

紧致型直线对撞机上的三规范玻色子事例*

宋思瑶¹, 王奕璇¹, 杨硕^{1,2}, 穆泽田¹

1. 辽宁师范大学物理与电子技术学院, 辽宁大连 116029
2. 辽宁师范大学高能物理理论与实验研究中心, 辽宁大连 116029

摘要: 在未来的紧致型直线对撞机 (CLIC) 上, 模拟分析标准模型下三规范玻色子 WWZ 的产生过程。该过程对研究三规范玻色子耦合具有重要意义, 也是某些可能的新的物理信号的重要背景。具体针对 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-Z \rightarrow jjjj\mu^+\mu^-$ 信号道, 在探测器水平下进行了末态运动学分布的研究, 还进行了喷注分析, 采用为 CLIC 专门设计的瓦伦西亚喷注算法进行喷注聚类重建, 研究不同的喷注半径 R 值下捕捉到的 W 喷注的情况。

关键词: 紧致型直线对撞机 (CLIC); 喷注; 运动学

中图分类号: O572.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)04-0126-05

Triboson events at Compact Linear Collider

SONG Siyao¹, WANG Yixuan¹, YANG Shuo^{1,2}, MU Zetian¹

1. School of Physics and Electronic Technology, Lianning Normal University, Dalian 116029, China
2. Center for Theoretical and Experimental Research in High Energy Physics, Lianning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: At the future Compact Linear Collider (CLIC), the production process of triboson WWZ in the Standard Model was simulated and analyzed. This process has important significance for the study of triple-gauge-boson coupling and is also an important background for some possible new physics signals. Focusing on the signal channel $e^+e^- \rightarrow W^+W^-Z \rightarrow jjjj\mu^+\mu^-$, we studied the kinematic distributions of the final state at the detector level. Furthermore, jet analysis was also carried out. The Valencia jet algorithm specially designed for CLIC was adopted to study the W-jet reconstruction with different jet radii R in jet clustering.

Key words: Compact Linear Collider (CLIC); jet; kinematics

紧致型直线对撞机 (CLIC) 是国际高能物理学界提议建造的一个高能电子-正电子对撞机, 它采用电子-正电子对撞, 对撞能量最高可达几个太电子伏特 (TeV) (Linssen et al., 2012; 岳崇兴等, 2020)。它基于一种新的双光束加速技术, 提供 100 MV/m 的加速梯度 (Linssen et al., 2012)。目前, CLIC 合作组计划采用三阶段的对撞方案, 第一能

量阶段的质心能量是 $\sqrt{s} \approx 380$ GeV。在这个质心能量中, 能精确测量希格斯玻色子与费米子和玻色子的耦合; 第二能量阶段 CLIC 质心能量为 $\sqrt{s} = 1.5$ TeV; 第三能量阶段的质心能量为 $\sqrt{s} = 3$ TeV, 主要聚焦新物理的寻找 (Linssen et al., 2012; 岳崇兴等, 2020)。本文研究在 CLIC 第二能量阶段下三规

* 收稿日期: 2022-10-09 录用日期: 2023-01-12 网络首发日期: 2023-04-24

基金项目: 国家自然科学基金 (NSFC12147214); 辽宁省教育厅面上项目 (LJKMZ20221431); 国家级大学生创新创业计划训练项目 (202210165020)

作者简介: 宋思瑶 (1999 年生), 女; 研究方向: 理论物理; E-mail: songsiy1999@163.com

通信作者: 杨硕 (1982 年生), 男; 研究方向: 粒子物理理论与现象学; E-mail: shuoyang@lnnu.edu.cn

范玻色子WWZ的产生, 该过程对三规范玻色子耦合研究和TeV能标的新粒子的寻找非常重要。三规范玻色子过程是很多可能的新物理信号的重要背景(Agashe et al., 2018; Carpenter et al., 2022)。例如, 很多新物理模型预言了TeV能标的新的规范玻色子或新的标量, 它们可以与Z联合产生, 随后再衰变为 W^+W^- 。标准模型的WWZ产生便是此类新物理信号的重要背景。本文考虑W玻色子的强子衰变和Z玻色子衰变为缪子对, 研究标准模型下的具体信号道为 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-Z \rightarrow jjjj\mu^+\mu^-$, 在部分子水平和探测器水平下分析该过程的运动学分布, 本研究可为实验寻找新物理过程的信号背景分析提供有益借鉴。本文采用瓦伦西亚喷注(VLC)算法(Boronat et al., 2015; Boronat et al., 2018)进行喷注重建, 该算法与大型强子对撞机(LHC)上主要采用的Anti-Kt算法有所不同, 是专门针对CLIC特点设计的一种喷注算法。本文也进一步分析了运用VLC算法重建的喷注质量。

