



CERN-EP-2022-286

16 December 2022

Production of pions, kaons, and protons as a function of the relative transverse activity classifier in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

ALICE Collaboration*

摘要

*警告：该PDF由紫东太初大语言模型+Latex翻译生成，版权归原文作者所有。翻译内容可靠性无保障，请仔细鉴别并以原文为准。为了防止大语言模型的意外谬误产生扩散影响，禁止移除或修改此警告。

π^\pm 、 K^\pm 和 $(\bar{p})p$ 的产生在 $\sqrt{s} = 13$ TeV 的 pp 碰撞中不同事件的拓扑区域内被测量。粒子的横向动量 (p_T) 谱在定义为相对于事件中领先粒子方向的“向前”、“横向”和“远离”角区域中被测量。虽然向前和远离区域包含了近侧和远离侧喷流的碎片产物，但横向区域主要由来自底层事件 (UE) 的粒子主导。使用相对横向活动分类器 $R_T = N_T / \langle N_T \rangle$ 根据事件的 UE 活动对事件进行分组，其中 N_T 是在横向区域中每个事件测量到的带电粒子多重性， $\langle N_T \rangle$ 是所有分析事件的平均值。报告了在三个拓扑区域中作为 R_T 函数的已识别粒子 p_T 谱的首次测量结果。发现高横向动量粒子的产额相对于 R_T 集成测量结果在向前和远离区域中随着 R_T 的增加而减少，表明较软的 UE 随着 R_T 的增加主导了粒子产生，并验证了 R_T 可以用来控制 UE 的大小。相反，横向区域中的光谱形状随着 R_T 的增加显著硬化。这种硬化遵循质量排序，对于较重的粒子更为显著。最后，观察到在低 UE 限制 ($R_T \rightarrow 0$) 下的粒子比率 $(p + \bar{p})/(\pi^+ + \pi^-)$ 和 $(K^+ + K^-)/(\pi^+ + \pi^-)$ 接近蒙特卡洛生成器 (如 PYTHIA 8 使用 Monash 2013 调整和 EPOS LHC) 的预期，其中喷流碎片模型已调整以重现 e^+e^- 结果。

1 Introduction

近年来, 质子-质子 (pp) 和质子-铅 (p-Pb) 碰撞, 通常被称为小型碰撞系统, 引起了重离子团体的关注, 这是因为一些在高多重性pp和p-Pb碰撞中的测量显示了与在重离子碰撞中观察到的相似特征。在重离子碰撞中, 径向 [1–4] 和各向异性 [5, 6] 流 (集体现象) 以及奇异性增强 [1, 7, 8] 的观测与强相互作用夸克-胶子等离子体 (QGP) 的形成相关。然而, 这些特征也在pp和p-Pb碰撞中被观察到 [2, 4, 8, 9]。特别是, 小型碰撞系统中 p_T -微分的重子与介子比率在作为事件中带电粒子多重性的函数被研究时, 展示了类似径向流的影响 [2, 3]。为了确定在小型碰撞系统中观测到的效果 的起源, 有人提议研究粒子产生作为底层事件 (UE) 活动的函数 [10]。UE被定义为不来源于在最硬散射中产生的部分子的碎片化产物的粒子。它包括来自初始态和最终态辐射、束流残留和多部分子相互作用 (MPIs) 产生的粒子集合 [11]。在MPI模型的背景下, 测量作为UE活动函数的已识别粒子产额和比率, 允许人们在一个MPI被抑制 (-增强) 的环境中测量事件属性。此外, 正如 [12] 中所示, 这些测量还可以提供关于可能效应的见解, 这些效应产生的迹象与径向流动相似, 但却是由随着多重性增加的喷射硬化产生的。

在LHC能量下, 粒子和反粒子以相等的数量产生 [13]。在本文余下部分, 除非另有说明, 否则采用的符号 π 、K和p分别指代 $(\pi^+ + \pi^-)$ 、 $(K^+ + K^-)$ 和 $(p + \bar{p})$ 。在这项研究中, 研究了 π 、K和p的产生, 作为pp碰撞中UE活动的函数, 中心质量能量为 $\sqrt{s} = 13$ TeV。使用事件中主要带电粒子定义的事件拓扑来检查UE, 该主要带电粒子被定义为事件中在 $5 \leq p_T^{\text{leading}} < 40$ GeV/c 范围内具有最高横向动量的带电粒子, 并在 $|\eta| < 0.8$ 的伪快速度区间内重建。较低的 p_T^{leading} 阈值对应于横向区域 (与主要粒子方向垂直的区域) 中UE平台的开始 [14–17]。在平台区域, 例如平均带电粒子密度 $\langle N_{\text{ch}} \rangle$ 和平均横向动量 $\langle \Sigma p_T \rangle$ 等量, 对主要粒子或喷射的 p_T 依赖性很小。这项研究使用 p_T^{leading} 的较低阈值 5 GeV/c, 以确保对UE有贡献的多次软散射基本上与 p_T^{leading} 独立。在 [18] 中, 报道了UE平台的缓慢上升。这可以通过与硬散射相关联的广角辐射的额外贡献来解释。由于宽角污染对于 $p_T > 50$ GeV/c 的喷流变得显著 [18], 采用了 p_T^{leading} 的上限 40 GeV/c 来减少其影响。

为了研究与不同基本物理机制相关的粒子产生, 采用了传统的将方位角 (ϕ) 平面划分为相对于领先粒子方向的区域的方法 [19] (见图 1)。本文报告的可观测量在三个不同的拓扑区域中测量: 朝向、横向和远离区域。这些区域是根据领先粒子和关联粒子之间的方位角差的绝对值 $|\Delta\phi| = |\phi^{\text{leading}} - \phi|$ 来定义的。关联粒子在运动学范围内 $0.15 \leq p_T < 5$ GeV/c 和 $|\eta| < 0.8$ 中被测量。朝向、横向和远离区域分别由 $|\Delta\phi| < 60^\circ$ 、 $60^\circ \leq |\Delta\phi| < 120^\circ$ 和 $|\Delta\phi| \geq 120^\circ$ 定义。朝向和远离区域中的粒子产生分别包含了领先和远离侧喷流的组分, 横向区域主要对多部分子相互作用和初态及末态辐射敏感。

UE活动使用相对横向活动分类器 R_T [10] 进行量化, 其定义为 $N_T / \langle N_T \rangle$, 其中 N_T 是每个事件在横向区域中测量的带电粒子多重性, $\langle N_T \rangle$ 是所有分析事件的平均值。按照构造, R_T 能够清晰地将UE活动 “高于平均水平” 的事件与 “低于平均水平” 的事件分开, 而不管质心能量如何。特别令人感兴趣的是, 是否具有非常低的UE活动的事件 (这些事件由喷流活动主导) 表现出与调整到 e^+e^- 数据的碎片化模型一致的粒子比率和光谱, 以及具有高UE活动的事件是否表现出流动或其他集体效应的任何明显迹象 [10]。最后, 值得一提的是, 这项研究与使用横向球形度进行的测量是互补的, 在后者中研究了喷流状和各向同性拓扑的全局事件性质 [20][21]。

本文的结构如下: 在第 2 节中, 描述了数据分析, 第 3 节讨论了系统不确定性, 第 4 节呈现了结果。最后, 在第 5 节中, 给出了结论。

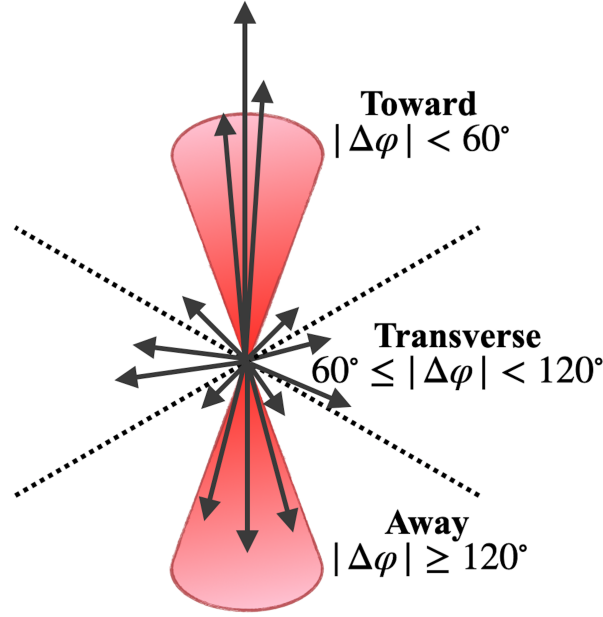


图 1: 在方位角平面上, 相对于领先粒子方向的朝向、横向和远离区域的示意图。领先粒子用最长的垂直箭头表示。UE 用垂直于领先粒子的小箭头表示。红色圆锥代表喷流和远离侧喷流。

2 Analysis procedure

2.1 Event and track selection

这项研究使用了ALICE合作组在LHC运行期间从2016年到2018年在 $\sqrt{s} = 13$ TeV质子-质子碰撞中收集的数据进行。关于ALICE设备及其性能的详细描述可以在文献 [22, 23] 中找到。本分析中使用的子探测器包括V0 [24]、内径迹系统 (ITS) [25]、时间投影室 (TPC) [26] 和飞行时间探测器 (TOF) [27]。这些子探测器位于 $B = 0.5$ T 的螺线管磁场内部。V0探测器由两个各含32个闪烁体的阵列组成, 覆盖前向(V0A, $2.8 < \eta < 5.1$) 和后向(V0C, $-3.7 < \eta < -1.7$) 伪快度区域。ITS是最内部的桶形探测器。它由六个高分辨率硅跟踪探测器的圆柱层组成: 最内两层的硅像素探测器 (SPD) 提供数字读数, 并且还用作触发探测器。硅漂移探测器 (SDD) 和硅条探测器 (SSD) 构成了ITS的四个外层。它们共同提供了电荷信号的幅度, 这用于通过测量特定能量损失(dE/dx)来进行粒子鉴别。TPC是跟踪和粒子鉴别主要探测器。它是一个大型圆柱形漂移探测器, 直径和长度约为5 m, 覆盖了 $|\eta| < 0.8$ 的伪快度范围, 并具有全方位覆盖。粒子识别是通过测量 dE/dx 来完成的。在质子-质子碰撞中, dE/dx 的分辨率约为5%。飞行时间探测器 (TOF) 是一个大面积的多间隙阻性板室 (MRPC) 阵列, 它围绕着相互作用点, 并在 $|\eta| < 0.9$ 的伪快度区域以及全方位覆盖。飞行时间被测量为粒子到达时间与事件碰撞时间之差。

本研究的事件选择遵循之前研究中使用的标准, 以测量作为带电粒子多重性函数的 π 、K和p的产生 [3, 28]。最小偏见触发器需要在两个V0A和V0C闪烁体中同时有信号, 与从两个方向到达的质子束同时到达。主顶点位置通过使用全局轨迹 (使用ITS和TPC信息重建) 来重建。对于轨迹太少而无法计算顶点位置的事件, 使用SPD轨迹对 (仅使用SPD信息重建) 的主顶点代替。要求事件在 $|z| < 10$ cm范围内的z轴 (与光束轴平行) 上有顶点位置, 其中 $z = 0$ 对应于探测器的中心。通过使用两个V0子探测器的定时信息, 离线拒绝了束团外的对撞堆积事件。此外, 还拒绝了重建出多个相互作用顶点的事件。最后, 要求事件有一个领先粒子, 其 $5 \leq p_T^{\text{leading}} < 40$ GeV/c。经过事件和顶点选

择后，总事件数约为8.27亿，而分析的带有领先粒子的事件数约为810万。本研究中给出的分布对应于初级带电粒子，这些粒子的平均固有寿命 τ 大于1 cm/c，它们要么是在相互作用中直接产生，要么是从 τ 小于1 cm/c的粒子衰变产生的，排除了与材料相互作用产生的粒子 [29]。初级带电粒子使用ITS和TPC探测器重建，这些探测器提供了轨道横向动量和方位角的测量。特别地，要求轨迹穿过至少70 TPC垫行。还要求在ITS中有至少两次击中，其中至少一次是在SPD层中。对于ITS和TPC轨迹点的拟合质量必须满足 $\chi^2_{ITS}/N_{\text{hits}} < 36$ 和 $\chi^2_{TPC}/N_{\text{clusters}} < 4$ ，其中 N_{hits} 和 N_{clusters} 分别是与轨迹关联的ITS中的击中数和TPC中的簇群数。最后，还要求轨迹的横向动量大于0.15 GeV/c，并在 $|\eta| < 0.8$ 范围内重建。为了限制来自次级粒子的污染，对重建顶点在与束流轴平行的方向(z)上的最近接近距离(DCA)应用了 $|DCA_z| < 2$ cm的选择。此外，还对选定轨迹的DCA在横向平面(DCA_{xy})上进行了与 p_T 相关的选择。此外，与弱衰变 kaons (“kinks”) 的衰变产物相关的轨迹被拒绝。在ALICE中，使用上述选择标准重建的轨迹集合通常被称为“全局轨迹”。使用全局轨迹导致了作为方位角和伪快度函数的效率显著不均匀。为了获得高且均匀的跟踪效率以及良好的动量分辨率，使用了“混合轨迹” [30, 31]。混合轨迹对应于用互补标准选择的两组不同轨迹的并集：(i) 至少在一个内层的 ITS中重建出一个空间点的轨迹（全局轨迹）和 (ii) 在 SPD中没有关联的击中的轨迹，对于这些轨迹，在轨迹拟合中使用重建的初级顶点的位置。混合轨迹用于选择主导粒子，以及测量 N_T 和 p_T 谱。此外，为了选择高质量的高- p_T 轨迹，基于几何轨迹长度 (L) 的选择标准被应用 [32]。这个选择标准排除了来自 TPC扇区边界读出垫的信息（距离扇区边缘约 3 cm）。

2.2 Particle identification

ALICE的跟踪和粒子识别(PID)能力允许测量 π 、K和p在广泛横动量范围内的横动量谱。在这项研究中， p_T 谱在 $p_T < p_T^{\text{leading}}$ 区间内被测量，使用了标准的粒子识别技术，这些技术已在之前的ALICE出版物 [3, 28, 33–35]中报告。表 1显示了用于PID的三种技术以及每种方法覆盖的 p_T 区间。

表 1: 分析技术的名称以及识别 π 、K和p的横动量范围。

Analysis	p_T ranges (GeV/c)		
	π	K	p
TPC	0.25 – 0.7	0.3 – 0.6	0.45 – 1.0
TOF	0.7 – 3.0	0.6 – 3.0	1.0 – 3.0
rTPC	2.0 – 5.0	3.0 – 5.0	3.0 – 5.0

在低 p_T 下，平均能量损失 $\langle dE/dx \rangle$ 与 $1/(\beta\gamma)^2$ 成正比，且较大的 π –K 和 p–K 分辨能力使得在此区域可以基于单个轨迹进行粒子识别 [28]。因此，在 TPC分析中，通过拟合横动量窄区间内的 n_σ 分布，得到了相对粒子丰度，这些丰度被定义为相对于所有测量的初级带电粒子的 π 、K和p的测量分数。对于每个轨迹， n_σ 定义为测量值与预期的 dE/dx 值之差，归一化到分辨率， $n_\sigma = (dE/dx_{\text{measured}} - \langle dE/dx_{\text{expected}} \rangle) / \sigma$ 。虽然 π 和 p 的信号可以用高斯参数化拟合，但 K 的信号使用两个高斯函数的和作为参数化，以考虑到电子的污染。

在 TOF分析中，通过拟合动量区间内测量的 β^1 分布，也以轨迹为单位测量了粒子丰度。在 $1 < p < 2$ GeV/c 区间内， π –K 和 p–K 的分辨能力足够大 [28]，以至于可以使用高斯参数化加上指数尾进行单次拟合来处理 π 、K和p的信号。从 $1 < p < 2$ GeV/c 的数据中提取单次拟合的参数 (μ , σ 和 ξ ，其中 μ 和 σ 分别代表高斯参数化的均值和标准差， ξ 代表指数尾部开始的 β 值)，并用于外推到更

