重离子碰撞实验中的Rivet与分析保存

Antonio Carlos Oliveira da Silva（代表ALICE合作组）田纳西大学诺克斯维尔分校，*1408 Circle Drive*，诺克斯维尔，田纳西州*37996-1200*

收到日期：2022年7月3日；接受日期：202年9月15日 2

实验数据与理论预测的比较对于理解强子碰撞中相互作用和粒子产生的机制十分重要，这既适用于大型强子对撞机实验，也适用于相对论重离子对撞机实验。为此，人们构想并开发了多种工具。Rivet（实验与理论的稳健独立验证）是一个框架，能够促进高能物理实验的测量结果与蒙特卡罗事件生成器之间的比较；这些事件生成器可以使用HepMC软件包生成输出。Rivet包含一个由各实验开发的分析算法存储库，并提供分析文档和分析保存功能。

近期关于 在 Rivet 中实现中心度和多重数类别的进展将在本文中介绍。

关键词：

arXiv:2301.02704v1 [physics.data-an] 6 Jan 2023

1 引言

目前，高能物理实验中的数据和分析保存正逐渐成为普遍关注的问题。由于数据未能以易于访问的方式妥善保存，早期实验和合作组已无法复现其测量结果。旧有代码包含探测器接受度、粒子与事件选择以及修正等关键且详细的信息，但如今已无人维护，即使能够运行，重新运行也十分困难。因此，将早期测量结果与新模型进行比较极具挑战性。

实验与理论稳健独立验证（Rivet）[1] 是一个旨在促进数据与蒙特卡罗（MC）事件生成器之间比较的框架。

2 Rivet 框架

Rivet 分析采用 C++ 编写，目前已包含来自多个高能物理合作组的 1000 多项分析。数据（若可用）会直接从 HepData [2]下载。任何集成到事例生成器中、且能够生成符合 HepMC 框架 [3]规范的输出的模型，都可以由 Rivet 用于与数据进行比较。图 1 所示的示意图展示了 Rivet 与 HepMC 和 HEPData 的集成方式。

图 1 中事例生成器的参考文献见 [4–12]。并非所有生成器都能按照 HepMC 标准提供输出。

原则上，介绍一项测量的文章应提供充分信息，使其他实验人员或理论学家能够复现该测量，并有兴趣将数据与模型进行比较。然而，有关探测器接受度、粒子筛选、触发条件等方面的一些细节可能会被遗漏或描述得不够清楚。即使在大型合作组的内部说明中，也可能出现这种情况。

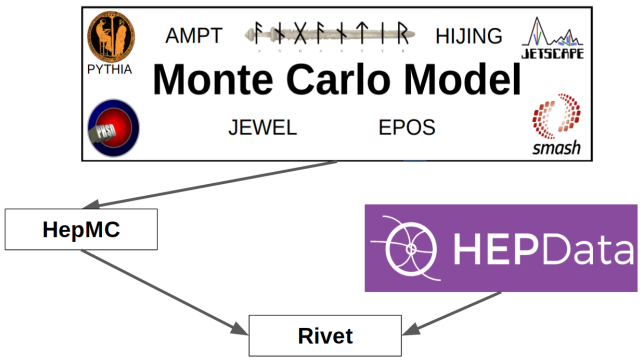

图 1. Rivet 与 HepMC 和 HEPData 集成方式的示意图。

Rivet 旨在保留分析的所有细节。此外，它应尽可能贴近测量中采用的方法进行复现。Rivet 理念的支柱之一是，我们应以处理数据的同样方式处理蒙特卡罗模拟。

为尽可能忠实地还原测量中采用的原始接收度、筛选条件和方法，只要条件允许，Rivet 分析就应由发表包含该测量的论文的合作组来实现。目前，ALICE 已制定正式的内部 Rivet 分析审批流程。

3 中心度与多重数判定

重离子碰撞中的测量通常按中心度区间进行差分，以研究不同的物理现象。因此，中心度判定是 Rivet 必须提供的一项关键功能，以便再现重离子碰撞中的测量。

ALICE 中的中心度判定通常由 V0探测器 [13]，提供，该探测器由两个阵列组成：V0-A 和 V0-C，分别覆盖赝快度范围 2.8< η < 5.1 和 3.7 < η < 1.7。