1 VLC算法

高能对撞末态产生的夸克和胶子, 并不是实验中直接观测的末态。高能的部分子经过部分子雨和强子化过程, 最后导致一束准直喷射的强子, 我们称之为喷注。在碰撞事例重建时, 需要运用喷注算法定义在大量末态粒子中选取哪些粒子进行聚类生成喷注, 同时定义如何将聚类粒子的四动量信息进行重组。虽然不像LHC对撞环境那么脏, 未来高能轻子对撞机的背景比运行在Z玻色子质量能区的LEP、SLD对撞机的背景要复杂, 喷注重建表现很重要。VLC算法是近年针对未来高能轻子对撞机提出的一种序贯重组类的喷注聚类算法。序贯重组类算法主要特点在于迭代寻找距离最小的两个(组)粒子进行聚类重组(Salam et al., 2010)。VLC算法定义粒子*i*与粒子*j*间的距离为(Boronat et al., 2015; Boronat et al., 2018)

$$d_{ij} = 2\min(E_i^{2\beta}, E_j^{2\beta})(1 - \cos\theta_{ij})/R^2, \quad (1)$$

式中 E_i 和 E_j 为粒子能量; θ_{ij} 为粒子*i*与粒子*j*之间的夹角; β 参数是实数, 可取任意值, β 参数表示距离中能量的指数, 决定了聚类的顺序(类似于广义Kt算法中的指数*n*); R 为喷注的喷注半径参数或分离度参数。

两粒子之间的分离度

$$R_{ij} = \sqrt{(\Delta\varphi)^2 + (\Delta y)^2}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为*i*, *j*两粒子之间的方位角差; Δy 为两粒子之间的快度差。 d_{ij} 由粒子的能量信息和角度信息综合确定。 R 值越大, 圆锥越大, 则重建包含的粒子越多。

VLC算法中粒子-束流轴距离为(Salam et al., 2010)

$$d_{iB} = E_i^{2\beta} \sin^{2\gamma}\theta_{iB}, \quad (3)$$

式中 θ_{iB} 为粒子*i*与束流轴的夹角, 即极角; γ 参数和 β 参数相似, 也是实数, 可取任意值, 当 R 参数设置为中心喷注的最优值时可以通过选择 γ 来调整喷注的面积。

当 $\beta = \gamma = 1$ 时, d_{ij} 和 d_{iB} 的表达式简化为

$$d_{ij} = 2\min(E_i^2, E_j^2)(1 - \cos\theta_{ij})/R^2, \quad (4)$$

$$d_{iB} = E^2 \sin^2\theta_{iB} = P_{Ti}^2. \quad (5)$$

当角度足够小时, d_{ij} 由两个粒子中较软粒子相对于较硬粒子的横动量 P_{Ti} 的平方给出。

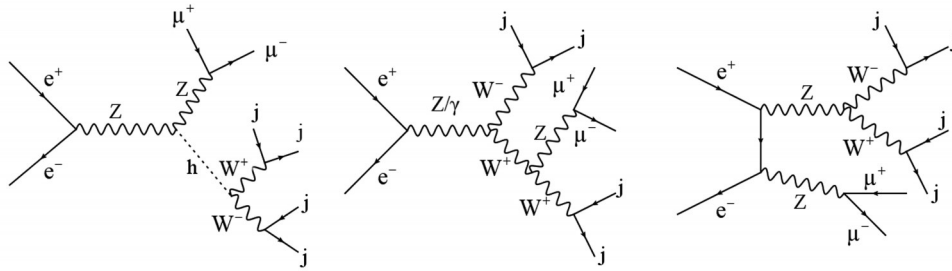
高能对撞机LHC或CLIC对撞时, 将产生大量具有大横动量的电弱质量粒子(主要指W、Z玻色子、黑格斯玻色子H、顶夸克*t*), 实验室系中它们衰变的产物会非常靠近。当这些高增速的电弱质量粒子进行纯强子衰变时, 它们的产物会在一个大 R 值范围内形成一个胖喷注。喷注子结构技术(Larkoski et al., 2020)用大的 R 值捕捉到所有衰变产物后, 根据这一胖的强子喷注的内部结构和质量等信息再进一步分析, 以区分不同喷注的物理来源。

