

高能碰撞中喷注判定法的研究*

刘明¹⁾ 柳峰 刘峰 刘连寿

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430070)

1996-01-15 收稿

摘 要

对喷注的“圆锥判定法”进行了仔细的研究,给出了两种利用末态粒子动量判断喷注是否存在的判定方法.利用 LUND-PYTHIA 强子-强子碰撞蒙特卡罗产生器产生的数据样本对这两种判定法进行了检验和对比,得到了一个有效、实用的喷注判定法.

关键词 高能碰撞, 多粒子产生, 硬过程, 喷注, “圆锥判定法”.

1 引 言

喷注与喷注的判定是高能物理中理论与实验都十分关注的一个课题,许多实验都显示出喷注的存在^[1].它与 QCD 中的硬过程相关^[2],测量喷注的截面提供了一种检验 QCD 的有效手段.

喷注是近似描述高能数据的一种简单工具,它的基本思想是通过寻找喷注的运算,对于每一事件的末态 P (它由 n_{ptc} 个粒子组成) 计算出这一事件的喷注形态 Q (它由 n_{jet} 个喷注和喷注之外的 m_{ptc} 个粒子组成), 即

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_{n_{\text{ptc}}}] \xrightarrow{\text{喷注寻找运算}} Q = [q_1, q_2, \dots, q_{n_{\text{jet}}} + r_1, r_2, \dots, r_{m_{\text{ptc}}}], \quad (1)$$

其中 p_i 是末态粒子四动量, q_j 是事件中喷注的四动量, r_k 是喷注之外的其它粒子的四动量.在现代高能碰撞中末态粒子可多达数百个,而事件中的喷注数只有几个.因而研究喷注要简便得多.同时,喷注与夸克、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的相互作用(QCD)的许多信息.

但是,强子喷注具有不明确的角宽与不规则的形状,很难将属于喷注的粒子与其它粒子分离开来.对事件中的粒子是否属于某一喷注存在一定的模糊性.因而,如何从实验上有效而迅速地判定事件中的喷注是一个十分重要的问题.

在本文中,根据“圆锥法”^[3]的基本思想,寻找一种喷注的有效判定法.首先,在第

* 国家自然科学基金、国家教委优秀青年教师基金、武汉市青年科技晨光计划和湖北省自然科学基金资助.

1) 永久通信处: 湖北教育学院物理系, 武汉 430060.

二节里简述定义喷注的圆锥法; 然后, 在第三节建立一个以这一定义为基础的喷注判定法. 利用 LUND 的蒙特卡洛产生器 PYTHIA^[4] 产生的事件样本, 运用和检验了这一喷注判定法. 在第四节对所提出的喷注判定法进行改进, 加进以喷注直径为长、宽的局域扫描, 避免了喷注的遗漏. 最后, 在第五节进行总结和讨论.

2 定义喷注的圆锥法

圆锥法的基本精神是将高能碰撞中的喷注定义为质快度和方位角(η, φ)空间中的一个半径为 R_0 的圆锥, 在此锥内粒子的总横能大于某一阈值 E_{t0} , 而圆锥的轴 η_j, φ_j (即喷注轴) 为锥内所有粒子的 η_i, φ_i 对其横能 E_{ti} 的加权平均.

具体说来, 以 η_j, φ_j 为轴心, R_0 为半径作圆锥, 如果粒子 i 到锥轴的距离

$$R = \sqrt{(\eta_i - \eta_j)^2 + (\varphi_i - \varphi_j)^2} \quad (2)$$

小于圆锥半径 R_0 , 则称这一粒子在圆锥内. 如果圆锥内粒子的总横能

$$E_{tj} = \sum_{i \in \{R \leq R_0\}} E_{ti} \quad (3)$$

大于阈值 E_{t0} , 而且喷注轴 η_j, φ_j 为锥内所有粒子的 η_i, φ_i 对其横能 E_{ti} 的加权平均

$$\left. \begin{aligned} \eta_j &= \frac{1}{E_{tj}} \sum_{i \in \{R \leq R_0\}} \eta_i E_{ti} \\ \varphi_j &= \frac{1}{E_{tj}} \sum_{i \in \{R \leq R_0\}} \varphi_i E_{ti} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

我们就说存在一个喷注, 其轴为 η_j, φ_j , 其横能为 E_{tj} .