图 2 展示了沉积在 V0 闪烁体中的总能量分布——

（振幅）。中心度最高的碰撞对应于 V0 振幅最大的事件。中心度判定的详细信息见 [14]。

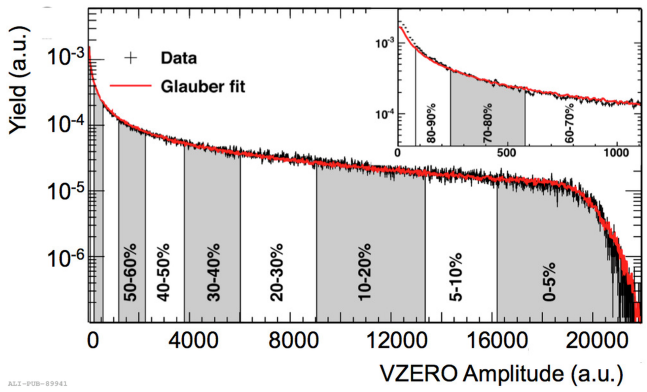

图2. 黑色数据点表示V0闪烁体中的总振幅分布。使用Glauber模型的参数，通过负二项分布（NBD）对数据进行拟合。

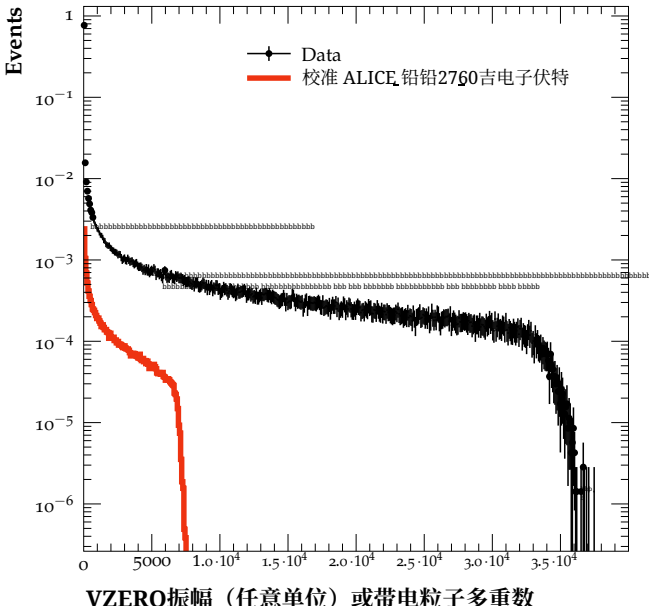

图3. ALICE测得的V0振幅（任意单位，黑色标记）以及使用Rivet根据采用PYTHIA 8 Angantyr模拟的2.76太电子伏特铅铅碰撞事件计算出的V0接受度范围内的带电粒子多重数（红线）。

Rivet 中的中心度判定使用 V0 接受范围内的带电粒子多重数。由于蒙特卡洛事例生成器中重离子碰撞事件的粒子多重数取决于模型，因此需要创建一个与碰撞系统、能量和事例生成器相关的校准文件。图 3 显示了 ALICE 测得的 V0 振幅分布，以及 $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 2.76$ 太电子伏特下铅铅碰撞中的带电粒子多重数 ___ 由PYTHIA 8 Angantyr [6]生成。

Rivet 将图 3 中所示的带电粒子多重数（红线）划分为中心度百分位。因此，中心度最高的事件对应于多重数最高的事件。运行需要进行中心度判定的 Rivet 分析时，必须提供此校准文件。pp 碰撞和质子-铅碰撞中的多重数判定也采用类似策略。目前，ALICE 正在开发一种利用自归一化带电粒子多重数分布表征事例的方法。这项工作将在第 4 节和第 5 节中介绍。

4 自归一化多重性

在 ALICE 中，可以使用 V0探测器定义前向快度多重性类别。图 4 显示了 V0M 振幅的分布，该振幅与通过 V0A 和 V0C 探测器的带电粒子数成正比，并按其平均值缩放 ⟨V0M⟩ [15]。