¹ $\beta = L/c\Delta t$, 其中 L 是轨迹长度, Δt 是测量的飞行时间。

高的动量值。最后，使用外推的函数形式拟合 β 分布，同时使用三种贡献的总和来描述三种物种的信号。

在 rTPC 分析中，使用了在 [33–35] 中描述的方法。在 TPC 的相对论上升区域 ($3 \lesssim \beta\gamma \lesssim 1000$) 中， $\langle dE/dx \rangle$ 随 $\log(\beta\gamma)$ 增加，且用于粒子识别的 $\pi - K$ 和 $p - K$ 分辨能力几乎保持不变 [28]。了解这两个特征使得可以对 dE/dx 和动量之间的相关性进行二维拟合。为了实现这一点，第一步是参数化 Bethe-布洛赫曲线和分辨率曲线在相对论上升区域。Bethe-布洛赫参数化提供了 $\langle dE/dx \rangle$ 和 $\beta\gamma$ 之间的关系，参数化的分辨率给出了 $\sigma_{dE/dx}$ 和 $\langle dE/dx \rangle$ 之间的关系。对于参数化，使用了高纯度的已识别强子样本，即分别来自 $\Lambda(\bar{\Lambda})$ 和 K_S^0 衰变的 $p(\bar{p})$ 和 π^\pm ，以及来自 γ -转换的 e^\pm [33–35]。一旦 Bethe-Bloch 和分辨率曲线被参数化，它们将被用于执行二维拟合。二维拟合仅用于改善过渡到高原区域的 Bethe-Bloch 参数化。然后，通过使用四个高斯分布之和作为拟合函数来同时描述 π 、K、p 和 e 的信号，在动量区间内对 dE/dx 分布进行一维拟合，从而获得粒子比率，其中每个高斯分布的 μ 和 σ 基于通过上述程序获得的 $\langle dE/dx \rangle(\beta\gamma)$ 和 $\sigma_{dE/dx}(\langle dE/dx \rangle)$ 固定。

2.3 Corrections

π 、K 和 p 的 p_T 谱被修正了接受度和重建效率。使用 TOF 探测器测量的谱还修正了 TPC-TOF 匹配效率。接受度和效率是通过使用 PYTHIA8 Monte Carlo 事件生成器（使用 Monash 2013 调谐，以下简称 PYTHIA8 Monash）[36] 的模拟获得的。随后，使用 GEANT3 [37] 模拟粒子通过 ALICE 装置的传播。模拟事件使用与数据相同的算法进行重建。获得的接受度和重建效率与带电粒子的多重性无关。因此， R_T 积分值适用于所有 R_T 类别。由于 GEANT3 不能完全描述低动量 \bar{p} 和 K^- 与探测器材料的相互作用，因此通过 GEANT4 [38] 和 FLUKA [39] 分别为这两种粒子的效率估计了额外的修正因子。这些修正与在 [3] 中应用的相同。 p_T 谱中的 π 和 p 包含了来自材料相互作用和粒子衰减的大量次级粒子贡献（ π^\pm 来自 K_S^0 和 $p(\bar{p})$ 来自 Λ 和 Σ^+ ）。由于蒙特卡罗事件生成器中对奇异粒子的产生估计不足，因此采用了数据驱动的方法来估算非初级粒子的分数，这样可以从测量的谱中减去。这种修正的估计基于多模板拟合方法，用来描述测量的 DCA_{xy} 分布 [40]。实际上，使用了三个蒙特卡罗模板来代表初级粒子、弱衰变产生的次级粒子和材料相互作用产生的次级粒子的 DCA_{xy} 分布的预期形状。这些模板被用来拟合数据 DCA_{xy} 分布。拟合在 $|DCA_{xy}| \leq 3$ cm 和在 p_T 区间内进行。由于 TOF 分析仅使用与 TOF 探测器匹配的轨迹，因此这些修正被分别估计用于低和中等 p_T 区域。在 $p_T = 0.45$ GeV/c 时，发现来自非初级 π^+ (p) 的贡献约为 4%(20%)，而在 $p_T = 2.0$ GeV/c 时，它减少到约 1%(4%)。此外，这种修正随着 p_T 的增加而渐近减小。因此，对 TOF 的修正被外推到更高的 p_T 并然后应用。

2.4 Unfolding the charged-particle multiplicity distributions

在横向区域的带电粒子多重性， N_T ，被用来表征事件的活动性。然而，探测器的有限接受度和有限分辨率会导致测量的带电粒子多重性分布 $Y(N_{T,m})$ 出现模糊。本节介绍了一维展开方法，以校正这些探测器效应和效率损失。采用的方法基于 G. D’Agostini [41] 提出的迭代贝叶斯展开方法。贝叶斯展开需要了解模糊矩阵 $S_{m,i}$ ，它包含了关于有限接受度和有限分辨率的信息。它表示真实多重性为 $N_{T,i}$ 的事件被测量为多重性为 $N_{T,m}$ 的事件的条件概率 $P(N_{T,m}|N_{T,i})$ 。图 2（左）显示了使用 PYTHIA8 Monash 模拟事件得到的模糊矩阵。模糊矩阵对角线上的值代表测量事件以真实粒子数目重建的概率。同时，非对角元素给出了由于探测器效率不足和背景（例如，次级粒子被误识别为初级粒子）而导致较少或多粒子被重建的概率。

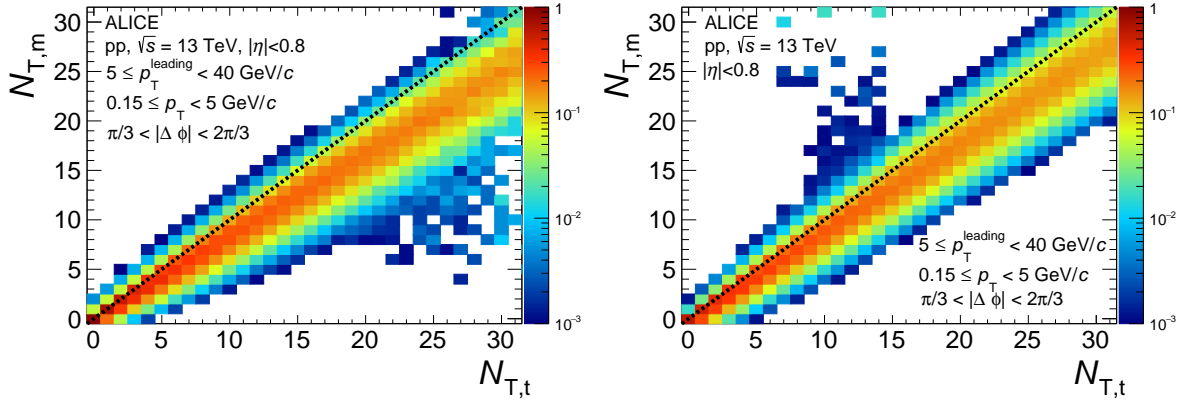


图 2: (左) 真实 $N_{T,t}$ 与测量 $N_{T,m}$ 在横向区域的关联性。(右) 展开矩阵 $M_{1_{tm}}$ 。展开矩阵的迭代步骤对应于第三次。

一维展开分布 $Y(N_{T,t})$ 可以表示为展开矩阵 $M_{1_{tm}}$ 的元素（见图 2 的右侧面板）与测量分布之间的线性组合。

$$Y(N_{T,t}) = \sum_m M_{1_{tm}} Y(N_{T,m}) \quad , \text{ where } M_{1_{tm}} = \frac{P(N_{T,m}|N_{T,t}) P_0(N_{T,m})}{\sum_t P(N_{T,m}|N_{T,t}) P_0(N_{T,m})} . \quad (1)$$

$P_0(N_{T,m})$ 表示先验概率分布。在展开过程开始时，它可以是任何任意分布。这里，使用测量到的多重性分布作为先验分布。一个更新的先验分布，

$$\hat{P}(N_{T,t}) = \frac{Y(N_{T,t})}{\sum_{N_{T,t}} Y(N_{T,t})} , \quad (2)$$

从第二次迭代开始获得。因此，随着先验分布的更新，展开矩阵得到改进。最后，使用更新的 $M_{1_{tm}}$ 和Eq. 1可以获得更接近真实分布的新展开分布。图2左侧的模糊显示在 $7 < N_{T,t} < 15$ 和 $15 < N_{T,m} < 30$ 之间主要相关带下方非常少的事件。这一小部分来自于响应矩阵的统计波动。由于展开矩阵 $M_{1_{tm}}$ 与 $P(N_{T,m}|N_{T,t})$ 成比例，这些事件在 $M_{1_{tm}}$ 中出现在区间 $22 < N_{T,t} < 30$ 和 $7 < N_{T,m} < 17$ 中，如图2右侧所示。然而，鉴于它们的贡献非常小，它们并没有影响展开过程。

这种迭代过程最终使展开分布收敛到真实分布。然而，它也加剧了模糊矩阵中统计不确定性的影响。因此，更多的迭代次数并不能保证更好的结果：最终，真实分布可能会被统计波动所污染 [42]。为了决定何时停止迭代，计算了蒙特卡罗生成样本的展开分布与真实分布之间的 χ^2/N_{df} 与迭代次数的函数关系。 χ^2/N_{df} 的最小值指示了何时停止迭代过程。这项研究发现，最佳迭代次数是三次。

2.5 Unfolding the p_T spectra

展开横动量谱作为多重性的函数，在不同的拓扑区域中处理方式不同。朝向和远离区域是直接的情况，因为用于谱的轨迹与用于多重性计算的轨迹之间没有重叠，因为后者是在横区域测量的。因此，一维展开矩阵 $M_{1_{tm}}$ 可以直接应用于这两个区域。这也使得很容易看到，相同的展开矩阵可以用于所有已识别粒子谱。因此，完全校正的 p_T 谱作为 $N_{T,t}$ 的函数是通过两步程序获得的：

1. 对粒子层面的原始 p_T 谱进行修正，以解决跟踪效率不足和二次粒子污染的问题。这里应用的效率修正仅影响事件分类的一维展开。

2. 应用一维展开矩阵。作为 $N_{T,t}$ 函数的光谱由以下公式给出： $\frac{dY(N_{T,t})}{dp_T} = \sum_m M1_{tm} \frac{dY(N_{T,m})}{dp_T}$

横向区域需要一个更复杂的方法，因为横动量谱和多重性是使用相同的轨迹测量的。换句话说，问题不再是重新排列事件，而是轨迹应该如何解混以匹配真实的横动量分布。这提出了一个涉及多个维度的问题，其中两个维度与真实和测量的多重性相关联，另外两个维度（真实和测量的产额）与每个横动量区间相关联。与其进行完整的多维展开，不如采用一种近似方法，在这种方法中，假设多重性展宽矩阵与横动量无关。这是一个非常好的近似，因为对于此处使用的轨迹选择和横动量范围，效率基本上在横动量上是平坦的。采用这种方法，通过将原始多重性响应矩阵的每一列与其相应的测量粒子数作为权重相乘，可以得到一个新的响应矩阵。进行行归一化后，就可以得到所需的轨迹展宽矩阵。

使用这个修改后的响应矩阵，在横动量区间中逐区间进行展开。对于特定的横动量区间，使用第2.4节中描述的迭代展开程序对测量的多重性分布进行展开。这种方法得到的展开矩阵取决于横动量。因此，这些矩阵将被称为 $M2_{tm}(p_T)$ 。应该强调的是，这种方法之所以在这里有效，是因为对于混合轨迹而言，跟踪效率并不强烈依赖于横动量，并且用于获取 N_T 测量的轨迹与用于获得谱的轨迹相同。

类似于朝向和远离区域，采用两步程序来获得完全校正的横动量谱。唯一的区别在于在横向区域中使用了依赖于横动量的 $M2_{tm}(p_T)$ 矩阵。

$$\frac{dY(N_{T,t}, p_T)}{dp_T} = \sum_m M2_{tm}(p_T) \frac{dY(N_{T,m}, p_T)}{dp_T}. \quad (3)$$

上述描述的方法展开了所有带电粒子的能谱，并得到了展开矩阵 $M1_{tm}$ 和 $M2_{tm}(p_T)$ 。当展开已识别粒子的能谱（例如，在横向区域的 π ）时，使用来自带电粒子的 $M2_{tm}(p_T)$ 矩阵应用Eq. 3，然后将 $dY(N_{T,m}, p_T)/dp_T$ 替换为 $dY^\pi(N_{T,m}, p_T)/dp_T$ 。在朝向和远离区域的 π 能谱展开是用相同策略进行的，但使用 $M1_{tm}$ 代替。

3 Systematic uncertainties

本节描述了系统不确定性估计的过程。 p_T 谱的系统不确定性被分为两大类： R_T 依赖的和 R_T 独立的不确定性。 p_T 谱的总系统不确定性是所有个别不确定性来源的平方和的和。

R_T 依赖的系统不确定性

在 Sec. 2.4 中描述的展开方法显示出一些缺陷，主要是在展开低多重性时在横向区域。为了考虑到这些缺陷，考虑了以下对 N_T 分布的系统不确定性贡献：

- 蒙特卡罗（MC）非闭合：PYTHIA8 Monash 是生成多重性响应矩阵和带与不带探测器效率损失的 N_T 分布的默认调整。通过比较模拟的展开 N_T 谱与生成的谱，可以发现任何生成与展开分布之间的统计显著差异，这种差异被称为 MC 非闭合，并以二次方形式添加到总系统不确定性中。在展开过程中，随着迭代次数的增加，MC 闭合性得到改善，最佳迭代次数为三次，这导致 MC 非闭合可忽略不计。
- 对蒙特卡洛模型选择的依赖性：使用EPOS LHC [43]生成不同的多重性响应矩阵。该响应矩阵用于展开 N_T 和 p_T 谱。量化了使用PYTHIA8 Monash和EPOS LHC的最终展开分布之间的比率，

并将其加到总系统不确定性中。在 $0 < N_T < 18$ 区间内，相对系统不确定性低于 2%，在 $N_T \approx 18$ 时增加到约 4%。由于响应矩阵的统计限制，为 $N_T \geq 18$ 指定了一个常数 4% 相对系统不确定性。

- 轨道选择：这种不确定性通过改变相对于标称轨道选择标准的轨道选择标准来量化。特别是，TPC 中穿过行的最小数目被设定为 60 和 100（标称值为 70）。在 ITS 和 TPC 中，轨道拟合质量由 χ^2_{ITS}/N_{hits} 和 χ^2_{TPC}/L 变化，这些值不应超过 25 和 49（标称值为 36），以及 3 和 5（标称值为 4），分别。沿光束轴线到顶点的最接近距离 (DCA_z) 的最大值被设定为 1 和 5 cm（标称值为 2 cm）。此外，用于选择领先粒子的几何长度切割参数也会有所变化。对于特定参数变化，量化了相对于标称值，使用更紧和更松选择的结果之间的最大差异。来自轨道变化的总系统不确定性被给出为不同参数变化的二次方和的平方根。相对系统不确定性平均为 1% 在 $0 < N_T < 18$ 区间内，并且随着 N_T 值的增加而增加。对于 $N_T \geq 18$ ，统计波动变得显著。因此，分配了一个恒定的 2% 相对系统不确定性。

R_T -独立的系统不确定性

R_T -独立的系统不确定性被分为两类。第一类包括不同分析共有的不确定性，例如由于轨道质量标准 and p_T -依赖的 ITS-TPC 匹配效率导致的不确定性。通过将 ITS 纯轨迹与相应的 ITS+TPC 轨迹（在相同的相空间区域内）进行匹配，并通过比较数据和蒙特卡罗模拟中的匹配效率来得到 ITS-TPC 匹配效率。第二类是将特定于分析的不确定性分组。它包括对次级粒子污染校正估计的不确定性、信号提取技术以及 TPC-TOF 匹配效率的不确定性。

正如在第 2.3 节中所描述的，次级粒子污染校正基于对横向动量区间内的 DCA_{xy} 分布进行多模板拟合。系统不确定性估计遵循 [28] 中描述的程序。具体来说，拟合范围从标称值 ± 3 cm 改为 ± 1.5 cm。

为了估计归因于 TPC 分析中信号提取技术可能的系统效应，应用了与 [28] 中描述的类似程序。信号提取技术从拟合 n_σ 分布改为在 $\pm 3\sigma$ 范围内进行 bin 计数。粒子分数的系统不确定性被给出为标称粒子分数和通过 bin 计数得到的粒子分数之间的差异。如第 2.2 节所述，TOF 分析中粒子比例的测量基于动量区间内 β 分布的拟合。因此，系统不确定性主要由 π 、K 和 p 的 μ , σ 和 ξ 曲线参数化中的不确定性驱动。计算了拟合曲线与实际测量的 μ , σ 和 ξ 值之间的相对差异，以评估参数化的影响。因此，通过在不确定性范围内随机变化受约束的参数 μ , σ 和 ξ ，并重新拟合 β 分布，得到了粒子比例提取的系统不确定性。重新拟合进行了 1000 次，粒子比例的系统不确定性作为横向动量的函数，被给出为相关分布的标准差。这种方法的动机来自于在 [28, 33, 35] 中开发的工作。