本文研究CLIC在TeV能区对撞模式下, 三规范玻色子产生过程。研究中采用为CLIC专门设计的VLC算法, 选取不同 R 值分析不同情形下捕捉到的W喷注比率。

2 三规范玻色子模拟事例运动学

本文研究了CLIC 1.5 TeV对撞模式下标准模型的三规范玻色子WWZ的产生, 该过程主要由规范玻色子和黑格斯玻色子贡献, 代表性费曼图见图1。本文聚焦所有W玻色子的强子衰变、Z玻色子的轻子衰变, 相应的末态为 $jjjj\mu^+\mu^-$ 。

本文选用MadGraph5(Alwall et al., 2014)事例产生器进行散射截面计算与模拟事例产生。产生部分子水平事例后运用PYTHIA8(Sjöstrand et al., 2015)进行部分子雨和强子化处理。探测器效应

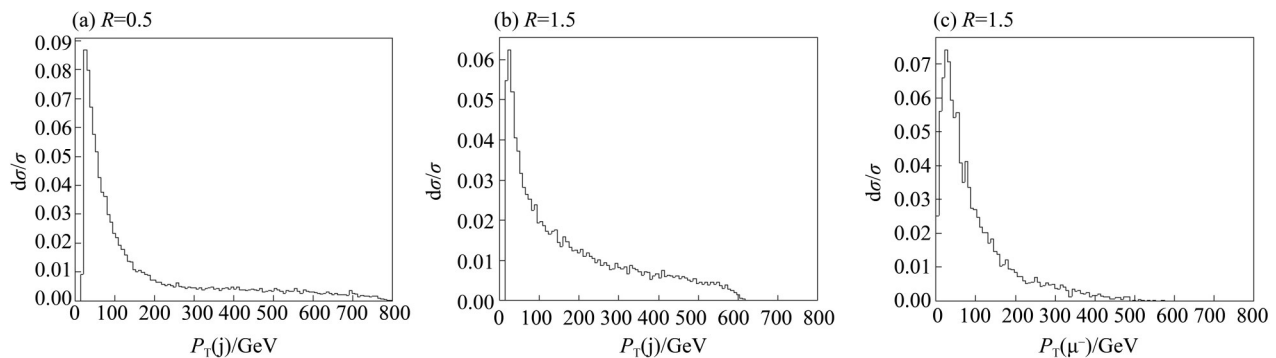
图 1 过程 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-Z \rightarrow jjjj\mu^+\mu^-$ 的代表性费曼图Fig. 1 Representative Feynman diagrams of the process $e^+e^- \rightarrow W^+W^-Z \rightarrow jjjj\mu^+\mu^-$

使用 DELPHES 3 (Collaboration et al., 2014) 进行模拟, 模拟中使用了标准的 CLICdet 模拟卡 (Leo-grande et al., 2019)。喷注重建使用 FastJet3 (Cac-ciari et al., 2012) 程序包, 采用 VLC 算法。运动学分析采用 MadAnalysis5 (Conte et al., 2013) 程序包。事例筛选标准为所有轻子和喷注快度 η 满足 $0 < |\eta| < 4$, 所有轻子和喷注横动量 P_T 满足 $P_T \geq 20$ GeV。计算得出该过程散射截面为 0.753 fb, 对亮度 2500 fb^{-1} 时, 有 1882 个该信号道事例产生。

在 1.5 TeV 碰撞下, 标准模型的三规范玻色子

过程中有大量的高速玻色子, 它们强子衰变产物会形成胖的喷注。这些事例会构成新物理寻找的重要背景, 具有重要的研究价值。比如一些模型预言了重黑格斯粒子存在, 它与一个规范玻色子联合产生, 随后它会衰变成一对规范玻色子。