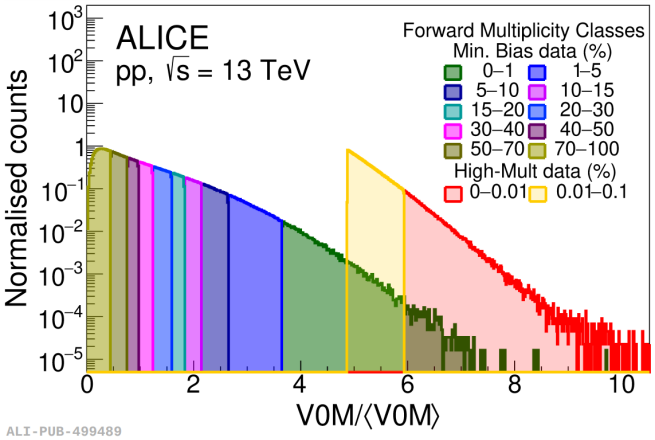

图 4. V0M 振幅分布按其平均值缩放 ⟨V0M⟩，用于确定在 $\sqrt{s} = 13$ 太电子伏特质子-质子碰撞中的前向快度多重性类别。

硅像素探测器（SPD） [16, 17] 是 ALICE 中距离相互作用点最近的探测器。SPD 利用重建的径迹段来确定中快度多重性类别；径迹段是连接 SPD 两层中的击中点并指向主顶点的径迹片段。自归一化估计器通过 SPD 径迹段分布 $N_{\mathrm{SPD\ tracklets}}$ 在-2 < η < 2 中的数值除以其平均值 $\langle N_{\mathrm{SPD\ tracklets}} \rangle$得到。图 5 展示了自归一化 SPD 径迹段分布。

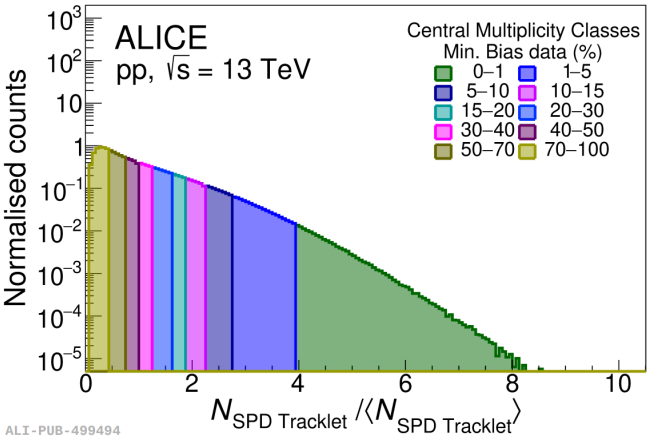

图5. 将用于确定质子-质子碰撞中中快度多重数类别的 SPD 径迹段数量分布按其平均值缩放$\langle N_{\mathrm{SPD\ 径迹段}}\rangle$ $\sqrt{s}=13$ 太电子伏特。

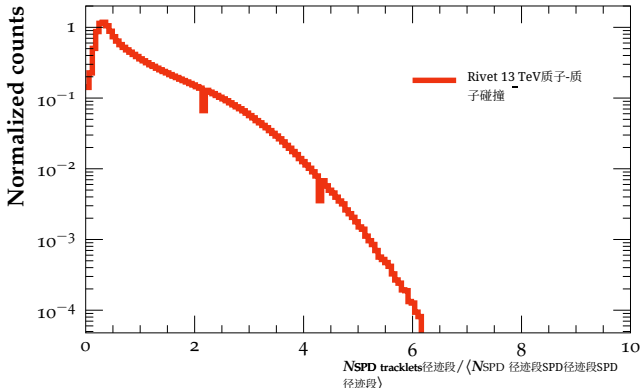

图7. 使用 PYTHIA 8 Monash 2013 生成的 $\sqrt{s}=13$ 太电子伏特质子-质子碰撞中，SPD探测器接受度范围内带电粒子的自归一化多重数分布。

ALICE 正在开发 Rivet 中基于自归一化多重数估计器的事件表征方法。与上一节所述类似，Rivet 使用 V0探测器接受度内的带电粒子多重数，而非 V0M振幅。具体而言，前向快度自归一化估计器使用 V0探测器接受度内带电粒子的多重数，并以其平均值进行缩放。图 6 显示了使用 Rivet 计算的 V0M/⟨V0M⟩ 分布；所用数据为通过 PYTHIA 8 Monash 2013 调谐 [4, 18]生成的 13 TeV 质子-质子碰撞。

5 使用自归一化多重数估计量的结果

Rivet 中的自归一化多重数估计量框架目前仍在开发中，并正在使用 ALICE 已发表的、采用此类估计量的文章进行测试。用于测试 V0M/⟨V0M⟩ 估计器的首个测量，是质子-质子碰撞中不同多重数区间内喷注的横向动量（p_{T}），碰撞能量为 $\sqrt{s}=13$太电子伏特 [19]。

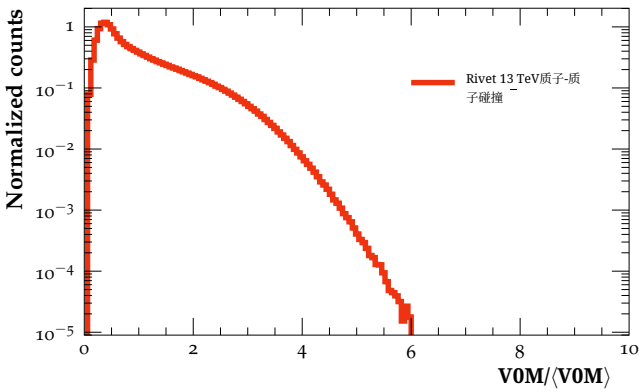

图6. 使用 PYTHIA Monash . 生成的 TeV 质子-质子碰撞中，V
0
$\sqrt{s}=$ 探测器接受度内带电
13
8
2013
粒子的自归一化多重数分布。