在 rTPC 分析中，粒子比例提取的系统不确定性的测量遵循 [28, 33, 35] 中的方法。在此分析中，系统不确定性的主要来源来自于探测器响应的不精确描述，即 Bethe-Bloch 和分辨率参数化。为了估计系统效应，测量了参数化与实际 $\langle dE/dx \rangle$ 和 $\sigma_{dE/dx}$ 值之间的相对差异。通过一个拟合过程中允许受约束的参数 $\langle dE/dx \rangle$ 和 $\sigma_{dE/dx}$ 在参数化不确定性的范围内随机变化的拟合程序，测量了粒子比例。该拟合程序重复了 1000 次，粒子比例的系统不确定性被给出为相关分布的标准差。在计算 p_T -differential 粒子比率时，除了归因于信号提取和反馈的不确定性外，所有的系统不确定性在比率中相互抵消。在高 p_T 区域（rTPC 分析），使用 [33] 中描述的程序直接从 dE/dx 分布的拟合中提取 K/ π 和 p/ π 比率的信号提取系统不确定性。

表 2 列出了横侧区域的光谱和粒子比率在不同 p_T 值下的系统不确定性总结。表格分为通用和特定分析的不确定性。朝向和远离区域的值与横侧区域的值相同。唯一依赖于拓扑区域的不确定性是归因

于蒙特卡罗非闭合的不确定性。

表 2: π 、K 和 p p_T 谱的系统不确定性总结。不确定性在不同的代表性 p_T 值上显示。最后两行显示了 p_T 谱和 p_T -微分粒子比率的总系统不确定性。这些值对应于 $0 \leq R_T < 0.5$ 类别中横侧区域的谱。

Common source	Uncertainty (%)								
	π			K			p		
p_T (GeV/c)	0.3	2	5	0.3	2	5	0.45	2	5
ITS-TPC matching efficiency	1.4	2.6	2.9	1.4	2.6	2.9	1.4	2.6	2.9
MC non-closure		3.2			3.6			1.5	
MC dependence	1	1.5	1.7	0.9	1.5	1.7	0.9	1.5	2
Track selection		1			1			1	
Analysis-specific	π			K			p		
TPC, p_T (GeV/c)	0.3		0.7	0.3		0.6	0.45		1
PID	0.1		1.8	7.3		5.9	0.1		3.4
Feed-Down	1		0.3	-		-	10		1.1
TOF, p_T (GeV/c)	1		2	1		2	1		2
PID	negl.		1	0.3		3.4	0.2		0.7
Feed-Down	0.3		negl.	-		-	1		0.2
TOF matching efficiency	3		3	6		6	4		4
rTPC, p_T (GeV/c)	3		5	3		5	3		5
PID	0.7		0.6	6.4		2.8	5.8		4.2
Feed-Down	negl.		negl.	-		-	0.2		0.2
Total	π			K			p		
p_T (GeV/c)	0.3	2	5	0.3	2	5	0.45	2	5
Total	3.9	5.5	4.7	8.3	8.3	5.7	10.2	5.3	5.7
Particle ratios	K/ π						p/ π		
p_T (GeV/c)				0.3	2	5	0.45	2	5
Total				7.4	4.1	3.2	10.1	1.5	4

4 Results

本节展示了 π 、K和p的产生结果，这些结果以相对横向活跃度分类器 R_T 的函数形式给出。数据与PYTHIA8 Monash [36]、带有绳子强子化模型的PYTHIA8（标示为PYTHIA8 ropes）[44]、HERWIG7 [45, 46]和EPOS LHC [43]的预测进行了比较。带有Monash调整的PYTHIA8是LHC能量下对于大多数可观测量最流行的事件生成器之一，但它缺乏在小碰撞系统中观察到的类QGP效应，如奇异性增强，而其他三个模型已知能更好地描述小碰撞系统中的奇异性增强 [8, 44, 47]。因此，这些模型允许测试广泛的可能动态效应。在PYTHIA8 Monash中，软包容粒子的产生基于多次微扰部分子-部分子相互作用(MPI) [11]。该模型还包括一种颜色重连机制(CR) [48]，允许每个MPI系统的部分子与高- p_T MPI系统颜色相连。特别是，PYTHIA8 Monash通过引入颜色重连机制来描述中间 p_T 的增强质子-介子，而不需要假设介质的形成 [49]。PYTHIA8 ropes模型允许弦在一个高弦密度的环境中融合，形成“颜色绳”。因此，颜色绳预计会产生更多的奇异强子和重子，后者通过绳子到弦接点的概率塌缩产生。EPOS LHC是一个核心-日冕模型，它假设在pp碰撞中的高密度核心区域形成了QGP介质。日冕的强子化基于弦碎裂，而与核心相关的粒子则通过热产生（大正则热描述）产生。在EPOS LHC中，低多重性事件中的粒子产生主要由弦碎裂主导。相比之下，高多重性事件以核心为主导，并预期会产生大量奇异强子和重子。HERWIG7中的粒子产生基于簇强子化，并且它有自己独特的颜色重连机制，该机制允许以几何方式产生重子簇。该模型还包括一个非微扰胶子分裂机制，以创建更多的 $s\bar{s}$ 对来解释奇异性的增强 [50]。

p_T 谱作为 R_T 的函数，已归一化到每个 R_T 类中的总事件数。表 3给出了 R_T 区间和 N_T 类之间的关系。使用展开的 N_T 分布构建 R_T 分布，其中 $\langle N_T \rangle$ 等于 7.366 ± 0.002 （统计误差）。对于每个 R_T 区间， N_T 列下的区间是包含性的，这意味着对于 $0 \leq R_T < 0.5$ ， N_T 等于0、1、2或3。

表 3: R_T 区间与 N_T 类别的关系。

$R_T = N_T / \langle N_T \rangle$	N_T	Number of events
0–0.5	0–3	2613151
0.5–1.5	4–11	4055410
1.5–2.5	12–18	1302116
2.5–5	19–30	180652
0–5	0–30	8151331

图 3 展示了在横向区域中，所有具有前导粒子的事件的 N_T 和 R_T 概率分布的展开，以及不同模型的预测。对于每个模型， $\langle N_T \rangle$ 对应于相应的 N_T 谱的平均值。观察发现，PYTHIA8 Monash 和 PYTHIA8 ropes 在描述 N_T 分布方面给出了最好的定性描述，而 EPOS LHC (HERWIG7) 对于 $N_T > 10$ 的数据高估（低估）。然而，当计算 R_T 时，所有模型在 $R_T \gtrsim 2$ 时都低估了数据。这是因为模型对低- N_T 区域的描述较差，因此它们预测的 $\langle N_T \rangle$ 值比测量的值大。最后， R_T 概率分布与先前的 ALICE 结果 [14] 进行了比较，该结果使用了有限的数据样本，并在 R_T 分布层面应用了展开，而在当前分析中， R_T 谱是从 N_T 分布导出的。新结果与之前的 ALICE 测量在 1.5% 以内一致。

图 ?? 显示了 π 、K 和 p 的横向动量分布作为 R_T 的函数。左、中、右面板分别展示了朝向、远离和横向区域的结果。下方面板展示了 R_T 依赖的 p_T 谱与 R_T 积分的 p_T 谱之间的比率。与 R_T 无关的系统不确定性在比率中相互抵消。与 R_T 相关的系统不确定性是相关的，只部分抵消。从与 R_T 积分的谱的比率中可以看出，在低横向动量下，朝向和远离区域具有相似的特征：随着 R_T 增加，低- p_T 粒子的数量减少。此外，这种效应遵循质量排序，对较重的粒子影响更大。这种行为让人想起径向流效应，在这种效

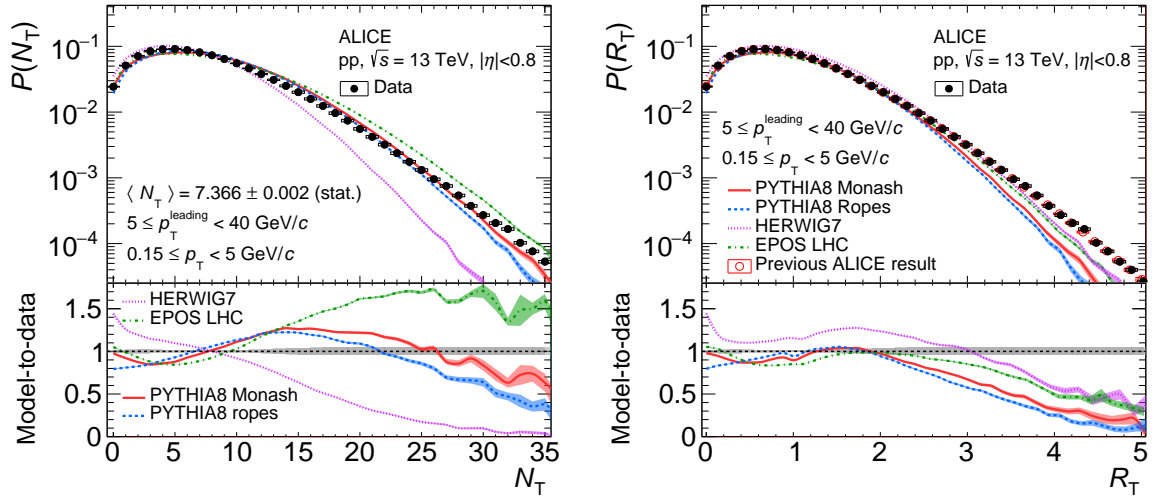


图 3: N_T (左) 和 R_T (右) 在领先粒子事件中横侧区域的概率分布。数据用实心黑点标记表示，统计和系统不确定性分别用误差线和框表示。模型预测用彩色线表示，模型预测周围的带仅表示统计不确定性。底部面板显示模型与数据的比率。底部面板中以一为中心的灰色带代表数据的系统不确定性。

应中，低- p_T 粒子的减少被中间 p_T 粒子数量的增加所补偿。在朝向和远离区域，粒子产生主要由指向和远离侧面的喷射碎片化成高- p_T 粒子主导。这可以在 $0 \leq R_T < 0.5$ 的谱与 R_T 积分的谱之间的比率中观察到（图??的底部面板），该比率随着 p_T 增加而增加（在 $p_T \gtrsim 2$ GeV/c 区间），并且对于 π 介子来说这种效应更加明显。对于高 R_T 下的光谱形状，观察到相反的现象：对于 $p_T \gtrsim 2$ GeV/c，随着 R_T 增加，它们变得更柔和。这可以解释为随着 UE 活动的增加，喷射的“稀释”。当 $R_T \rightarrow \infty$ 时，来自 UE 的粒子多重性在朝向区域中高于来自喷射的粒子多重性。因此，在高 R_T 时，朝向区域中 π 介子和 K 介子的平均量如 $\langle p_T \rangle$ 减小（见图 10）。质子的 $\langle p_T \rangle$ 随着 R_T 的增加而增加，因为这里其他效应如径向流更为相关。这也可以在与 R_T 积分谱的比率中看到，对于具有高 UE 活动的事件，它们随着 p_T 的增加而减少。在横侧区域中，所有物种的谱形状有一个共同特征：随着 UE 活动的增加，它们变得更加硬朗。这种效应可以归因于随着多重性增加而发生的喷射硬化。

图 7 显示了 p_T 谱的模型与数据比率。比率分为两种类型的事件：低 UE 活动度 ($0 \leq R_T < 0.5$) 和高 UE 活动度 ($2.5 \leq R_T < 5$)。观察发现，对于低 UE 活动度的事件，模型可以定性地描述朝向和远离区域中 $p_T > 2$ GeV/c 的 pion 和 kaon 谱。这是预期的，因为对于较小的 R_T 值，主要观察到的是喷射流碎片化产物，而模型是根据 e^+e^- 数据调整的，这些数据具有喷射特征。对于相同的 R_T 区间，模型在横侧区域预测了不同的产额。然而，对于 $p_T \gtrsim 1$ GeV/c，所有模型都低估了数据。此外，增加 UE 活动度会使数据与模型之间的吻合程度降低。

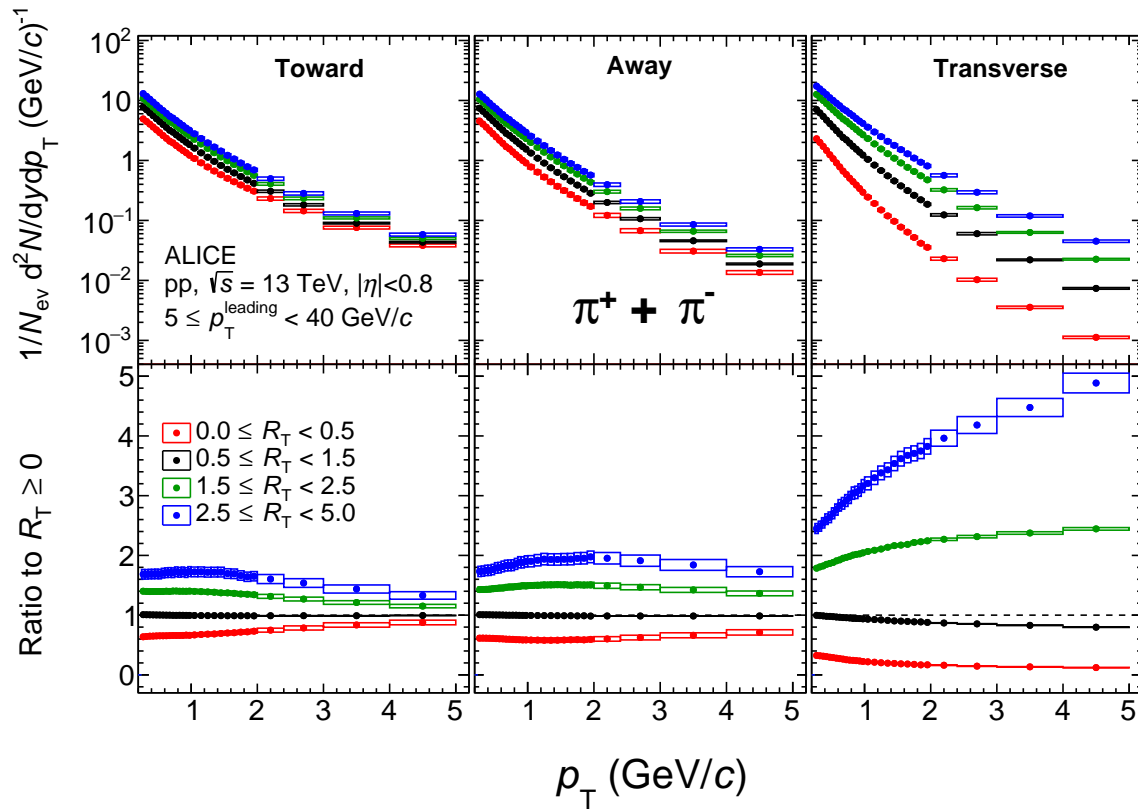


图 4: 横动量谱 (上图) 与 R_T 的函数关系, 以及与 R_T 积分谱的比值 (下图)。从左到右依次显示了 toward、away 和 transverse 区域。统计和系统不确定性分别用条形和框表示。