3 按圆锥法判定喷注的方案

根据喷注的圆锥定义, 要判定一个喷注, 首先

第一步, 要选定一个轴 A_0 , 以它为心, R_0 为半径作圆锥 C_0 . 如果这一圆锥内粒子的总横能 E_0 大于 $0.5E_{t0}$, 则这一个轴就是喷注轴的初级候选者¹⁾.

第二步, 将锥 C_0 内所有粒子的 η_i, φ_i 对其横能 E_{ti} 加权平均, 得到一个新的轴 A_1 . 以它为心, R_0 为半径再作圆锥 C_1 . 如果这一圆锥内粒子的总横能 E_1 大于 $0.5E_{t0}$, 则这一个轴就是喷注轴的第二级候选者.

一般说来, 新圆锥 C_1 内部所包含的粒子和原圆锥 C_0 内部所包含的粒子不完全重合 (因而 $E_1 \neq E_0$), 轴 A_1 是圆锥 C_0 内粒子的加权平均, 不是圆锥 C_1 内粒子的加权平均. 因而有必要进行第三步.

第三步, 将锥 C_1 内所有粒子的 η_i, φ_i 对其横能 E_{ti} 加权平均, 得到一个新的轴 A_2 .

1) 在后面的加权平均过程中, 由于锥轴的移动, 锥内横能有可能增加. 因此, 只在锥轴选定后才用 E_{t0} 来判定喷注, 而在这以前用一个小些的数值 (例如 $0.5E_{t0}$) 作横能截断值.

以它为心, R_0 为半径再作圆锥 C_2 . 如果这一圆锥内粒子的总横能 E_2 大于 $0.5E_{i0}$, 则这一个轴就是喷注轴的第三级候选者.

这样反复叠代, 如果在叠代的某一步, 圆锥内粒子的总横能小于 $0.5E_{i0}$, 叠代就停止, 从 A_0 出发寻找喷注的过程宣告失败. 如果在叠代过程中, 圆锥内粒子的总横能始终大于 $0.5E_{i0}$, 而叠代到第 i 级时, 圆锥 C_i 内粒子的总横能和上一级圆锥 C_{i-1} 内粒子的总横能相等 ($E_i = E_{i-1}$), 叠代就终止; 如果此时圆锥 C_i 内粒子的总横能大于 E_{i0} , C_i 就是所找到的喷注, 圆锥轴 A_i 就是喷注轴.

上述叠代过程是用圆锥法判定喷注的核心. 剩下的问题是如何选定作为出发点的轴 A_0 . 一个简单办法是在 η, φ 的全区间中扫描. 即: 将区间

$$-\eta_{\max} < \eta < \eta_{\max}, \quad 0 < \varphi < 2\pi$$

(我们讨论中心快速区, η_{\max} 是 $|\eta|$ 的截断值) 分成很细的网格, 取网格的每一个结点为 A_0 . 这样做显然过于浪费机时, 没有必要.

考虑到喷注轴往往是指向粒子比较集中的地方, 作为第一步, 可以选末态粒子的动量方向作为喷注判定计算的出发点 A_0 . 按照这种考虑建立方案如下:

方案 A

(1) 对 $|\eta| \leq \eta_{\max}$ 内所有粒子, 以每一粒子的 η_i, φ_i 为轴, R_0 为半径作圆锥, 比较这

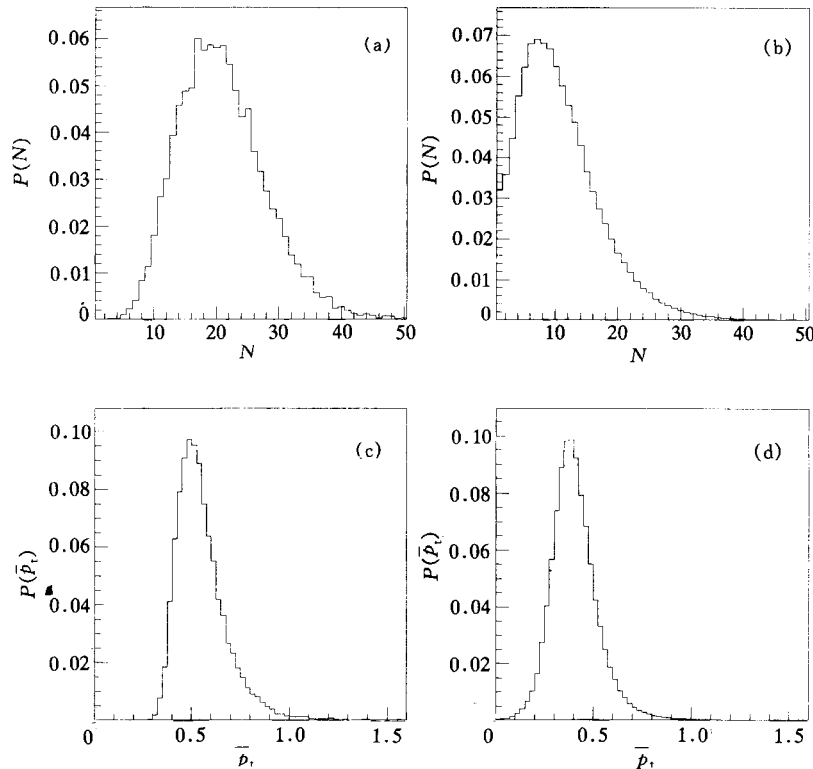


图1 用判定喷注的方案A(无局域扫描)得到的分布

些圆锥内的总横能, 以总横能最大的那个圆锥的轴作为喷注判定计算的出发点 A_0 .

(2) 以 A_0 为出发点, 按照前面所述方法进行加权平均叠代. 如果在叠代过程中, 某一级圆锥中的总横能小于 $0.5E_{t0}$, 则终止叠代; 改用总横能次大的那个圆锥的轴作为喷注判定计算的出发点 A_0 . 如果没有发生这种情况, 经过叠代找到了喷注, 就进行下一步.

(3) 从事件的全部末态粒子中去掉已经找到的喷注中的粒子. 对剩下的粒子所组成的样本再进行步骤(1), (2), 找下一个喷注. 如果找到了喷注, 再去掉这一喷注中的粒子, 重新进行步骤(1), (2). 这样进行下去, 直到找不到新的喷注为止.

为了通过实际例子, 应用和检验这一喷注判定法, 用 LUND 强子-强子碰撞的蒙特卡洛产生器 PYTHIA, 产生 20 万个质子能量为 630GeV 的非单衍强子-强子碰撞事件; 只考虑中心快度区 $|\eta| \leq 1.5$, 得到的事件样本中共有 188552 个事件. 判定喷注的参数取为 $R_0=1$, $E_{t0}=4\text{GeV}$. 这相当于“低横动量喷注”或“微喷注”^[5]. 利用上述喷注判定法, 得到(微)喷注事件的比例为 8.09%. 图 1(a)、(b) 给出了样本中喷注事件和非喷注事件的多重数分布; 图 1(c)、(d) 给出了这两种情况下的单事件平均横动量分布^[6]. 喷注事件的多重数分布具有在峰值左右大体对称的形状, 而非喷注事件的多重数分布有一个很长的尾部; 喷注事件的单事件平均横动量(\bar{p}_t) 分布在小 \bar{p}_t 处($\bar{p}_t < 0.3$) 有尖锐的截断. 这些都符合(微)喷注事件的特征^[5,7].

4 喷注判定方案的改进

上述判定喷注的方案只考虑了喷注轴比较靠近粒子动量方向的情况. 单用这一方案会漏掉喷注轴离粒子动量方向较远的那些喷注. 为了克服这一缺点, 在方案 A 的基础上加上局部扫描, 得到一个更为完善的方案.

方案 B

(1) 对 $|\eta| \leq \eta_{\max}$ 内所有粒子, 以每一粒子的 η_i , φ_i 为轴 R_0 为半径作圆锥, 比较这些圆锥内的总横能, 选出总横能最大的那个圆锥的轴, 称它为 A_{01} .

(2) 以 A_{01} 为中心进行扫描. 扫描范围为 $\Delta\eta = \pm R_0$, $\Delta\varphi = \pm R_0$, 步长分别为 $0.1R_0$. 以每一扫描点为轴, R_0 为半径作圆锥并计算该锥内的总横能. 选出其中总横能最大的轴, 称它为 A_{02} .