图 2 显示了 $R=0.5$ 和 $R=1.5$ 下末态喷注的 P_T 分布, 以及轻子 μ^- 的 P_T 分布, $d\sigma/\sigma$ 为归一化的微分截面分布。尽管小 P_T 事例较多, 仍有大量事例末态喷注和轻子的 $P_T > 100$ GeV。选取大 R 值时, 由于合并的粒子增多, 事例倾向于具有较大的 P_T 。

图 2 VLC 算法下不同半径 R 的喷注横动量分布和缪子 μ^- 横动量分布Fig. 2 In the VLC algorithm, the transverse momentum distributions of jets with different jet radius R and that of muon

本研究还进一步分析了强子喷注的 R 值对重建的影响。采用 VLC 算法, 令 $\beta = \gamma = 1$, 分别选取 $R=0.5, 1.0, 1.2, 1.5$ 进行喷注聚类, 然后对末态非遍举重建的喷注进行分析。要求喷注数 ≥ 2 , 不同 R 值下末态喷注数 $N(j)$ 和喷注质量 $M(j)$ 分布分别见图 3 和图 4。一般说来, 喷注数为 2~4 个, 小 R 值时相对于大 R 值时所具有的 3、4 个喷注的事例相对较多。当 $R=0.5$ 时 3 喷注事例占比为 40.59%, 4 喷注事例占比 18.23%; 当 $R=1.5$ 时 3 喷注事例占比为 11.31%, 4 喷注事例占比 0.55%。

图 4 表明 VLC 算法中 R 值不同时, 重建喷注的 $M(j)$ 分布不同。当 R 值越大时, 相应会有越多比率

的 $M(j)$ 在 80 GeV 附近, 即 W 质量能区。这表明选取大 R 值, 更易捕捉到 W 玻色子强子衰变的产物。但是, 在大 R 值时, 即使 $R=1.5$ 时在质量较小处仍有一个峰值, 这是由 W 衰变产物的运动学分布所决定, 仍有一部分 W 衰变产物具有较大的分离度。如果进一步要求喷注具有较大的 P_T , 这部分小质量喷注事例将会被大大减少。

我们对 $R=1.5$ 时的末态喷注进行进一步分析, 研究事例中不同的喷注在 W 玻色子质量 M_W 的窗口范围内 ($|M_j - M_W| \leq 10 \text{ GeV}, M_W = 80.4 \text{ GeV}$) 的比率, 结果如表 1 所示。其中, P_T 最大的喷注 j_1 在 W 质量窗口范围的事例占总事例的 46.3%; P_T 第二大