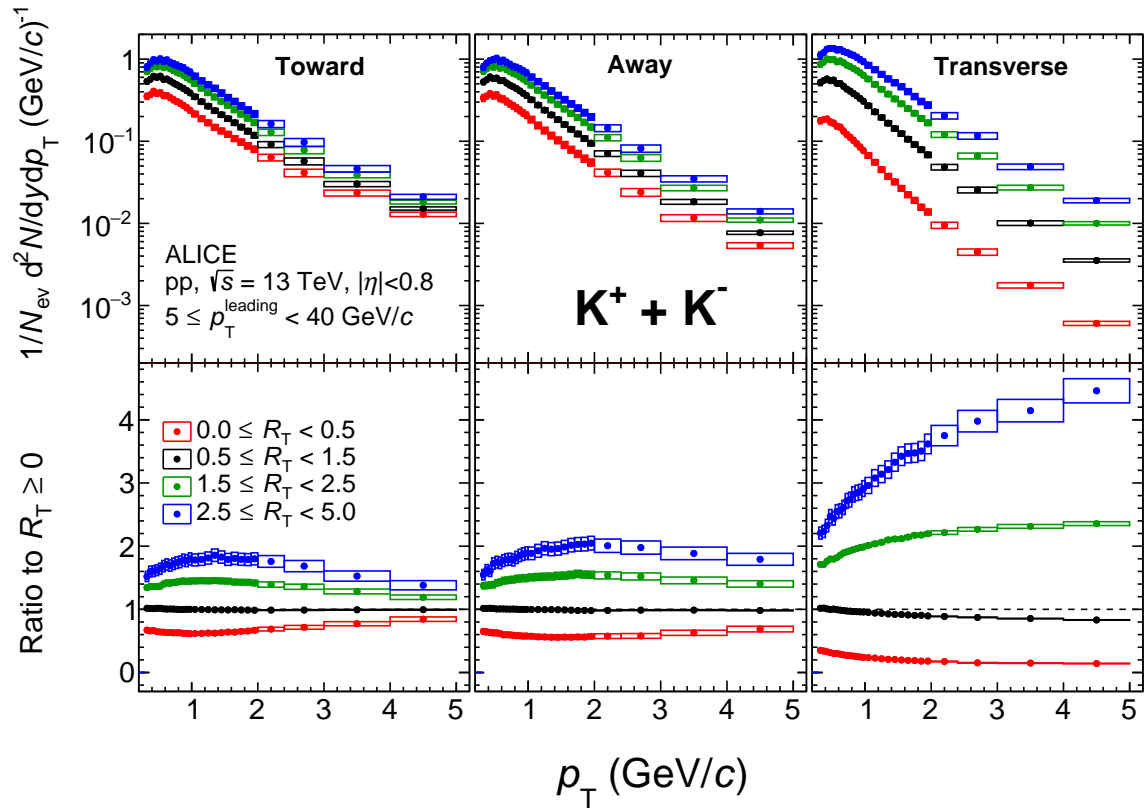


图 5: 介子的横向动量谱（上图）作为 R_T 的函数，以及与 R_T 积分谱的比率（下图）。从左到右依次展示朝向、远离和横向区域。统计和系统不确定性分别用条形和框表示。

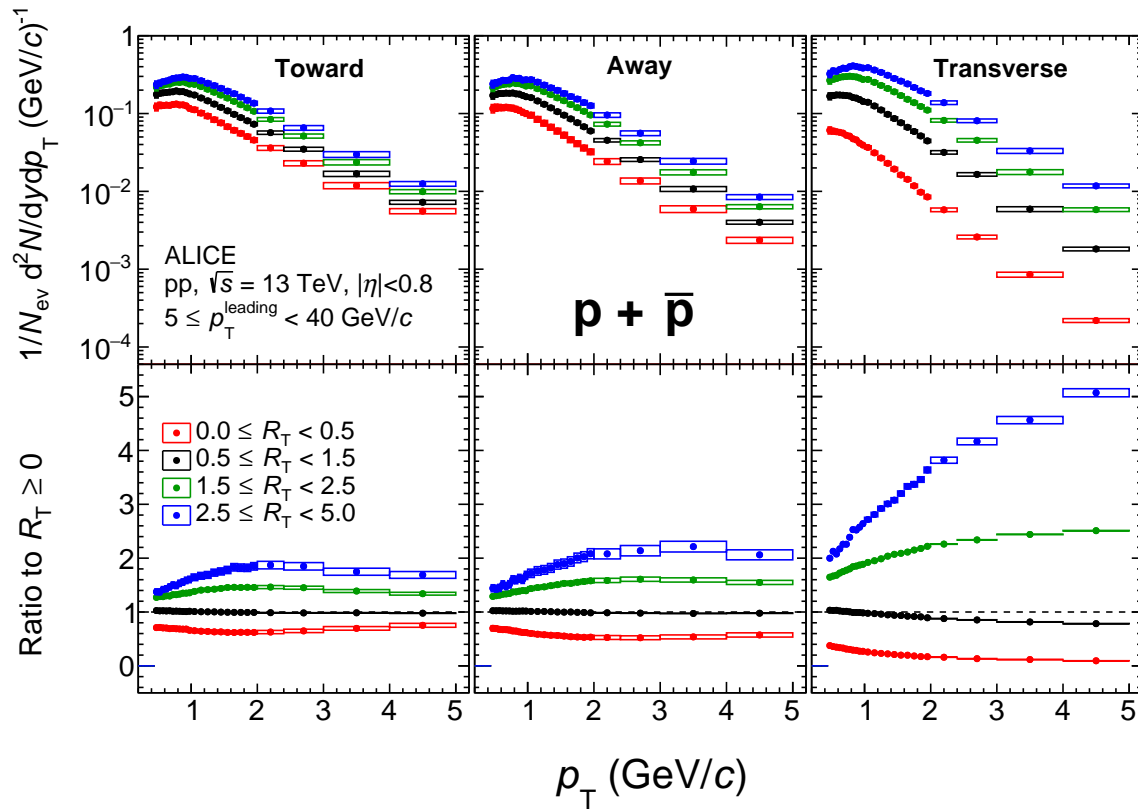


图 6: 横动量谱 (上图) 作为 R_T 函数的质子以及相对于 R_T 积分谱的比值 (下图)。从左到右依次展示的是朝向、远离和横向区域。统计和系统不确定性分别用条形和盒子表示。

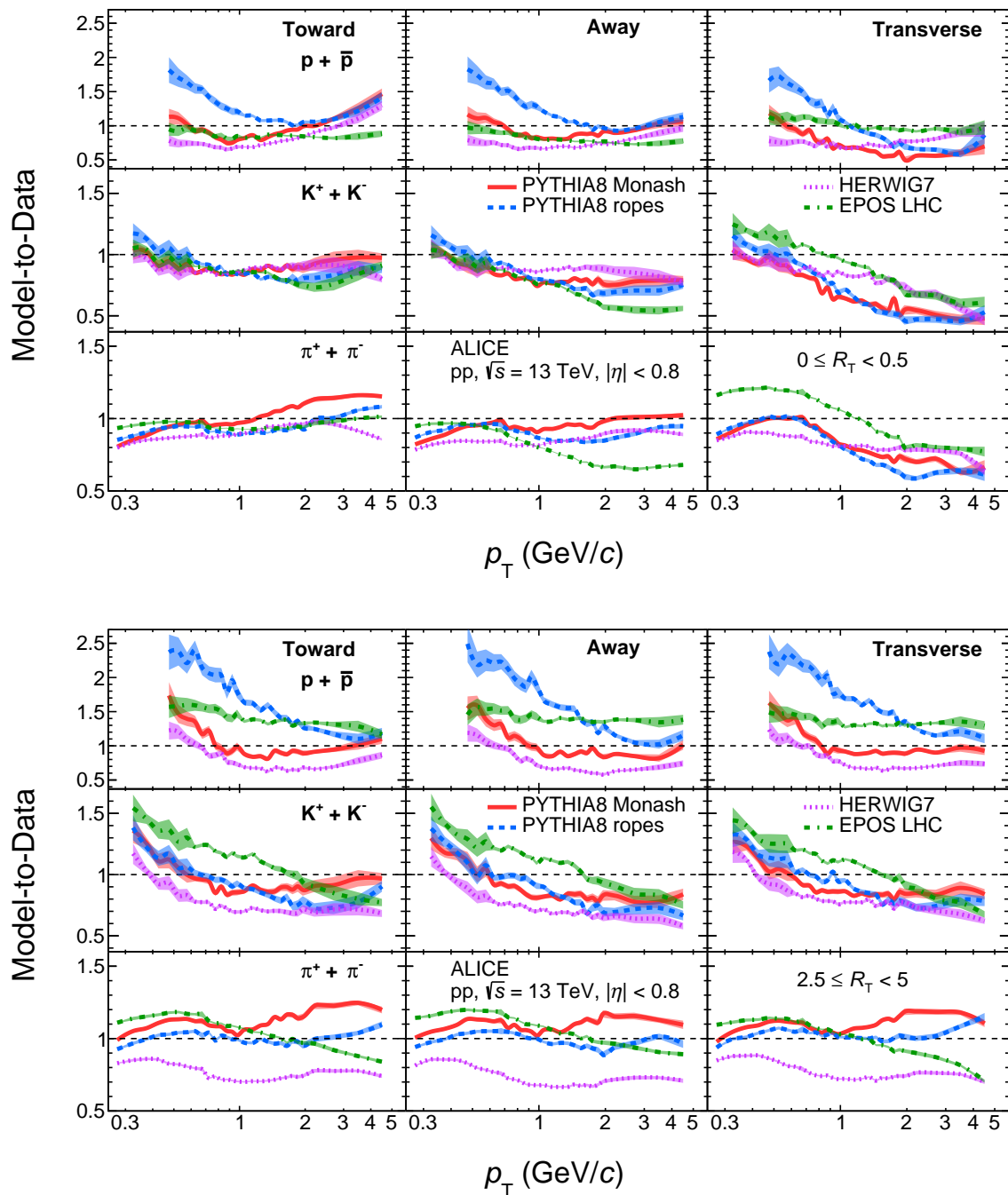


图 7: 横动量谱的模型与数据比值。结果展示了两个 R_T 区间: $0 \leq R_T < 0.5$ (上图) 和 $2.5 \leq R_T < 5$ (下图)。分别在左侧、中部和右侧列出了朝向、远离和横向区域的比值。误差带代表了模型与数据比值的统计和系统不确定性组合。

图 8 显示了在三个不同拓扑区域中，四个不同的 R_T 区间内的 p_T -微分 kaon-to-pion (K/π) 和 proton-to-pion (p/π) 比值。将依赖 R_T 的比值与在相同中心质量能量下最小偏差碰撞中的包含比值进行了对比 [3]。最小偏差表示综合 R_T 和方位角，并且没有领先粒子的要求。在朝向和远离区域的 K/π 比值显示出相似的特征：它们随着 UE 活动的增加而增加。然而，这仅适用于 $1 \lesssim p_T < 2$ GeV/c。相反，在横向区域的 K/π 比值随着 R_T 的增加而减小。人们还观察到，最小偏差的结果与在横向区域测量的结果非常相似。这表明包含的 K/π 比值主要由大量粒子产生主导。在朝向和远离区域，在最低 R_T 区间内测量的 p/π 比值始终低于包含比值。对于喷流中的 Λ/K_S^0 比值也做出了类似的观察 [51]。随着 UE 的增加，朝向和远离区域变得更加由 UE 主导（喷流稀释）， p/π 比值也随之增加。然而，这仅适用于 $p_T \gtrsim 1$ GeV/c。 p/π 比值的增长可能归因于随着 R_T 增加，集体径向流的逐渐增强。此外，对于 $p_T > 1$ GeV/c 在这两个区域中的 baryon-to-meson 比值趋向于随着 R_T 的增加而增加，并且接近最小偏差比值，而最小偏差比值与在横向区域测量的比值相似。在横向区域的 p/π 比值对 R_T 的依赖性较弱。观察到，在最高 UE 活动区间内（中心在 $p_T \approx 3$ ）的结果对于 $p_T \lesssim 2$ GeV/c 低于在最低 UE 活动区间内的结果，表明可能由于集体径向流导致的低- p_T 质子受到抑制。此外，在最高 R_T 区间内观察到的最大值（中心在 $p_T \approx 3$ ），以及在最低 R_T 区间内 $p_T \gtrsim 3$ GeV/c 时的上升趋势，与在较高 R_T 区间内 $p_T \gtrsim 3$ GeV/c 时的值一致，这表明在较高 R_T 下，较高 p_T 的粒子产生可能受到集体效应的影响较小。5 GeV/c $\Psi_{TNR_T}:\Phi-(p_T \approx 2.5$ GeV/c) 向右移动。这可能归因于随着多重性增加而产生的喷流硬化效应，如在 [12] 中所讨论的。

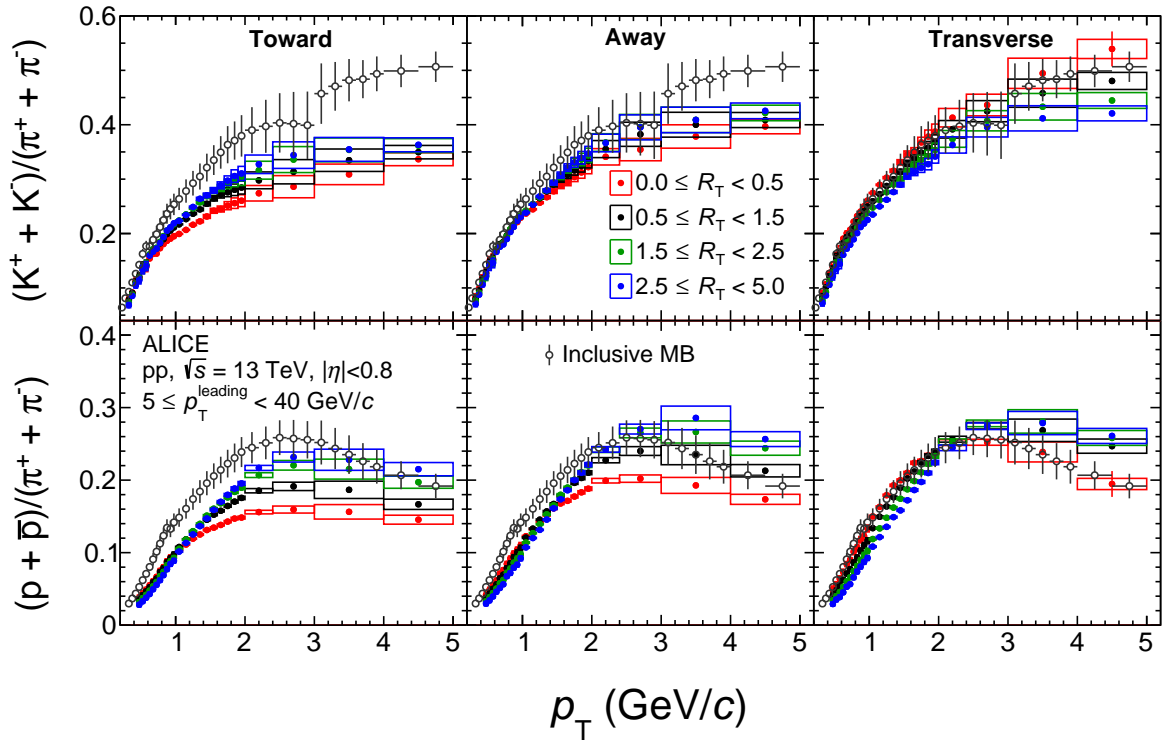


图 8: p_T -微分粒子比率与 R_T 的函数关系。上面（下面）的行显示了 K/π (p/π) 比率。从左到右依次显示了朝向、远离和横向区域的结果。统计和系统不确定性分别用误差棒和盒子表示。叠加了在相同质心能量下 pp 碰撞中包含的最小偏见粒子比率 [3]。

图 9 显示了在两个 R_T 区间内的 p_T -微分 K/π 和 p/π 比率以及模型预测： $0 \leq R_T < 0.5$ （低-UE 活性）和 $2.5 < R_T < 5$ （高-UE 活性）。在低 R_T 事件的朝向和远离区域中， K/π 和 p/π 比率可以定性由 PYTHIA8 Monash 描