(3) 以 A_{01} 和 A_{02} 为出发点, 分别按照前面所述方法进行加权平均叠代. 如果在叠代过程中, 某一级圆锥中的总横能小于 $0.5E_{t0}$, 则终止叠代. 如果不发生这种情况, 经过叠代找到了两个新的轴, 就比较所对应的两个圆锥中的总横能, 取其中横能较大的那个圆锥. 如果这个圆锥内的总横能大于 E_{t0} , 就把它作为一个喷注.

(4) 从事件的全部末态粒子中去掉已经找到的喷注中的粒子. 对剩下的粒子所组成的样本再进行步骤(1), (2), (3), 找下一个喷注. 如果找到了喷注, 再去掉这一喷注中的粒子, 重新进行步骤(1), (2), (3). 这样进行下去, 直到找不到新的喷注为止.

用前述 LUND 强子-强子碰撞的蒙特卡洛产生器 PYTHIA 产生的 188552 个质子能量为 630GeV, $|\eta| \leq 1.5$ 的非单衍强子-强子碰撞事件作为事件样本. 取 $R_0=1$,

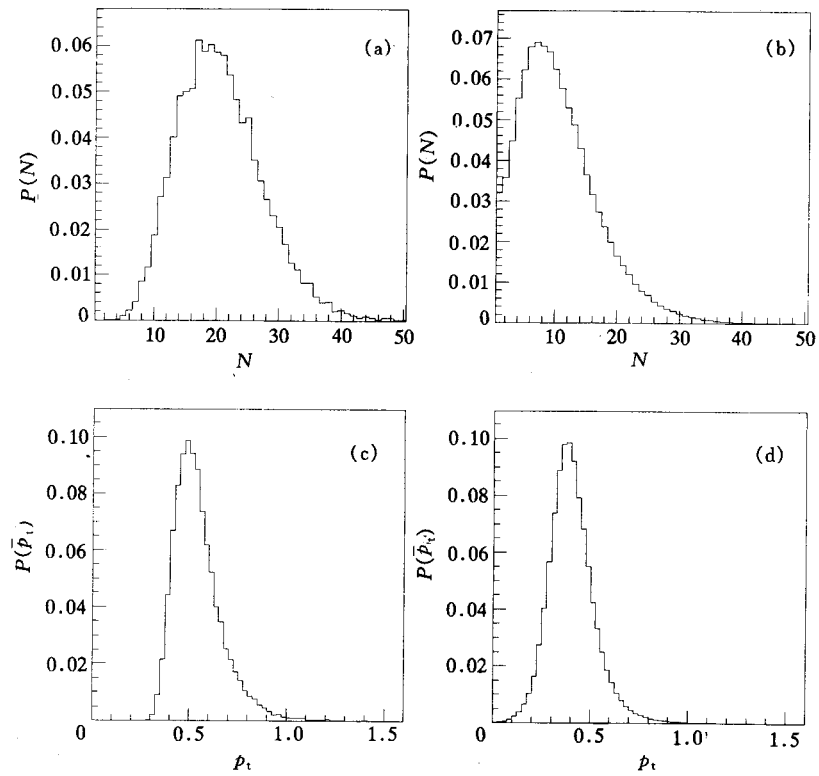


图2 用判定喷注的方案B(有局域扫描)得到的分布

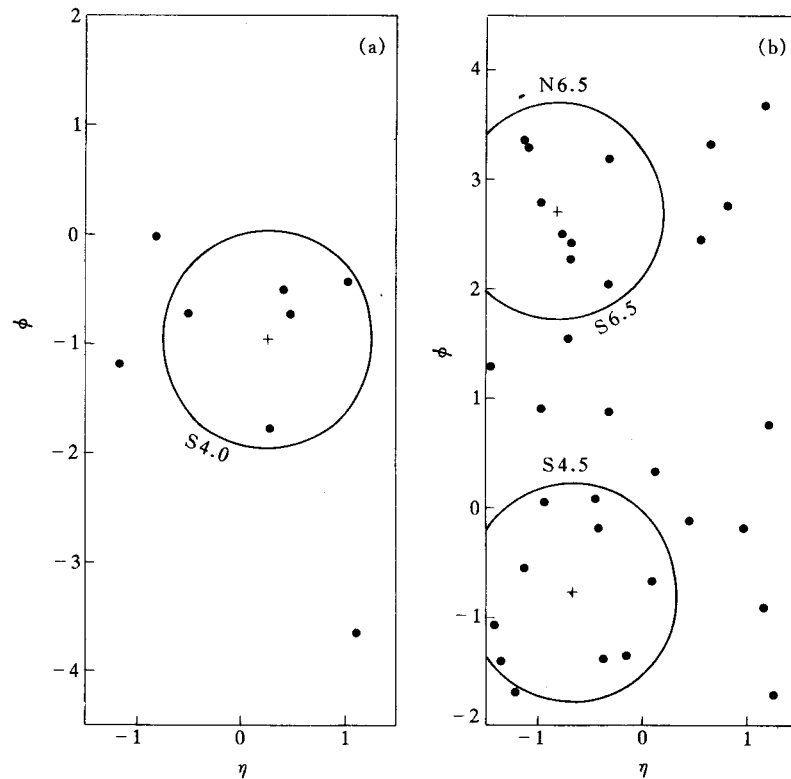


图3 不进行局域扫描漏掉喷注的事件的例子

$E_0=4\text{GeV}$. 利用判定法方案 B 得到喷注事件的比例为 9.19%. 图 2(a)、(b) 给出了样本中喷注事件和非喷注事件的多重数分布; 图 2(c)、(d) 给出了这几种情况下的单事件平均横动量分布.