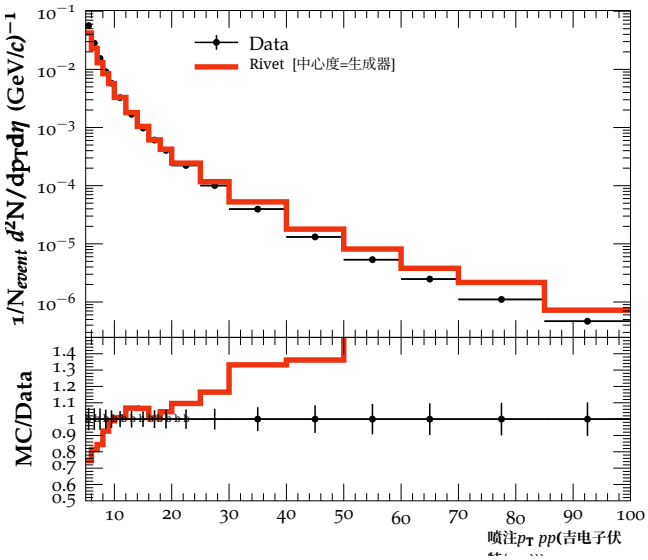

图8. $\sqrt{s}=5.02$ 太电子伏特质子-质子碰撞中，对应于基于自归一化 V0M 的多重数估计量的 0–1%多重数类别的带电粒子喷注横向动量分布。使用喷注分辨参数 $R=0$ 重建喷注。数据（黑色标记）与 PYTHIA 8 Monash 2013（红线）进行比较。

与 V0M 的做法类似，中快度的自归一化多重数估计量使用 SPD 接受度内带电粒子的数量。图7显示了使用 PYTHIA 8 Monash 2013 生成的 13 TeV 质子-质子碰撞中，SPD 接受度内带电粒子数量分布按其平均值缩放后的结果。

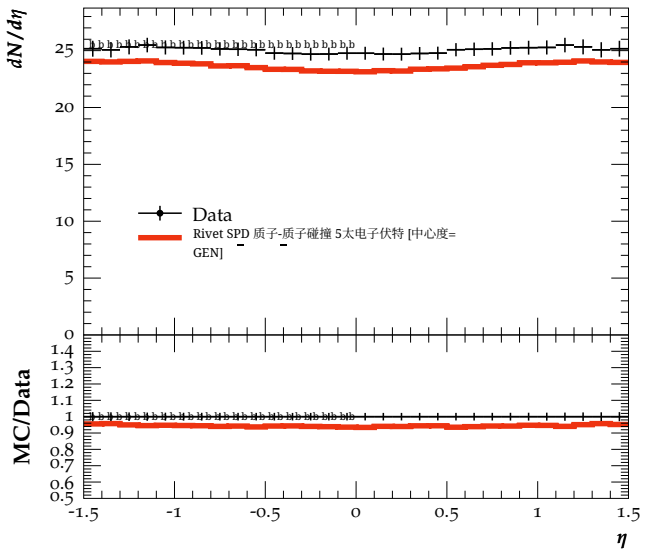

图9. 基于自归一化SPD多重数估计器的0-1%多重数类别在 $\sqrt{s} = 5.02$ TeV pp碰撞中的带电粒子赝快度分布。数据（黑色标记）与PYTHIA 8 Monash 2013（红线）进行比较。

在 $\sqrt{s}$ =的质子-质子碰撞中，使用 FastJet anti-k_{T} algorithm [20] 、分辨率参数为 R =0.2 重建的喷注在 0-1% 多重数类别中的横向动量

13 TeV的结果见图8。使用Rivet和自归一化V0M多重数框架将测量结果与PYTHIA 8 Monash 2013进行了比较。模型与数据的一致性表明，该框架能够重现ALICE使用的多重数判定方法，这是一个积极信号。其他多重数类别也呈现出类似的表现。

使用 SPD 的自归一化估计器也通过 [15] 中的测量进行了测试。图 9 展示了 $\sqrt{s} = 5.02$ 太电子伏特下 pp 碰撞中的带电粒子赝快度分布。利用 Rivet 和 SPD 自归一化框架，将 ALICE 数据与 PYTHIA 8 Monash 2013 进行了比较。结果较好地再现了所引文章中与蒙特卡罗的比较结果。