述。然而，该模型预测几乎没有随着 R_T 的变化。另一方面，允许颜色绳形成PYTHIA8绳子强子化模型预测 p/π 比率随 R_T 变化，但高估了数据，特别是在高 R_T 事件中。EPOS LHC在低UE活性极限下定性地描述了两个比率，并预测了随 R_T 的变化。它描述了 K/π 比率，但在高 R_T 事件中高估了 p/π 比率。这从 p_T 积分粒子比率中显而易见：从弦碎裂到统计强子化的过渡需要改进。最后，HERWIG7也预测了随 R_T 的变化，并且可以相当好地描述 K/π 比率，而它未能捕捉到 p/π 比率的 p_T 趋势。所有模型在低 R_T 比在高 R_T 更好地描述两个比率这一事实是预期的，因为它们是针对 e^+e^- 数据调整的。模型在远离区域的预测与朝向区域的预测类似。在横侧区域，PYTHIA8 Monash 和 PYTHIA8 ropes 定性地描述了两个 R_T 类别之间 K/π 比率的分裂和排序，但低估了数据。它们也可以定性地描述 p/π 比率。此外，这些模型预测在高 R_T 事件中，对于 $p_T \lesssim 2$ GeV/c，与低 UE 活动比率相比， p/π 比率较低。这种效应可以归因于径向流效应，可能是由 PYTHIA8 中的 CR 和 ropes 引起的。EPOS LHC 预测两个 R_T 类别的 K/π 比率相同，而在低 R_T 时 p/π 比率与数据一致。然而，如前所述，从核心-日冕强子化过渡并未被很好地建模。最后，HERWIG7 在横侧区域给出了 p/π 比率随 R_T 变化的良好定性描述。

p_T -整合产额(dN/dy)和介子、卡农和质子的平均横向动量($\langle p_T \rangle$)是从不同 R_T 区间和拓扑区域的 p_T -微分光谱中提取的。由于光谱是在 $p_T > 0.3$ GeV/c (π, K)和 $p_T > 0.45$ (p) GeV/c的条件下测量的，因此首先需要将它们外推到 $p_T = 0$ 。外推过程通过使用Lévy-Tsallis参数化拟合光谱来进行 [52, 53]。参数化仅在没有数据的 p_T 区间使用。例如，在横向区域的 $0 \leq R_T < 0.5$ 区间中，外推产额的比例分别为 π 的38%、 K 的19%和 p 的22%。为了估计与外推过程相关的系统不确定性，使用了其他几种参数化，如Fermi-Dirac、Bose-Einstein、Blast-Wave和 m_T -指数来估计外推产额。将标称产额和外推产额之间的最大差异作为外推过程的系统不确定性。例如，在横向区域的 $0 \leq R_T < 0.5$ 区间中， $dN/dy(\langle p_T \rangle)$ 的系统不确定性分别为 π 的2%(1.7%)、 K 的2.7%(2.3%)和 p 的2%(1.5%)。图 10显示了不同拓扑区域中 R_T 的平均横向动量的变化。在朝向区域， π 和 K 的 $\langle p_T \rangle$ 在 $0 \leq R_T < 0.5$ （低UE活性）区间是最大的。这一特征反映了存在主要碎裂成低质量强子（ π 和 K ）的喷流，它们具有大的横向动量。随着UE活性的增加， π 和 K 的 $\langle p_T \rangle$ 逐渐减小，并且在 $R_T > 1.5$ 时趋于平坦，这是由于喷流稀释效应：朝向和远离区域开始主要由UE主导。相反，质子的 $\langle p_T \rangle$ 随着 R_T 增加，这可以归因于额外的径向流动效应。此外，在高 R_T 下，所有物种的 $\langle p_T \rangle$ 趋向于接近在横向区域中测得的值。所有模型都能够定性地描述在朝向区域 $\langle p_T \rangle$ 的变化，但EPOS LHC是唯一一个预测质子 $\langle p_T \rangle$ 增加趋势的模型。在远离区域的粒子产生与朝向区域类似。它主要由远离侧的喷流主导。观察到所有物种的 $\langle p_T \rangle$ 随着 R_T 增加而增加。此外，在大的 R_T 处， $\langle p_T \rangle$ 趋向于接近横向区域的值，这里UE占主导。PYTHIA8 Monash和ropes在远离区域给出了 π 的 $\langle p_T \rangle$ 随 R_T 变化的合理定性描述，而只有EPOS LHC正确描述了同一区域中质子的 $\langle p_T \rangle$ 。在横侧区域， $\langle p_T \rangle$ 随着 R_T 的增加而增加，对于所有物种都是如此；然而，增加的速率表现出质量排序，对于较重的粒子更为显著。类似的观察已经在多重性依赖的研究中被提出 [2, 3]。随着 R_T 的增加， $\langle p_T \rangle$ 的上升很可能归因于自相关效应。由于 R_T 和 p_T 谱在相同的 $\Delta\phi$ 区域测量，横侧区域的高多重性要求增加了在同一区域有喷流的概率。最后，观察到所有模型都预测了 $\langle p_T \rangle$ 随 R_T 增加而增加。

图 11 展示了从外插的 dN/dy 计算得到的 p_T -integrated 粒子比率的 R_T 依赖性。随着 UE 活动性的增加，介子和质子相对于 pion 的产量在横向区域增加，进而粒子比率增长，直到在 $R_T \approx 1.5$ 饱和。相反，在朝向和远离区域， K/π 比率随 R_T 变化保持不变，而 p/π 比率随着 UE 活动性增加而减小。此外，朝向和远离区域的两个比率在大的 R_T 值时接近横向区域的值。所有模型都预测了横向区域粒子比率随 R_T 增加的趋势。PYTHIA8 Monash 和 HERWIG7 预测的 p/π 比率与数据相似。PYTHIA8 ropes 对 p/π 的估计偏高（几乎是2倍），而 EPOS LHC 虽然也高估了，但更接近数据。可以注意到，尽管 EPOS LHC 准确描述了所有拓扑区域中质子 $\langle p_T \rangle$ 随 R_T 的变化， p/π 比率仅在低 UE 极限 ($0 \leq R_T <$

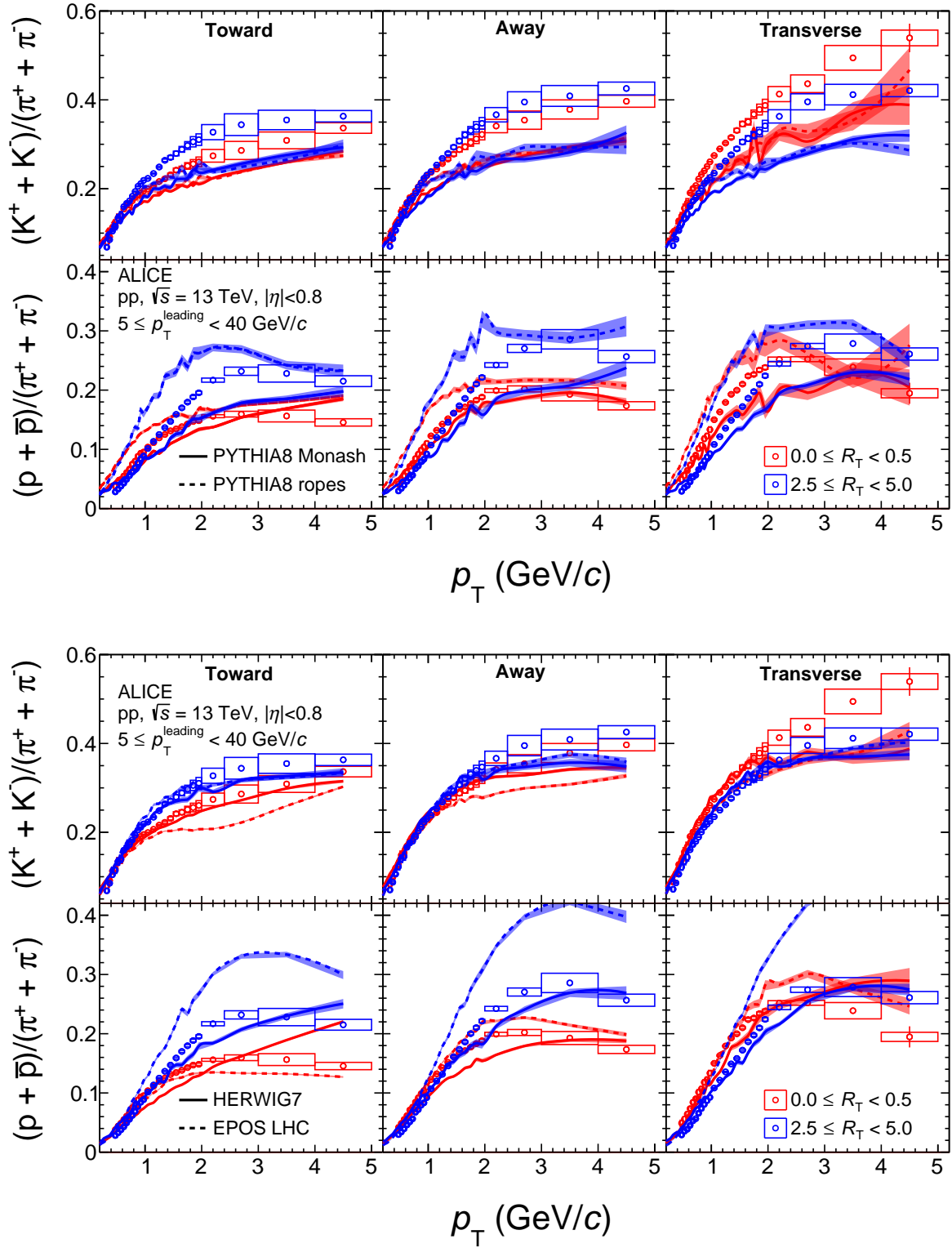


图 9: 介子到 π 介子和质子到 π 介子的比率与 p_T 的关系, 在两个 R_T 区间内: $0 \leq R_T < 0.5$ (红色标记) 和 $2.5 \leq R_T < 5$ (蓝色标记)。从左到右显示了在 toward、away 和 transverse 区域中的粒子比率。PYTHIA 8 Monash 和 PYTHIA 8 ropes (EPOS LHC 和 HERWIG7) 的预测分别在顶部 (底部) 图形中展示。模型线周围的阴影区域代表了统计不确定性。

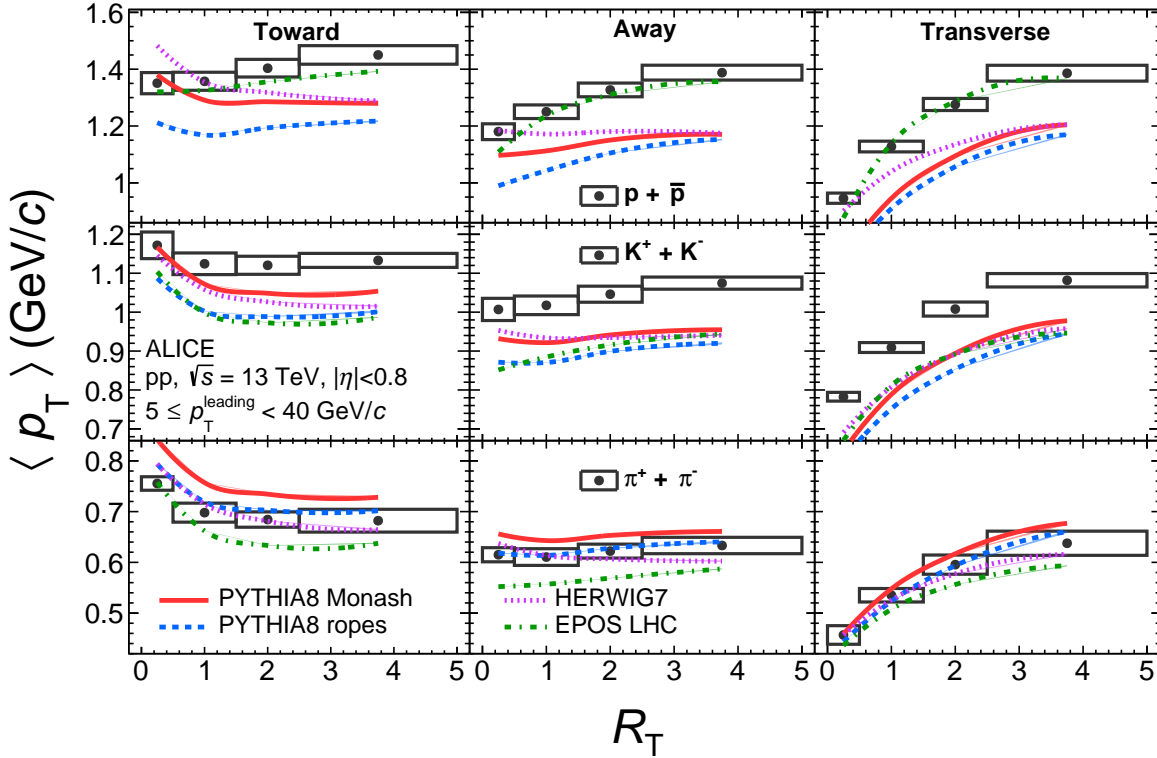


图 10: 平均横向动量作为 R_T 的函数。从左到右依次显示了朝向、远离和横向区域的 $\langle p_T \rangle$ 。第一、第二和第三行分别显示了 π 介子、K介子和质子的结果。统计和系统不确定性分别用误差条和框表示。模型线周围的阴影带代表统计不确定性。

0.5) 被正确描述, 在这个区域弦碎裂占主导, 表明核心高估了质子的产生。PYTHIA8 Monash 在整个 R_T 范围内高估了 p/π 比率约10%, 并低估了 K/π 比率。在朝向和远离区域, 没有一个模型能够重现这两个比率的趋势: HERWIG7 和 PYTHIA8 Monash 预测的 K/π 趋势强烈下降, 而数据不支持这一点。PYTHIA8 ropes 和 EPOS LHC 预测的 p/π 趋势增加, 与数据矛盾。最后, 需要注意的是, 尽管所有模型都捕捉到了图 10 中测量的 $\langle p_T \rangle$ 的大部分趋势, 但没有一个模型能够描述图 11 中 p/π 和 K/π 的粒子比率趋势。

5 Conclusions

在 $\sqrt{s} = 13$ TeV的pp碰撞中, 测定了在不同拓扑区域中的 π 、K和p在中等伪快速度的产生, 作为相对横向活动分类器 R_T 的函数, 其中包含了高 p_T ($5 \leq p_T^{\text{leading}} < 40$ GeV/c)的主导粒子。利用 R_T , 我们能够分别研究在粒子产生主要由类pQCD过程控制的区域(向和远离区域以及低 R_T)以及由软非微扰QCD过程主导的区域(横向区域或高 R_T)。特别是, 由于传统的UE(底层事件)研究是对事件活动进行平均, 这一分析使我们能够更深入地了解集体效应以及硬产生和软产生在pp碰撞中的相互作用。此外, 当UE受到抑制时($0 \leq R_T < 0.5$), 模型能够描述朝向和远离区域中的新结果, 这并不意外, 因为它们是调整以重现类喷流的 e^+e^- 测量结果。然而, 当UE增加时, 所有模型在定性和定量层面都无法重现数据。这表明通过测量作为 R_T 函数的已识别粒子的产生, 我们可以揭示UE的新特征。因此, 这里提出的新测量结果将允许在模型方面取得重大进展, 以确定UE的性质。

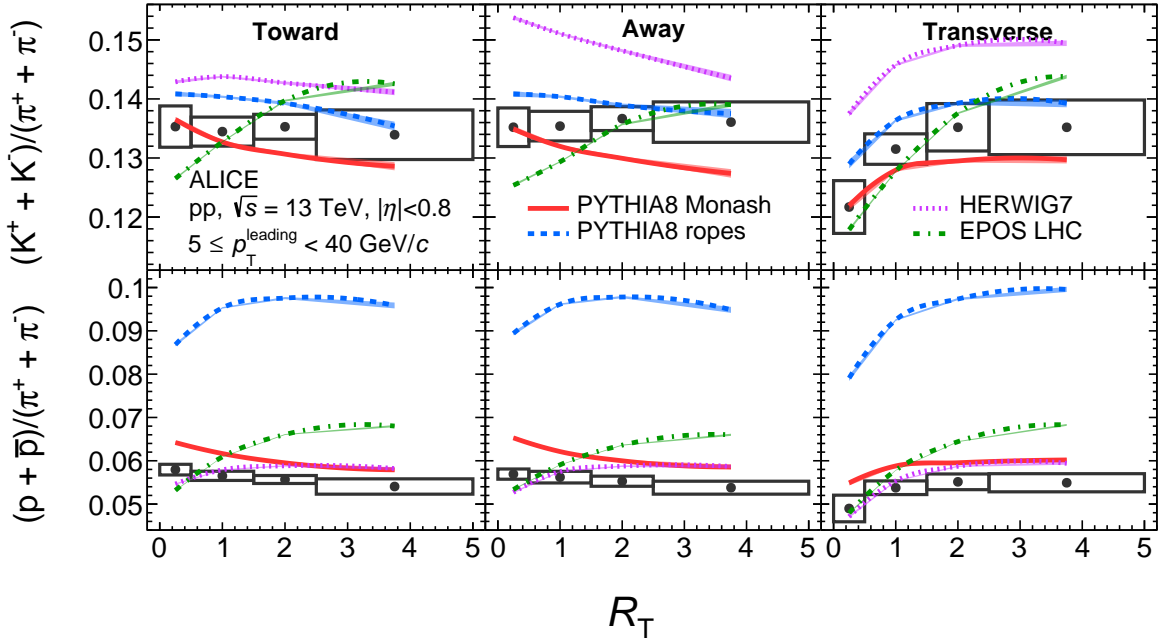


图 11: 横动量积分的粒子比率与 R_T 的函数关系。从左到右依次展示朝向、远离和横向区域的粒子比率。顶部（底部）行绘制了 K/π (p/π)。统计和系统不确定性分别用误差线和框表示。模型线周围的阴影带表示统计不确定性。