比较方案 A 和 B 的结果可见, 不进行局域扫描漏掉了大约 12% 的喷注事件. 为了清楚地看到所漏掉的事件的特征, 在 η, ϕ_i 平面上画出了两个典型的这类事件, 见图 3. (图 3(a) 是不扫描无喷注, 扫描找到一个喷注; 图 3(b) 是不扫描只有一个喷注, 扫描得到两个喷注.) 图中, 小圆点是各个末态粒子的动量方向, 圆圈是所找到的喷注. 圆圈旁标 S 的是方案 B (有局域扫描 scan) 得到的喷注; 标 N 的是方案 A (无局域扫描 no-scan) 所得到的喷注. 数字是喷注的横能 (单位 GeV, 精确到 0.5 GeV). 由图可以清楚看到, 当喷注轴离粒子动量方向较远时, 只有通过扫描才能把它找出来.

但是也有相反的情况, 即: 对有的事件, 扫描反而使喷注数减少. 图 4 中画出了一个典型例子 (图例说明同图 3). 由图可见, 扫描使原先的两个横能较小的喷注变成一个横能更大的喷注. 这类事件数量很少, 在所研究样本的近十九万个事件中只有 65 个. 从物理上看, 这对应于部分子发射硬胶子的情况. 当所发射的胶子不十分硬时, 仍然可以看成是一个喷注, 而如果所发射的胶子足够硬, 就成为两个喷注. 因此, 这类事件究竟是一个还是两个喷注, 有一定模糊性.

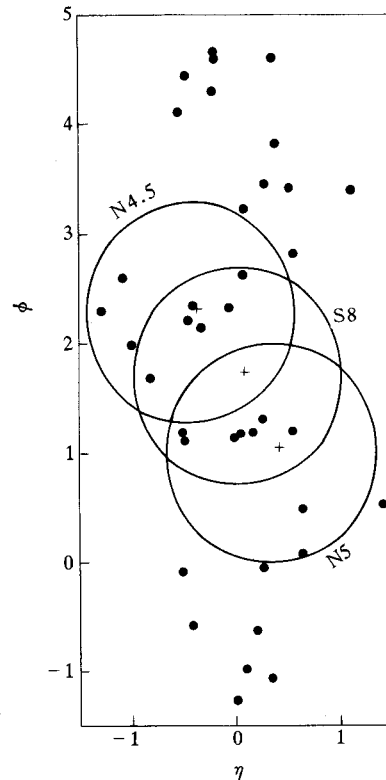


图 4 扫描使喷注数减少的例子

5 总结和讨论

以上, 给出了根据喷注的圆锥定义, 在事件样本中判定喷注的两种方案. 以每个末态粒子动量为基础判定喷注的方案 A 简便易行, 但会漏掉大约 12% 的喷注事件. 改进的方案 B, 由于在 η, ϕ_i 平面内, 长宽均等于喷注直径的矩形中进行了局域扫描, 避免了喷注事件的遗漏. 这一方案也易于在计算机上实现, 因而是一个判定喷注的理想的可实施方案.