6 总结

Rivet 是用于分析保存以及将数据与蒙特卡罗事例生成器进行比较的有力工具。开发更多工具以便于实现 Rivet 分析，是对该框架的重要贡献，可使实验和理论两方面均受益。自归一化多重数估计量在 Rivet 中的蒙特卡罗曲线与实验提供的曲线之间给出了相符的结果。最终目标是尽快将这一多重数框架纳入 Rivet 官方框架。

1. A. Buckley 等，Rivet用户手册（2010）。2. E. Maguire、L. Heinrich 和 G. Watt，HEPData：高能物理数据存储库，《物理学杂志：会议系列》898（2017）102006，10.1088/1742-6596/898/ 10/102006。3. M. Dobbs 和 J. B. Hansen，供高能物理使用的 HepMC C++ 蒙特卡罗事件记录，技术报告，欧洲核子研究中心，日内瓦（2000），网址：https://cds.cern.ch/record/ 684090，修订版本号1于2001-02-27 09:54:32提交。4. T. Sjöstrand、S. Mrenna 和 P. Z. Skands，PYTHIA 8.1简介，《计算物理通讯》178（2008）852，10.1016/j.cpc.2008.01.036。5. Z.-W. Lin 等，相对论重离子碰撞的多相输运模型，《物理评论C》72（2005），10.1103/ physrevc.72.064901。6. C. Bierlich 等，PYTHIA8中的重离子碰撞Angantyr模型，《高能物理学杂志》10（2018）134，10.1007/ JHEP10(2018)134。7. J. H. Putschke 等，JETSCAPE框架（2019），10.48550/ARXIV.1903.07706，网址：https://arxiv.org/abs/1903.07706。8. J. Weil 等，基于一种新的重离子碰撞强子输运方法的粒子产生和平衡性质

碰撞，《物理评论C》94（2016），10.1103/physrevc.94.054905

9. T. Pierog 等，《EPOS LHC：利用欧洲核子研究中心大型强子对撞机测得的数据检验集体强子化》，Phys. Rev. C 92 (2015) 034906, 10.1103/PhysRevC.92. 034906 10. K. Zapp 等，《喷注淬火的蒙特卡洛模型》，《欧洲物理学杂志C》60 (2009), 10.1140/epjc/ s10052-009-0941-2 11. X.-N. Wang 和 M. Gyulassy，《hijing：用于质子-质子、质子-核和核-核碰撞中多喷注产生的蒙特卡洛模型》，Phys. Rev. D 44 (1991) 3501, 10.1103/PhysRevD.44.3501 12. W. Cassing 和 E. Bratkovskaya，《部分子–强子–弦动力学：相对论能量下的非壳输运方法》，《核物理A》831 (2009) 215, 10.1016/j. nuclphysa.2009.09.007 13. T. A. Collaboration，《ALICE VZERO系统的性能》，《仪器学报》8 (2013) P10016, 10.1088/ 1748-0221/8/10/p10016 14. B. Abelev、J. Adam 和 D. Adamov，《在 $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}}$ = 2.76 TeV能量下利用ALICE测定铅-铅碰撞的中心度》，88 (2013), 10.1103/physrevc.88.044909 15. J. Adam 等，《质子-质子碰撞中带电粒子的赝快度分布随中快度和前向快度多重数的变化——

——在 $\sqrt{s}$ = 5.02、7和13 TeV能量下（2021），10.1140/epjc/s10052-021-09349-5 16. ALICE内层跟踪系统（ITS）：技术设计报告，技术设计报告。ALICE（欧洲核子研究中心，日内瓦，1999），网址：http://cds.cern.ch/record/391175。17. R. Santoro 等，《ALICE硅像素探测器：为首束质子束做好准备》，《仪器学报》4 (2009) P03023, 10.1088/1748-0221/4/03/p03023 18. P. Skands、S. Carrazza 和 J. Rojo，《PYTHIA 8.1的调优：Monash 2013调谐，《欧洲物理学杂志C》74（2014），10.1140/epjc/s10052-014-3024-y 19. ALICE合作组，质子-质子碰撞中带电粒子喷注产生的多重数依赖性（2022），10.48550/ARXIV.2202.01548，网址：https://arxiv.org/abs/2202.01548。20. M. Cacciari、G. P. Salam 和 G. Soyez，FastJet 用户手册，《欧洲物理学杂志 C》 72 （2012），10.1140/ epjc/s10052-012-1896-2