Acknowledgements

ALICE 合作组想要感谢所有工程师和技术人员对实验建设的宝贵贡献，以及对 LHC 加速器杰出表现的 CERN 加速器团队。ALICE 合作组衷心感谢所有网格中心和世界范围 LHC 计算网格 (WLCG) 合作提供的资源和支持。ALICE 合作组感谢以下资助机构对建造和运行 ALICE 探测器的支持：

A. I. Alikhanyan 国家科学实验室（叶卡捷琳堡物理研究所）基金会（ANSL）、亚美尼亚科学部和世界科学家联盟（WFS），亚美尼亚；奥地利科学院、奥地利科学基金（FWF）：[M 2467-N36] 和国家基金会用于研究、技术和发展，奥地利；通讯和高科技部、国家核研究中心，阿塞拜疆；巴西国家科学与技术发展委员会（CNPq）、研究与项目资助机构（Finep）、圣保罗州研究支持基金会（FAPESP）和里约格兰德联邦大学（UFRGS），巴西；保加利亚教育部和科学部，在 2020-2027 年国家研究基础设施路线图中（CERN 项目），保加利亚；中国教育部（MOEC）、中国科技部（MSTC）和中国国家自然科学基金会（NSFC），中国；科学和教育部、克罗地亚科学基金会，克罗地亚；技术应用与核发展中心（CEADEN）、Cubaenergía，古巴；捷克共和国教育、青年和体育部，捷克共和国；丹麦独立研究委员会 I 自然科学、VILLUM FONDEN 和丹麦国家研究基金会（DNRF），丹麦；赫尔辛基物理研究所（HIP），芬兰；法国原子能和替代能源委员会（CEA）、法国国家核能与粒子物理研究院（IN2P3）和法国国家科学研究中心（CNRS）；德国联邦教育和研究部（BMBF）和德国亥姆霍兹重离子研究中心有限公司（GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH）；希腊教育、研究与宗教部国家研究技术总秘书处；匈牙利国家研究、开发与创新办公室；印度原子能部（DAE）、印度科技部（DST）、印度大学拨款委员会（UGC）和印度科学与工业研究委员会（CSIR）；印度尼西亚国家研究与创新机构 - 布林（BRIN）；意大利国家核物理研究院（INFN）；日本文部科学省（MEXT）和日本学术振兴会（JSPS）KAKENHI；墨西哥国家科学技术委员会（CONACYT）通过国际合作科学与技术基金（FONCICYT）和墨西哥国立自治大学学术人员事务总处（DGAPA）；荷兰科学研究组织（NWO）；挪威研究理事会，挪威；南方可持续发展科学与技术委员会（COMSATS），

巴基斯坦；秘鲁天主教大学，秘鲁；波兰教育与科学部、国家科学中心和华沙大学ID-UB；韩国科学技术信息研究院和韩国国家研究基金会（NRF），大韩民国；罗马尼亚教育与科学部、原子物理研究所、研究与创新部和原子物理研究所及布加勒斯特理工大学；斯洛伐克共和国教育部、科学、研究与体育部，斯洛伐克；南非国家研究基金会，南非；瑞典研究委员会（VR）和克努特与爱丽丝·瓦伦堡基金会（KAW），瑞典；欧洲核子研究组织，瑞士；苏拉纳雷技术大学（SUT）、泰国国家科技发展局（NSTDA）、泰国科学、研究与创新（TSRI）和泰国国家科学、研究与创新基金（NSRF），泰国；土耳其能源、核与矿物研究机构（TENMAK），土耳其；乌克兰国家科学院，乌克兰；英国科学与技术设施委员会（STFC），英国；美国国家科学基金会（NSF）和美国能源部，核物理办公室（DOE NP），美国。此外，个别团队或成员还获得了以下支持：玛丽亚·斯克沃多夫斯卡-居里，欧洲研究理事会，Strong 2020 - 欧洲地平线 2020（资助编号：950692、824093、896850），欧洲联盟；芬兰科学院（夸克物质卓越中心）（资助编号：346327、346328），芬兰；学术人员提升计划，UNAM，墨西哥。

参考文献

- [1] CMS Collaboration, V. Khachatryan *et al.*, “Multiplicity and rapidity dependence of strange hadron production in pp, pPb, and PbPb collisions at the LHC”, *Phys. Lett. B* **768** (2017) 103–129, arXiv:1605.06699 [nucl-ex].
- [2] ALICE Collaboration, S. Acharya *et al.*, “Multiplicity dependence of light-flavor hadron production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, *Phys. Rev. C* **99** (2019) 024906, arXiv:1807.11321 [nucl-ex].
- [3] ALICE Collaboration, S. Acharya *et al.*, “Multiplicity dependence of π , K, and p production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *Eur. Phys. J. C* **80** (2020) 693, arXiv:2003.02394 [nucl-ex].
- [4] ALICE Collaboration, B. B. Abelev *et al.*, “Multiplicity Dependence of Pion, Kaon, Proton and Lambda Production in p–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV”, *Phys. Lett. B* **728** (2014) 25–38, arXiv:1307.6796 [nucl-ex].
- [5] CMS Collaboration, V. Khachatryan *et al.*, “Evidence for collectivity in pp collisions at the LHC”, *Phys. Lett. B* **765** (2017) 193–220, arXiv:1606.06198 [nucl-ex].
- [6] ALICE Collaboration, S. Acharya *et al.*, “Investigations of Anisotropic Flow Using Multiparticle Azimuthal Correlations in pp, p–Pb, Xe–Xe, and Pb–Pb Collisions at the LHC”, *Phys. Rev. Lett.* **123** (2019) 142301, arXiv:1903.01790 [nucl-ex].
- [7] ALICE Collaboration, S. Acharya *et al.*, “Multiplicity dependence of (multi-)strange hadron production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *Eur. Phys. J. C* **80** (2020) 167, arXiv:1908.01861 [nucl-ex].
- [8] ALICE Collaboration, J. Adam *et al.*, “Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions”, *Nature Phys.* **13** (2017) 535–539, arXiv:1606.07424 [nucl-ex].

- [9] **CMS** Collaboration, A. M. Sirunyan *et al.*, “Measurement of charged pion, kaon, and proton production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *Phys. Rev. D* **96** (2017) 112003, arXiv:1706.10194 [hep-ex].
- [10] T. Martin, P. Skands, and S. Farrington, “Probing Collective Effects in Hadronisation with the Extremes of the Underlying Event”, *Eur. Phys. J. C* **76** (2016) 299, arXiv:1603.05298 [hep-ph].
- [11] T. Sjöstrand and M. van Zijl, “A multiple-interaction model for the event structure in hadron collisions”, *Phys. Rev. D* **36** (Oct, 1987) 2019–2041.
<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.36.2019>.
- [12] A. Ortiz, G. Bencedi, and H. Bello, “Revealing the source of the radial flow patterns in proton–proton collisions using hard probes”, *J. Phys. G* **44** (2017) 065001, arXiv:1608.04784 [hep-ph].
- [13] **ALICE** Collaboration, E. Abbas *et al.*, “Mid-rapidity anti-baryon to baryon ratios in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and 7 TeV measured by ALICE”, *Eur. Phys. J. C* **73** (2013) 2496, arXiv:1305.1562 [nucl-ex].
- [14] **ALICE** Collaboration, S. Acharya *et al.*, “Underlying Event properties in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *JHEP* **04** (2020) 192, arXiv:1910.14400 [nucl-ex].
- [15] **CMS** Collaboration, V. Khachatryan *et al.*, “Measurement of the underlying event activity using charged-particle jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV”, *JHEP* **09** (2015) 137, arXiv:1507.07229 [hep-ex].
- [16] **ATLAS** Collaboration, G. Aad *et al.*, “Measurement of distributions sensitive to the underlying event in inclusive Z-boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* **74** (2014) 3195, arXiv:1409.3433 [hep-ex].
- [17] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, “Jet and Underlying Event Properties as a Function of Charged-Particle Multiplicity in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, *Eur. Phys. J. C* **73** (2013) 2674, arXiv:1310.4554 [hep-ex].
- [18] **ATLAS** Collaboration, G. Aad *et al.*, “Measurement of the underlying event in jet events from 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector”, *Eur. Phys. J. C* **74** (2014) 2965, arXiv:1406.0392 [hep-ex].
- [19] **CDF** Collaboration, T. Affolder *et al.*, “Charged jet evolution and the underlying event in proton-antiproton collisions at 1.8 TeV”, *Phys. Rev. D* **65** (Apr, 2002) 092002.
- [20] A. Ortiz, G. Paić, and E. Cuautle, “Mid-rapidity charged hadron transverse sphericity in pp collisions simulated with Pythia”, *Nucl. Phys. A* **941** (2015) 78–86, arXiv:1503.03129 [hep-ph].
- [21] **ALICE** Collaboration, S. Acharya *et al.*, “Charged-particle production as a function of multiplicity and transverse sphericity in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ and 13 TeV”, *Eur. Phys. J. C* **79** (2019) 857, arXiv:1905.07208 [nucl-ex].

- [22] **ALICE** Collaboration, K. Aamodt *et al.*, “The ALICE experiment at the CERN LHC”, *JINST* **3** (2008) S08002.
- [23] **ALICE** Collaboration, B. B. Abelev *et al.*, “Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC”, *Int. J. Mod. Phys. A* **29** (2014) 1430044, arXiv:1402.4476 [nucl-ex].
- [24] **ALICE** Collaboration, E. Abbas *et al.*, “Performance of the ALICE VZERO system”, *JINST* **8** (2013) P10016, arXiv:1306.3130 [nucl-ex].
- [25] **ALICE** Collaboration, K. Aamodt *et al.*, “Alignment of the ALICE Inner Tracking System with cosmic-ray tracks”, *JINST* **5** (2010) P03003, arXiv:1001.0502 [physics.ins-det].
- [26] J. Alme *et al.*, “The ALICE TPC, a large 3-dimensional tracking device with fast readout for ultra-high multiplicity events”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **622** (2010) 316–367, arXiv:1001.1950 [physics.ins-det].
- [27] A. Akindinov *et al.*, “Performance of the ALICE Time-Of-Flight detector at the LHC”, *Eur. Phys. J. Plus* **128** (2013) 44.
- [28] **ALICE** Collaboration, S. Acharya *et al.*, “Production of charged pions, kaons, and (anti-)protons in Pb–Pb and inelastic pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV”, *Phys. Rev. C* **101** (2020) 044907, arXiv:1910.07678 [nucl-ex].
- [29] **ALICE** Collaboration, J. Alme *et al.*, “The ALICE definition of primary particles”, <https://cds.cern.ch/record/2270008>.
- [30] **ALICE** Collaboration, B. Abelev *et al.*, “Measurement of Event Background Fluctuations for Charged Particle Jet Reconstruction in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, *JHEP* **03** (2012) 053, arXiv:1201.2423 [hep-ex].
- [31] **ALICE** Collaboration, B. Abelev *et al.*, “Long-range angular correlations on the near and away side in p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV”, *Phys. Lett. B* **719** (2013) 29–41, arXiv:1212.2001 [nucl-ex].
- [32] **ALICE** Collaboration, S. Acharya *et al.*, “Transverse momentum spectra and nuclear modification factors of charged particles in pp, p–Pb and Pb–Pb collisions at the LHC”, *JHEP* **11** (2018) 013, arXiv:1802.09145 [nucl-ex].
- [33] **ALICE** Collaboration, J. Adam *et al.*, “Centrality dependence of the nuclear modification factor of charged pions, kaons, and protons in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, *Phys. Rev. C* **93** (2016) 034913, arXiv:1506.07287 [nucl-ex].
- [34] **ALICE** Collaboration, B. B. Abelev *et al.*, “Production of charged pions, kaons and protons at large transverse momenta in pp and Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, *Phys. Lett. B* **736** (2014) 196–207, arXiv:1401.1250 [nucl-ex].

- [35] **ALICE** Collaboration, J. Adam *et al.*, “Multiplicity dependence of charged pion, kaon, and (anti)proton production at large transverse momentum in p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV”, *Phys. Lett. B* **760** (2016) 720–735, arXiv:1601.03658 [nucl-ex].
- [36] P. Skands, S. Carrazza, and J. Rojo, “Tuning PYTHIA 8.1: the Monash 2013 Tune”, *Eur. Phys. J. C* **74** (2014) 3024, arXiv:1404.5630 [hep-ph].
- [37] R. Brun, F. Bruyant, M. Maire, A. C. McPherson, and P. Zancarini, *GEANT 3: user’s guide Geant 3.10, Geant 3.11; rev. version*. CERN, Geneva, 1987. <https://cds.cern.ch/record/1119728>.
- [38] S. Agostinelli *et al.*, “Geant4-a simulation toolkit”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **506** (2003) 250–303. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.
- [39] A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fassò, and J. Ranft, *FLUKA: A multi-particle transport code (program version 2005)*. CERN Yellow Reports: Monographs. CERN, Geneva, 2005. <https://cds.cern.ch/record/898301>.
- [40] **ALICE** Collaboration, B. Abelev *et al.*, “Centrality dependence of π , K, p production in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, *Phys. Rev. C* **88** (2013) 044910, arXiv:1303.0737 [hep-ex].
- [41] G. D’Agostini, “A Multidimensional unfolding method based on Bayes’ theorem”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **362** (1995) 487–498.
- [42] T. Adye, “Unfolding algorithms and tests using RooUnfold”, in *PHYSTAT 2011*. CERN, Geneva, 5, 2011. arXiv:1105.1160 [physics.data-an].
- [43] T. Pierog, I. Karpenko, J. M. Katzy, E. Yatsenko, and K. Werner, “EPOS LHC: Test of collective hadronization with data measured at the CERN Large Hadron Collider”, *Phys. Rev. C* **92** (2015) 034906, arXiv:1306.0121 [hep-ph].
- [44] C. Bierlich, G. Gustafson, L. Lönnblad, and A. Tarasov, “Effects of Overlapping Strings in pp Collisions”, *JHEP* **03** (2015) 148, arXiv:1412.6259 [hep-ph].
- [45] M. Bahr *et al.*, “Herwig++ Physics and Manual”, *Eur. Phys. J. C* **58** (2008) 639–707, arXiv:0803.0883 [hep-ph].
- [46] J. Bellm *et al.*, “Herwig 7.0/Herwig++ 3.0 release note”, *Eur. Phys. J. C* **76** (2016) 196, arXiv:1512.01178 [hep-ph].
- [47] S. Gieseke, P. Kirchgaßer, and S. Plätzer, “Baryon production from cluster hadronisation”, *Eur. Phys. J. C* **78** (2018) 99, arXiv:1710.10906 [hep-ph].
- [48] T. Sjöstrand, S. Mrenna, and P. Z. Skands, “PYTHIA 6.4 Physics and Manual”, *JHEP* **05** (2006) 026, arXiv:hep-ph/0603175.
- [49] A. Ortiz Velasquez, P. Christiansen, E. Cuautle Flores, I. Maldonado Cervantes, and G. Paić, “Color Reconnection and Flowlike Patterns in pp Collisions”, *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013) 042001, arXiv:1303.6326 [hep-ph].

- [50] C. B. Duncan and P. Kirchga  er, “Kinematic strangeness production in cluster hadronization”, *Eur. Phys. J. C* **79** (2019) 61, [arXiv:1811.10336 \[hep-ph\]](#).
- [51] **ALICE** Collaboration, S. Acharya *et al.*, “Production of Λ and K_S^0 in jets in p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV and pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, *Phys. Lett. B* **827** (2022) 136984, [arXiv:2105.04890 \[nucl-ex\]](#).
- [52] C. Tsallis, “Possible generalization of boltzmann-gibbs statistics”, *Journal of statistical physics* **52** (1988) 479–487.
- [53] G. Wilk and Z. Wlodarczyk, “On the interpretation of nonextensive parameter q in Tsallis statistics and Levy distributions”, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 2770, [arXiv:hep-ph/9908459](#).