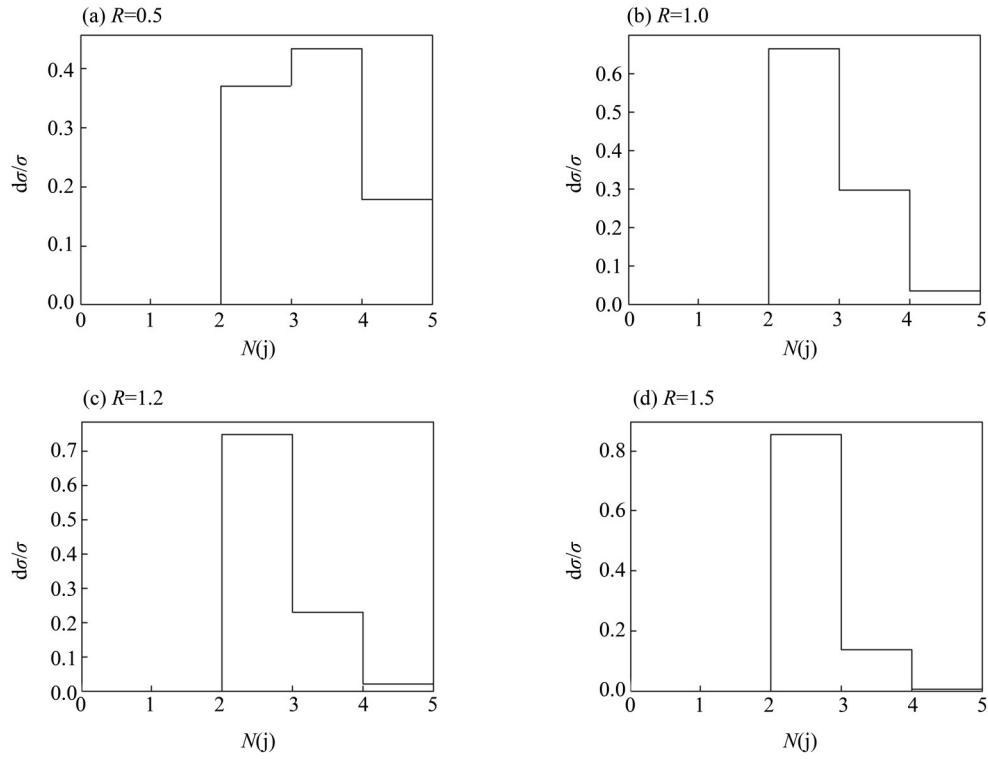


图 3 VLC算法下不同喷注半径 R 值末态产生喷注数分布

Fig. 3 In the VLC algorithm, the jet number distributions in final states with different jet radius R

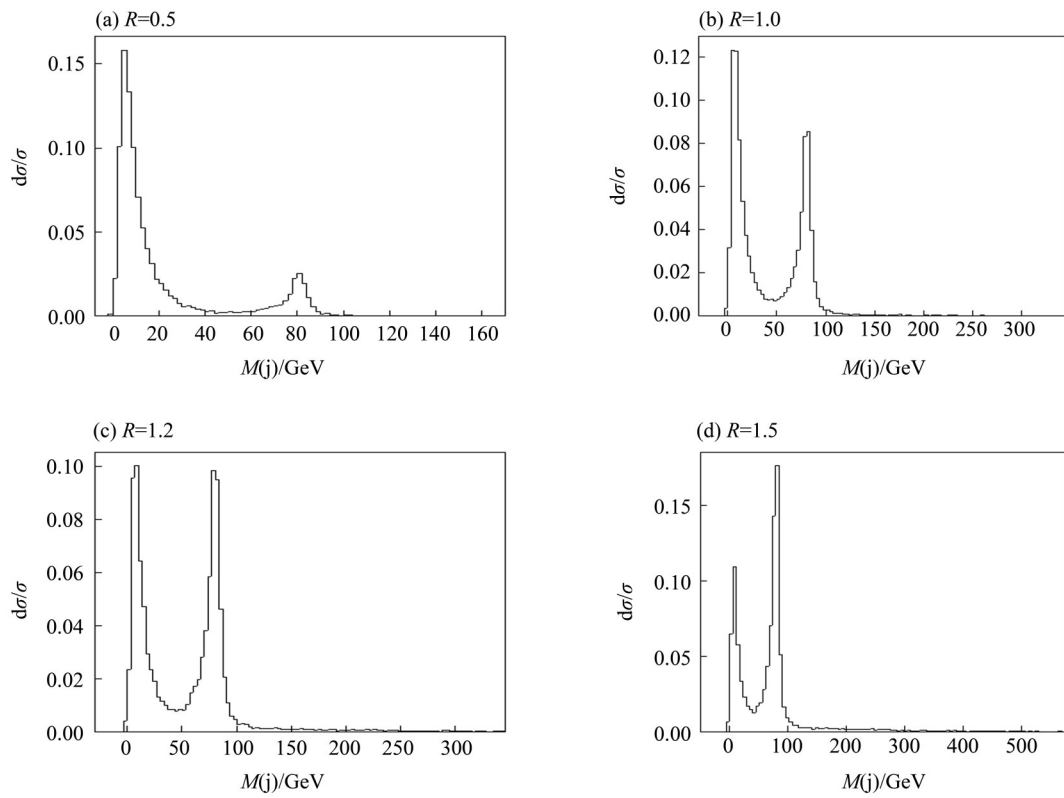


图 4 VLC算法下不同喷注半径 R 值末态喷注质量分布

Fig. 4 In the VLC algorithm, the final jet mass distribution with different jet radius R

表 1 在 $N>1$ 且 $R=1.5$ 时, 喷注质量在 W 玻色子质量窗口 $(|M_j - M_w| \leq 10 \text{ GeV})$ 范围内的比率

Table 1 For $N>1$ and $R=1.5$, the proportion of jets with masses in the W boson mass window %	
喷注质量筛选要求	比率
$M(j_1)$	46.3
$M(j_2)$	30.3
至少有一个 jet	54.7
任意一个 jet 在 W 质量窗口范围内, 其余两个合并	3.35