从动力学的角度看, 喷注是硬部分子碎裂产生的强子集团. 在相空间中, 它并没有尖锐的边界和确定大小的锥角; 从一个喷注通过硬胶子辐射发展成两个喷注没有明确的界限; 不同喷注的粒子之间以及喷注中的粒子和软过程产生的粒子之间相互犬牙交错. 这些都给在事件样本中定义和判定喷注带来困难. 各种实用的喷注定义, 都是对一些原本模糊的条件加以精确化, 因而都是不同程度上的近似.

在我们的方案中, 采用了喷注的圆锥定义. 它人为地对喷注的大小和形状作出明确

的规定,而且排除了不同喷注之间以及喷注和软过程粒子之间的犬牙交错.这和事件动力学的实际情况不完全相符,只是一种近似的描述方法.

在采用了喷注的圆锥定义后,会出现一些两可的情况,需要作出“二者择一”的选择.我们的方案中所用的选择标准是“大横能优先”的原则.

例如,假定从粒子 a 和粒子 b 出发,经过加权平均手续,分别都能得到一个喷注;但是挖掉其中一个喷注的粒子后,剩下的粒子就不再能形成喷注.此时,究竟得到哪个喷注,依赖于先后次序.我们的原则是,哪一个喷注中的总横能大,就选哪一个.

又如,假定从粒子 a 和粒子 b 出发,经过加权平均手续,能得到两个喷注;与此同时,从它们之间的某一点 c 出发也能得到一个喷注(参看图 4);而挖掉后一喷注的粒子后,剩下的粒子就不再能形成原来那两个喷注.在此情况下,只要后一喷注的横能大于原先那两个喷注的横能,就选用后一个喷注.

从动力学角度看,喷注是由大横动量部分子碎裂形成,因而“大横能优先”原则有一定道理,用它来排除喷注的圆锥定义中的不确定性是合理的.

将所提出的喷注判定法用到 PYTHIA 产生器产生的蒙特-卡洛样本上,得到喷注事件的分截面、多重数分布和 \bar{p}_t 分布,和 UA1 的(微)喷注实验结果^[5,7]一致.用局域扫描和不用局域扫描得到的(微)喷注分截面只相差 12%,而多重数分布和 \bar{p}_t 分布基本上没有差别.这表明,两种方法都可以用来实际判定喷注,而有局域扫描的方法更为完备.

参 考 文 献

- [1] G. Hanson *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **35** (1975)1609; M. Banner *et al.*, *Phys. Lett.*, **118B** (1982)203; G. Aronson *et al.*, *Phys. Lett.*, **123B** (1983)115.
- [2] S. M. Berman, J. D. Bjorken, J. B. Kogut, *Phys. Rev.*, **D4** (1971)3388; G. Sterman, S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **39** (1977)1436.
- [3] S. D. Ellis, Z. Kunszt, D. E. Soper, *Phys. Rev.*, **D40** (1989)2188.
- [4] H. U. Bengtsson, T. Sjöstrand, *Comput. Phys. Commun.*, **46** (1987)43.
- [5] G. Giapetti (UA1), in Proc. of the Fifth Topical Workshop on $p-\bar{p}$ Collider Phys., St. Vincent Aosta Valley, Italy, 1985, eds. M. Greco (World Scientific, Singapore 1985).
- [6] Y. F. Wu, L. S. Liu, *Phys. Lett.*, **B269** (1991)28; Liu Feng, Wu Yuanfang, Liu Lianshou, *Chinese J. Nucl. Phys.*, **15** (1993)7.
- [7] Y. F. Wu *et al.* (UA1 mini bias), *Acta Phys. Slov.*, **44** (1994)141.

On the Methods of Jet Identification in High Energy Collisions

Liu Ming Liu Feng (Y) Liu Feng Liu Lianshou

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

Received 15 January 1996

Abstract

The "Cone algorithm" for the identification of jets is studied in some detail. Two methods are given to identify jets using the momenta of final state particles. Making use of the data sample produced by the LUND-PYTHIA Monte Carlo generator hadron-hadron collision events, the two methods are tested and compared with each other. An effective and practical method to identify jets is obtained.

Key words high energy collisions, multiparticle production, hard processes, jet, cone algorithm.