A The ALICE Collaboration

S. Acharya¹²⁵, D. Adamová⁸⁶, A. Adler⁶⁹, G. Aglieri Rinella³², M. Agnello²⁹, N. Agrawal⁵⁰, Z. Ahammed¹³², S. Ahmad¹⁵, S.U. Ahn⁷⁰, I. Ahuja³⁷, A. Akindinov¹⁴⁰, M. Al-Turany⁹⁷, D. Aleksandrov¹⁴⁰, B. Alessandro⁵⁵, H.M. Alfanda⁶, R. Alfaro Molina⁶⁶, B. Ali¹⁵, A. Alici²⁵, N. Alizadehvandchali¹¹⁴, A. Alkin³², J. Alme²⁰, G. Alocco⁵¹, T. Alt⁶³, I. Altsybeev¹⁴⁰, M.N. Anaam⁶, C. Andrei⁴⁵, A. Andronic¹³⁵, V. Anguelov⁹⁴, F. Antinori⁵³, P. Antonioli⁵⁰, N. Apadula⁷⁴, L. Aphecetche¹⁰³, H. Appelshäuser⁶³, C. Arata⁷³, S. Arcelli²⁵, M. Aresti⁵¹, R. Arnaldi⁵⁵, J.G.M.C.A. Arneiro¹¹⁰, I.C. Arsene¹⁹, M. Arslandok¹³⁷, A. Augustinus³², R. Averbach⁹⁷, M.D. Azmi¹⁵, A. Badalà⁵², J. Bae¹⁰⁴, Y.W. Baek⁴⁰, X. Bai¹¹⁸, R. Bailhache⁶³, Y. Bailung⁴⁷, A. Balbino²⁹, A. Baldisseri¹²⁸, B. Balis², D. Banerjee⁴, Z. Banoo⁹¹, R. Barbera²⁶, F. Barile³¹, L. Barioglio⁹⁵, M. Barlou⁷⁸, G.G. Barnaföldi¹³⁶, L.S. Barnby⁸⁵, V. Barret¹²⁵, L. Barreto¹¹⁰, C. Bartels¹¹⁷, K. Barth³², E. Bartsch⁶³, N. Bastid¹²⁵, S. Basu⁷⁵, G. Batigne¹⁰³, D. Battistini⁹⁵, B. Batyunya¹⁴¹, D. Bauri⁴⁶, J.L. Bazo Alba¹⁰¹, I.G. Bearden⁸³, C. Beattie¹³⁷, P. Becht⁹⁷, D. Behera⁴⁷, I. Belikov¹²⁷, A.D.C. Bell Hechavarria¹³⁵, F. Bellini²⁵, R. Bellwied¹¹⁴, S. Belokurova¹⁴⁰, V. Belyaev¹⁴⁰, G. Bencedi¹³⁶, S. Beole²⁴, A. Bercuci⁴⁵, Y. Berdnikov¹⁴⁰, A. Berdnikova⁹⁴, L. Bergmann⁹⁴, M.G. Besoiu⁶², L. Betev³², P.P. Bhaduri¹³², A. Bhasin⁹¹, M.A. Bhat⁴, B. Bhattacharjee⁴¹, L. Bianchi²⁴, N. Bianchi⁴⁸, J. Bielčik³⁵, J. Bielčiková⁸⁶, J. Biernat¹⁰⁷, A.P. Bigot¹²⁷, A. Bilandzic⁹⁵, G. Biro¹³⁶, S. Biswas⁴, N. Bize¹⁰³, J.T. Blair¹⁰⁸, D. Blau¹⁴⁰, M.B. Blidaru⁹⁷, N. Bluhme³⁸, C. Blume⁶³, G. Boca^{21,54}, F. Bock⁸⁷, T. Bodova²⁰, A. Bogdanov¹⁴⁰, S. Boi²², J. Bok⁵⁷, L. Boldizsár¹³⁶, A. Bolozdynya¹⁴⁰, M. Bombara³⁷, P.M. Bond³², G. Bonomi^{131,54}, H. Borel¹²⁸, A. Borissov¹⁴⁰, A.G. Borquez Carcamo⁹⁴, H. Bossi¹³⁷, E. Botta²⁴, Y.E.M. Bouziani⁶³, L. Bratrud⁶³, P. Braun-Munzinger⁹⁷, M. Bregant¹¹⁰, M. Broz³⁵, G.E. Bruno^{96,31}, M.D. Buckland²³, D. Budnikov¹⁴⁰, H. Buesching⁶³, S. Bufalino²⁹, O. Bugnon¹⁰³, P. Buhler¹⁰², Z. Buthelezi^{67,121}, S.A. Bysiak¹⁰⁷, M. Cai⁶, H. Caines¹³⁷, A. Caliva⁹⁷, E. Calvo Villar¹⁰¹, J.M.M. Camacho¹⁰⁹, P. Camerini²³, F.D.M. Canedo¹¹⁰, M. Carabas¹²⁴, A.A. Carballo³², F. Carnesecchi³², R. Caron¹²⁶, L.A.D. Carvalho¹¹⁰, J. Castillo Castellanos¹²⁸, F. Catalano^{24,29}, C. Ceballos Sanchez¹⁴¹, I. Chakaberia⁷⁴, P. Chakraborty⁴⁶, S. Chandra¹³², S. Chapeland³², M. Chartier¹¹⁷, S. Chattopadhyay¹³², S. Chattopadhyay⁹⁹, T.G. Chavez⁴⁴, T. Cheng^{97,6}, C. Cheshkov¹²⁶, B. Cheynis¹²⁶, V. Chibante Barroso³², D.D. Chinellato¹¹¹, E.S. Chizzali^{11,95}, J. Cho⁵⁷, S. Cho⁵⁷, P. Chochula³², P. Christakoglou⁸⁴, C.H. Christensen⁸³, P. Christiansen⁷⁵, T. Chujo¹²³, M. Ciacco²⁹, C. Cicalo⁵¹, F. Cindolo⁵⁰, M.R. Ciupek⁹⁷, G. Clai^{III,50}, F. Colamaria⁴⁹, J.S. Colburn¹⁰⁰, D. Colella^{96,31}, M. Colocci³², M. Concas^{IV,55}, G. Conesa Balbastre⁷³, Z. Conesa del Valle⁷², G. Contin²³, J.G. Contreras³⁵, M.L. Coquet¹²⁸, T.M. Cormier^{1,87}, P. Cortese^{130,55}, M.R. Cosentino¹¹², F. Costa³², S. Costanza^{21,54}, C. Cot⁷², J. Crkovská⁹⁴, P. Crochet¹²⁵, R. Cruz-Torres⁷⁴, E. Cuautle⁶⁴, P. Cui⁶, A. Dainese⁵³, M.C. Danisch⁹⁴, A. Danu⁶², P. Das⁸⁰, P. Das⁴, S. Das⁴, A.R. Dash¹³⁵, S. Dash⁴⁶, A. De Caro²⁸, G. de Cataldo⁴⁹, J. de Cuveland³⁸, A. De Falco²², D. De Gruttola²⁸, N. De Marco⁵⁵, C. De Martin²³, S. De Pasquale²⁸, S. Deb⁴⁷, R.J. Debski², K.R. Deja¹³³, R. Del Grande⁹⁵, L. Dello Stritto²⁸, W. Deng⁶, P. Dhankher¹⁸, D. Di Bari³¹, A. Di Mauro³², R.A. Diaz^{141,7}, T. Dietel¹¹³, Y. Ding^{126,6}, R. Divià³², D.U. Dixit¹⁸, Ø. Djuvsland²⁰, U. Dmitrieva¹⁴⁰, A. Dobrin⁶², B. Dönigus⁶³, J.M. Dubinski¹³³, A. Dubla⁹⁷, S. Dudi⁹⁰, P. Dupieux¹²⁵, M.

Durkac¹⁰⁶, N. Dzalaiova¹², T.M. Eder¹³⁵, R.J. Ehlers⁸⁷, V.N. Eikeland²⁰, F. Eisenhut⁶³, D. Elia⁴⁹,
 B. Erasmus¹⁰³, F. Ercolessi²⁵, F. Erhardt⁸⁹, M.R. Ersdal²⁰, B. Espagnon⁷², G. Eulisse³², D.
 Evans¹⁰⁰, S. Evdokimov¹⁴⁰, L. Fabbietti⁹⁵, M. Faggin²⁷, J. Faivre⁷³, F. Fan⁶, W. Fan⁷⁴, A.
 Fantoni⁴⁸, M. Fasel⁸⁷, P. Fecchio²⁹, A. Feliciello⁵⁵, G. Feofilov¹⁴⁰, A. Fernández Téllez⁴⁴, L.
 Ferrandi¹¹⁰, M.B. Ferrer³², A. Ferrero¹²⁸, C. Ferrero⁵⁵, A. Ferretti²⁴, V.J.G. Feuillard⁹⁴, V.
 Filova³⁵, D. Finogeev¹⁴⁰, F.M. Fionda⁵¹, F. Flor¹¹⁴, A.N. Flores¹⁰⁸, S. Foertsch⁶⁷, I. Fokin⁹⁴,
 S. Fokin¹⁴⁰, E. Fragiaco⁵⁶, E. Frajna¹³⁶, U. Fuchs³², N. Funicello²⁸, C. Furget⁷³, A.
 Furs¹⁴⁰, T. Fusayasu⁹⁸, J.J. Gaardhøje⁸³, M. Gagliardi²⁴, A.M. Gago¹⁰¹, C.D. Galvan¹⁰⁹, D.R.
 Gangadharan¹¹⁴, P. Ganoti⁷⁸, C. Garabatos⁹⁷, J.R.A. Garcia⁴⁴, E. Garcia-Solis⁹, K. Garg¹⁰³,
 C. Gargiulo³², K. Garner¹³⁵, P. Gasik⁹⁷, A. Gautam¹¹⁶, M.B. Gay Ducati⁶⁵, M. Germain¹⁰³, C.
 Ghosh¹³², M. Giacalone^{50,25}, P. Giubellino^{97,55}, P. Giubileo²⁷, A.M.C. Glaenger¹²⁸, P. Glässel⁹⁴,
 E. Glimos¹²⁰, D.J.Q. Goh⁷⁶, V. Gonzalez¹³⁴, L.H. González-Trueba⁶⁶, M. Gorgon², S. Gotovac³³, V.
 Grabski⁶⁶, L.K. Graczykowski¹³³, E. Grecka⁸⁶, A. Grelli⁵⁸, C. Grigoras³², V. Grigoriev¹⁴⁰, S.
 Grigoryan^{141,1}, F. Grosa³², J.F. Grosse-Oetringhaus³², R. Grosso⁹⁷, D. Grund³⁵, G.G.
 Guardiano¹¹¹, R. Guernane⁷³, M. Guilbaud¹⁰³, K. Gulbrandsen⁸³, T. Gundem⁶³, T. Gunji¹²²,
 W. Guo⁶, A. Gupta⁹¹, R. Gupta⁹¹, S.P. Guzman⁴⁴, L. Gyulai¹³⁶, M.K. Habib⁹⁷, C.
 Hadjidakis⁷², F.U. Haider⁹¹, H. Hamagaki⁷⁶, A. Hamdi⁷⁴, M. Hamid⁶, Y. Han¹³⁸, R.
 Hannigan¹⁰⁸, M.R. Haque¹³³, J.W. Harris¹³⁷, A. Harton⁹, H. Hassan⁸⁷, D. Hatzifotiadiou⁵⁰, P.
 Hauer⁴², L.B. Havener¹³⁷, S.T. Heckel⁹⁵, E. Hellbär⁹⁷, H. Helstrup³⁴, M. Hemmer⁶³, T.
 Herman³⁵, G. Herrera Corral⁸, F. Herrmann¹³⁵, S. Herrmann¹²⁶, K.F. Hetland³⁴, B. Heybeck⁶³,
 H. Hillemanns³², C. Hills¹¹⁷, B. Hippolyte¹²⁷, F.W. Hoffmann⁶⁹, B. Hofman⁵⁸, B.
 Hohlweger⁸⁴, G.H. Hong¹³⁸, M. Horst⁹⁵, A. Horzyk², R. Hosokawa¹⁴, Y. Hou⁶, P. Hristov³²,
 C. Hughes¹²⁰, P. Huhn⁶³, L.M. Huhta¹¹⁵, C.V. Hulse⁷², T.J. Humanic⁸⁸, A. Hutson¹¹⁴, D.
 Hutter³⁸, J.P. Iddon¹¹⁷, R. Ilkaev¹⁴⁰, H. Ilyas¹³, M. Inaba¹²³, G.M. Innocenti³², M. Ippolitov¹⁴⁰,
 A. Isakov⁸⁶, T. Isidori¹¹⁶, M.S. Islam⁹⁹, M. Ivanov¹², M. Ivanov⁹⁷, V. Ivanov¹⁴⁰, M.
 Jablonski², B. Jacak⁷⁴, N. Jacazio³², P.M. Jacobs⁷⁴, S. Jadlovská¹⁰⁶, J. Jadlovsky¹⁰⁶, S. Jaelani⁸²,
 L. Jaffe³⁸, C. Jahnke¹¹¹, M.J. Jakubowska¹³³, M.A. Janik¹³³, T. Janson⁶⁹, M. Jercic⁸⁹, S. Jia¹⁰, A.A.P.
 Jimenez⁶⁴, F. Jonas⁸⁷, J.M. Jowett^{32,97}, J. Jung⁶³, M. Jung⁶³, A. Junique³², A. Jusko¹⁰⁰,
 M.J. Kabus^{32,133}, J. Kaewjai¹⁰⁵, P. Kalinak⁵⁹, A.S. Kalteyer⁹⁷, A. Kalweit³², V. Kaplin¹⁴⁰, A.
 Karasu Uysal⁷¹, D. Karatovic⁸⁹, O. Karavichev¹⁴⁰, T. Karavicheva¹⁴⁰, P. Karczmarczyk¹³³, E.
 Karpechev¹⁴⁰, U. Kebschull⁶⁹, R. Keidel¹³⁹, D.L.D. Keijdener⁵⁸, M. Keil³², B. Ketzer⁴², A.M.
 Khan⁶, S. Khan¹⁵, A. Khanzadeev¹⁴⁰, Y. Kharlov¹⁴⁰, A. Khatun^{116,15}, A. Khuntia¹⁰⁷, M.B.
 Kidson¹¹³, B. Kileng³⁴, B. Kim¹⁶, C. Kim¹⁶, D.J. Kim¹¹⁵, E.J. Kim⁶⁸, J. Kim¹³⁸, J.S. Kim⁴⁰,
 J. Kim⁶⁸, M. Kim^{18,94}, S. Kim¹⁷, T. Kim¹³⁸, K. Kimura⁹², S. Kirsch⁶³, I. Kisel³⁸, S.
 Kiselev¹⁴⁰, A. Kisiel¹³³, J.P. Kitowski², J.L. Klay⁵, J. Klein³², S. Klein⁷⁴, C.
 Klein-Bösing¹³⁵, M. Kleiner⁶³, T. Klemenz⁹⁵, A. Kluge³², A.G. Knospe¹¹⁴, C. Kobdaj¹⁰⁵, T.
 Kollegger⁹⁷, A. Kondratyev¹⁴¹, N. Kondratyeva¹⁴⁰, E. Kondratyuk¹⁴⁰, J. König⁶³, S.A.
 Konigstorfer⁹⁵, P.J. Konopka³², G. Kornakov¹³³, S.D. Koryciak², A. Kotliarov⁸⁶, V.
 Kovalenko¹⁴⁰, M. Kowalski¹⁰⁷, V. Kozuharov³⁶, I. Králik⁵⁹, A. Kravčáková³⁷, L. Kreis⁹⁷, M.
 Krivda^{100,59}, F. Krizek⁸⁶, K. Krizkova Gajdosova³⁵, M. Kroesen⁹⁴, M. Krüger⁶³, D.M.
 Krupova³⁵, E. Kryshen¹⁴⁰, V. Kučera³², C. Kuhn¹²⁷, P.G. Kuijer⁸⁴, T. Kumaoka¹²³, D. Kumar¹³²,