喷注 j_2 在 W 质量窗口范围的事例占总事例的 30.3% ; j_1 、 j_2 都在这一质量范围内的比率为 21.9% ; 至少有一个喷注在这一质量范围内的比率为 54.7%。对于末态有 3 个或 4 个喷注的事例, 如果我们要求一个喷注质量在 W 质量窗口内, 其余喷注合并后的质量也符合 W 质量窗口标准的事例比率为 3.35%。

参考文献:

- 岳崇兴, 张纳倩, 于海涓, 2020. 高能对撞机实验之未来发展趋势[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 43(1): 27-32.
- AGASHE K, COLLINS J H, DU P, et al, 2018. Detecting a boosted diboson resonance[J]. J High Energy Phys, 2018(11): 27.
- ALWALL J, FREDERIX R, FRIXIONE S, et al, 2014. The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations [J]. J High Energy Phys, (7): 79.
- BORONAT M, FUSTER J, GARCIA I, et al, 2018. Jet reconstruction at high-energy electron-positron colliders [J]. Eur Phys J C, 78(2): 144.
- BORONAT M, FUSTER J, GARCÍA I, et al, 2015. A robust jet reconstruction algorithm for high-energy lepton colliders[J]. Phys Lett B, 750: 95-99.
- CACCIARI M, SALAM G P, SOYEZ G, 2012. FastJet user manual[J]. Eur Phys J C, 72(3): 1896.
- CARPENTER L M, SMYLLIE M J, RAMIREZ J M C, et al, 2022. New physics in triboson event topologies[J]. Phys Rev D, 105(7): 075027.
- CONTE E, FUKS B, SERRET G, 2013. MadAnalysis5, a

3 结论与展望

本文在 CLIC 上研究三规范玻色子产生的信号道 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-Z \rightarrow jjjj\mu^+\mu^-$, 在探测器水平下分析末态粒子的运动学分布, 对末态粒子的横动量分布和末态产生喷注数目分布进行分析, 同时运用 VLC 算法对不同喷注半径 R 值下喷注的质量分布进行研究。结果表明, 选取的 R 值越大, 分布在 W 玻色子质量能区的喷注比率越大, 抓住的纯强子衰变的 W 玻色子越多。例如, 选取 $R=1.5$ 时, j_1 、 j_2 都在 W 质量范围内 $|M_j - M_w| \leq 10 \text{ GeV}$ 的事例数占总事例数的比率为 21.9% ; 至少有一个喷注在 W 质量范围内的比率为 54.7%。本文研究了 CLIC 下三规范玻色子 WWZ 产生的信号道 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-Z \rightarrow jjjj\mu^+\mu^-$, 其相关的研究方法也适用于其他过程的信号道。本文研究对未来对撞机上新物理信号的寻找具有一定的借鉴意义。

user-friendly framework for collider phenomenology [J]. Comput Phys Commun, 184(1): 222-256.

COLLABORATION T D 3, de FAVEREAU J, DELAERE C, et al, 2014. DELPHES 3: A modular framework for fast simulation of a generic collider experiment [J]. J High Energy Phys, 2014(2): 57.

LARKOSKI A J, MOULT I, NACHMAN B, 2020. Jet substructure at the Large Hadron Collider: A review of recent advances in theory and machine learning [J]. Phys Rep, 841: 1-63.

LEOGRANDE E, ROLOFF P, SCHNOOR U, et al, 2019. A DELPHES card for the CLIC detector [EB/OL]. arXiv: 1909.12728. <https://arxiv.org/abs/1909.12728>.

LINSSEN L, MIYAMOTO A, STANITZKI M, et al, 2012. Physics and detectors at CLIC: CLIC conceptual design report [EB/OL]. arXiv: 1202.5940. <https://arxiv.org/abs/1202.5940>.

SALAM G P, 2010. Towards jetography [J]. Eur Phys J C, 67(3/4): 637-686.

SJÖSTRAND T, ASK S, CHRISTIANSEN J R, et al, 2015. An introduction to PYTHIA 8.2 [J]. Comput Phys Commun, 191: 159-177.

(责任编辑 张冰)