang, LIU Lian-Shou. Phys. Rev., 1990, D41:845

Monte Carlo Study of the Properties of Jets in High Energy Hadron-Hadron Collisions

LÜ Yun YANG Li-Jian YANG Li-Ping MAO Tian¹⁾

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

Abstract On the basis of “cone” jet-algorithm, a Monte Carlo study of the properties of (mini) jets in high energy hadron-hadron collisions is carried out. Using the “jetty frame”, in which the momentum of jet is chosen as Z axis, the distributions of physical quantities inside jets-multiplicity, pseudorapidity, azimuthal angle and transverse momentum are obtained. The pseudorapidity distribution is asymmetric, concentrating in the forward direction, which means that all the particles in the jet are moving forward in the direction of the total momentum of jet. This is further proved by a particle-momenta plot in the axial coordinate which shows that the jets look like sharp arrows with small forward-pointing feathers at the ends. The transverse momentum distribution for the event sample with respect to the direction of incident hadrons deviates from an exponential distribution considerably, in consistent with the production of (mini-)jets, while that inside jets with respect to the jet axis is basically an exponential. This means that the production of (mini-) jets is hard process, while the development of jets is basically soft. These results show that “cone algorithm” is an effective method for the study of hard and semi-hard processes in high energy hadron-hadron and relativistic heavy ion collisions. It is found through the comparison of the distributions in jetty events and no-jet events that $E_{\perp} = 2\text{GeV}$ is a more reasonable cut for the “cone algorithm” in finding jets.

Key words high-energy hadron-hadron collision, (mini) jet, (semi) hard process

Received 4 December 2000

* Supported by NSFC (19975021)

1) Students of the State-Level Personnel Training Base for Research and Teaching in Fundamental Sciences (Physics)