L. Kumar⁹⁰, N. Kumar⁹⁰, S. Kumar³¹, S. Kundu³², P. Kurashvili⁷⁹, A. Kurepin¹⁴⁰, A.B. Kurepin¹⁴⁰, A. Kuryakin¹⁴⁰, S. Kushpil⁸⁶, J. Kvapil¹⁰⁰, M.J. Kweon⁵⁷, J.Y. Kwon⁵⁷, Y. Kwon¹³⁸, S.L. La Pointe³⁸, P. La Rocca²⁶, Y.S. Lai⁷⁴, A. Lakrathok¹⁰⁵, M. Lamanna³², R. Langoy¹¹⁹, P. Larionov³², E. Laudi³², L. Lautner^{32,95}, R. Lavicka¹⁰², T. Lazareva¹⁴⁰, R. Lea^{131,54}, H. Lee¹⁰⁴, G. Legras¹³⁵, J. Leibrach³⁸, R.C. Lemmon⁸⁵, I. 莱昂·蒙佐恩¹⁰⁹, M.M. 莱施⁹⁵, E.D. 莱瑟¹⁸, M. 莱特里希⁹⁵, P. 莱瓦伊¹³⁶, X. 李¹⁰, X.L. 李⁶, J. 利恩¹¹⁹, R. 列塔瓦¹⁰⁰, I. 利克梅塔¹¹⁴, B. 林^{24,16}, S.H. 林¹⁶, V. 林德斯特鲁特³⁸, A. 林德纳⁴⁵, C. 利普曼⁹⁷, A. Liu¹⁸, D.H. Liu⁶, J. Liu¹¹⁷, I.M. Lofnes²⁰, C. Loizides⁸⁷, S. Lokos¹⁰⁷, J. Lomker⁵⁸, P. Loncar³³, J.A. Lopez⁹⁴, X. Lopez¹²⁵, E. López Torres⁷, P. Lu^{97,118}, J.R. Luhder¹³⁵, M. Lunardon²⁷, G. Luparello⁵⁶, Y.G. 马³⁹, A. Maevskaya¹⁴⁰, M. Mager³², T. Mahmoud⁴², A. Maire¹²⁷, M.V. Makariev³⁶, M. Malaev¹⁴⁰, G. Malfattore²⁵, N.M. Malik⁹¹, Q.W. Malik¹⁹, S.K. Malik⁹¹, L. Malinina^{VII,141}, D. Mal'Kevich¹⁴⁰, D. Mallick⁸⁰, N. Mallick⁴⁷, G. Mandaglio^{30,52}, V. Manko¹⁴⁰, F. Manso¹²⁵, V. Manzari⁴⁹, Y. Mao⁶, G.V. Margagliotti²³, A. Margotti⁵⁰, A. Marín⁹⁷, C. Markert¹⁰⁸, P. Martinengo³², J.L. Martinez¹¹⁴, M.I. Martínez⁴⁴, G. Martínez García¹⁰³, S. Masciocchi⁹⁷, M. Masera²⁴, A. Masoni⁵¹, L. Massacrier⁷², A. Mastroserio^{129,49}, O. Matonoha⁷⁵, P.F.T. Matuoka¹¹⁰, A. Matyja¹⁰⁷, C. Mayer¹⁰⁷, A.L. Mazuecos³², F. Mazzaschi²⁴, M. Mazzilli³², J.E. Mdhluli¹²¹, A.F. Mechler⁶³, Y. Melikyan^{43,140}, A. Menchaca-Rocha⁶⁶, E. Meninno^{102,28}, A.S. 梅农¹¹⁴, M. 梅雷什¹², S. 姆兰加^{113,67}, Y. 米亚克¹²³, L. 米切莱蒂⁵⁵, L.C. 米利亚宁¹²⁶, D.L. 米哈伊洛夫⁹⁵, K. 米哈伊洛夫^{141,140}, A.N. 米什拉¹³⁶, D. 米斯科维克⁹⁷, A. 莫达克⁴, A.P. 莫罕蒂⁵⁸, B. 莫罕蒂⁸⁰, M. 穆辛·汗^{V,15}, M.A. 莫兰德⁴³, Z. Moravcova⁸³, C. Mordasini⁹⁵, D.A. Moreira De Godoy¹³⁵, I. Morozov¹⁴⁰, A. Morsch³², T. Mrnjavac³², V. Muccifora⁴⁸, S. Muhuri¹³², J.D. Mulligan⁷⁴, A. Mulliri²², M.G. Munhoz¹¹⁰, R.H. Munzer⁶³, H. Murakami¹²², S. Murray¹¹³, L. Musa³², J. Musinsky⁵⁹, J.W. Myrcha¹³³, B. Naik¹²¹, A.I. Nambrath¹⁸, B.K. Nandi⁴⁶, R. Nania⁵⁰, E. Nappi⁴⁹, A.F. Nassirpour^{75,17}, A. Nath⁹⁴, C. Nattrass¹²⁰, M.N. Naydenov³⁶, A. Neagu¹⁹, A. Negru¹²⁴, L. Nellen⁶⁴, S.V. Nesbo³⁴, G. Neskovic³⁸, D. Nesterov¹⁴⁰, B.S. Nielsen⁸³, E.G. Nielsen⁸³, S. Nikolaev¹⁴⁰, S. Nikulin¹⁴⁰, V. Nikulin¹⁴⁰, F. Noferini⁵⁰, S. Noh¹¹, P. Nomokonov¹⁴¹, J. Norman¹¹⁷, N. Novitzky¹²³, P. Nowakowski¹³³, A. Nyanin¹⁴⁰, J. Nystrand²⁰, M. Ogino⁷⁶, A. Ohlson⁷⁵, V.A. Okorokov¹⁴⁰, J. Oleniacz¹³³, A.C. Oliveira Da Silva¹²⁰, M.H. Oliver¹³⁷, A. Onnerstad¹¹⁵, C. Oppedisano⁵⁵, A. Ortiz Velasquez⁶⁴, J. Otwinowski¹⁰⁷, M. Oya⁹², K. Oyama⁷⁶, Y. Pachmayer⁹⁴, S. Padhan⁴⁶, D. Pagano^{131,54}, G. Paic⁶⁴, A. Palasciano⁴⁹, S. Panebianco¹²⁸, H. Park¹²³, H. Park¹⁰⁴, J. Park⁵⁷, J.E. Parkkila³², R.N. Patra⁹¹, B. Paul²², H. Pei⁶, T. Peitzmann⁵⁸, X. Peng⁶, M. Pennisi²⁴, L.G. Pereira⁶⁵, D. Peresunko¹⁴⁰, G.M. Perez⁷, S. Perrin¹²⁸, Y. Pestov¹⁴⁰, V. Petráček³⁵, V. Petrov¹⁴⁰, M. Petrovici⁴⁵, R.P. Pezzi^{103,65}, S. Piano⁵⁶, M. Pikna¹², P. Pillot¹⁰³, O. Pinazza^{50,32}, L. Pinsky¹¹⁴, C. Pinto⁹⁵, S. Pisano⁴⁸, M. Płoskoń⁷⁴, M. Planinic⁸⁹, F. Pliquett⁶³, M.G. Poghosyan⁸⁷, B. Polichtchouk¹⁴⁰, S. Politano²⁹, N. Poljak⁸⁹, A. Pop⁴⁵, S. Porteboeuf-Houssais¹²⁵, V. Pozdniakov¹⁴¹, K.K. Pradhan⁴⁷, S.K. Prasad⁴, S. Prasad⁴⁷, R. Preghenella⁵⁰, F. Prino⁵⁵, C.A. Pruneau¹³⁴, I. Pshenichnov¹⁴⁰, M. Puccio³², S. Pucillo²⁴, Z. Pugelova¹⁰⁶, S. Qiu⁸⁴, L. Quaglia²⁴, R.E. Quishpe¹¹⁴, S. Ragoni^{14,100}, A. Rakotozafindrabe¹²⁸, L. Ramello^{130,55}, F. Rami¹²⁷, S.A.R. Ramirez⁴⁴, T.A. Rancien⁷³, M. Rasa²⁶, S.S. Räsänen⁴³, R. Rath⁵⁰, M.P. Rauch²⁰, I. Ravasenga⁸⁴, K.F. Read^{87,120}, C. Reckziegel¹¹², A.R. Redelbach³⁸, K.

Redlich^{VI,79}, C.A. Reetz⁹⁷, A. Rehman²⁰, F. Reidt³², H.A. Reme-Ness³⁴, Z. Rescakova³⁷, K. Reygers⁹⁴, A. Riabov¹⁴⁰, V. Riabov¹⁴⁰, R. Ricci²⁸, M. Richter¹⁹, A.A. Riedel⁹⁵, W. Riegler³², C. Ristea⁶², M. Rodríguez Cahuantzi⁴⁴, K. Røed¹⁹, R. Rogalev¹⁴⁰, E. Rogochaya¹⁴¹, T.S. Rogoschinski⁶³, D. Rohr³², D. Röhrich²⁰, P.F. Rojas⁴⁴, S. Rojas Torres³⁵, P.S. Rokita¹³³, G. Romanenko¹⁴¹, F. Ronchetti⁴⁸, A. Rosano^{30,52}, E.D. Rosas⁶⁴, K. Roslon¹³³, A. Rossi⁵³, A. Roy⁴⁷, S. Roy⁴⁶, N. Rubini²⁵, O.V. Rueda^{114,75}, D. Ruggiano¹³³, R. Rui²³, B. Rumyantsev¹⁴¹, P.G. Russek², R. Russo⁸⁴, A. Rustamov⁸¹, E. Ryabinkin¹⁴⁰, Y. Ryabov¹⁴⁰, A. Rybicki¹⁰⁷, H. Ryttonen¹¹⁵, W. Rzesza¹³³, O.A.M. Saarimaki⁴³, R. Sadek¹⁰³, S. Sadhu³¹, S. Sadovsky¹⁴⁰, J. Saetre²⁰, K. Šafařík³⁵, S.K. Saha⁴, S. Saha⁸⁰, B. Sahoo⁴⁶, R. Sahoo⁴⁷, S. Sahoo⁶⁰, D. Sahu⁴⁷, P.K. Sahu⁶⁰, J. Saini¹³², K. Sajdakova³⁷, S. Sakai¹²³, M.P. Salvan⁹⁷, S. Sambyal⁹¹, I. Sanna^{32,95}, T.B. Saramela¹¹⁰, D. Sarkar¹³⁴, N. Sarkar¹³², P. Sarma⁴¹, V. Sarritzu²², V.M. Sarti⁹⁵, M.H.P. Sas¹³⁷, J. Schambach⁸⁷, H.S. Scheid⁶³, C. Schiaua⁴⁵, R. Schicker⁹⁴, A. Schmah⁹⁴, C. Schmidt⁹⁷, H.R. Schmidt⁹³, M.O. Schmidt³², M. Schmidt⁹³, N.V. Schmidt⁸⁷, A.R. Schmier¹²⁰, R. Schotter¹²⁷, A. Schröter³⁸, J. Schukraft³², K. Schwarz⁹⁷, K. Schweda⁹⁷, G. Scioli²⁵, E. Scomparin⁵⁵, J.E. Seger¹⁴, Y. Sekiguchi¹²², D. Sekihata¹²², I. Selyuzhenkov^{97,140}, S. Senyukov¹²⁷, J.J. Seo⁵⁷, D. Serebryakov¹⁴⁰, L. Šeršnyte⁹⁵, A. Sevcenco⁶², T.J. Shaba⁶⁷, A. Shabetai¹⁰³, R. Shahoyan³², A. Shangaraev¹⁴⁰, A. Sharma⁹⁰, B. Sharma⁹¹, D. Sharma⁴⁶, H. Sharma¹⁰⁷, M. Sharma⁹¹, S. Sharma⁷⁶, S. Sharma⁹¹, U. Sharma⁹¹, A. Shatat⁷², O. Sheibani¹¹⁴, K. Shigaki⁹², M. Shimomura⁷⁷, J. Shin¹¹, S. Shirinkin¹⁴⁰, Q. Shou³⁹, Y. Sibiriak¹⁴⁰, S. Siddhanta⁵¹, T. Siemiarz⁷⁹, T.F. Silva¹¹⁰, D. Silvermyr⁷⁵, T. Simantathammakul¹⁰⁵, R. Simeonov³⁶, B. Singh⁹¹, B. Singh⁹⁵, R. Singh⁸⁰, R. Singh⁹¹, R. Singh⁴⁷, S. Singh¹⁵, V.K. Singh¹³², V. Singhal¹³², T. Sinha⁹⁹, B. Sitar¹², M. Sitta^{130,55}, T.B. Skaali¹⁹, G. Skorodumovs⁹⁴, M. Slupecki⁴³, N. Smirnov¹³⁷, R.J.M. Snellings⁵⁸, E.H. Solheim¹⁹, J. Song¹¹⁴, A. Songmoolnak¹⁰⁵, F. Soramel²⁷, R. Spijkers⁸⁴, I. Sputowska¹⁰⁷, J. Staa⁷⁵, J. Stachel⁹⁴, I. Stan⁶², P.J. Steffanic¹²⁰, S.F. Stiefelmaier⁹⁴, D. Stocco¹⁰³, I. Storehaug¹⁹, P. Stratmann¹³⁵, S. Strazzi²⁵, C.P. Stylianidis⁸⁴, A.A.P. Suaide¹¹⁰, C. Suire⁷², M. Sukhanov¹⁴⁰, M. Suljic³², R. Sultanov¹⁴⁰, V. Sumberia⁹¹, S. Sumowidagdo⁸², S. Swain⁶⁰, I. Szarka¹², M. Szymkowski¹³³, S.F. Taghavi⁹⁵, G. Taillepied⁹⁷, J. Takahashi¹¹¹, G.J. Tambave²⁰, S. Tang^{125,6}, Z. Tang¹¹⁸, J.D. Tapia Takaki¹¹⁶, N. Tapus¹²⁴, L.A. Tarasovicova¹³⁵, M.G. Tartzila⁴⁵, G.F. Tassielli³¹, A. Tauro³², G. Tejeda Muñoz⁴⁴, A. Telesca³², L. Terlizzi²⁴, C. Terrevoli¹¹⁴, G. Tersimonov³, S. Thakur⁴, D. Thomas¹⁰⁸, A. Tikhonov¹⁴⁰, A.R. Timmins¹¹⁴, M. Tkacik¹⁰⁶, T. Tkacik¹⁰⁶, A. Toia⁶³, R. Tokumoto⁹², N. Topilskaya¹⁴⁰, M. Toppi⁴⁸, F. Torales-Acosta¹⁸, T. Tork⁷², A.G. Torres Ramos³¹, A. Trifiró^{30,52}, A.S. Triolo^{30,52}, S. Tripathy⁵⁰, T. Tripathy⁴⁶, S. Trogolo³², V. Trubnikov³, W.H. Trzaska¹¹⁵, T.P. Trzcinski¹³³, A. Tumkin¹⁴⁰, R. Turrisi⁵³, T.S. Tveter¹⁹, K. Ullaland²⁰, B. Ulukutlu⁹⁵, A. Uras¹²⁶, M. Urioni^{54,131}, G.L. Usai²², M. Vala³⁷, N. Valle²¹, L.V.R. van Doremalen⁵⁸, M. van Leeuwen⁸⁴, C.A. van Veen⁹⁴, R.J.G. van Weelden⁸⁴, P. Vande Vyvre³², D. Varga¹³⁶, Z. Varga¹³⁶, M. Vasileiou⁷⁸, A. Vasiliev¹⁴⁰, O. Vázquez Doce⁴⁸, V. Vechernin¹⁴⁰, E. Vercellin²⁴, S. Vergara Limón⁴⁴, L. Vermunt⁹⁷, R. Vértesi¹³⁶, M. Verweij⁵⁸, L. Vickovic³³, Z. Vilakazi¹²¹, O. Villalobos Baillie¹⁰⁰, A. Villani²³, G. Vino⁴⁹, A. Vinogradov¹⁴⁰, T. Virgili²⁸, V. Vislavicius⁷⁵, A. Vodopyanov¹⁴¹, B. Volkel³², M.A. Völkl⁹⁴, K. Voloshin¹⁴⁰, S.A. Voloshin¹³⁴, G. Volpe³¹, B. von Haller³², I. Vorobyev⁹⁵, N. Vozniuk¹⁴⁰, J. Vrláková³⁷, C. Wang³⁹, D. Wang³⁹,

Y. Wang³⁹, A. Wegrzynek³², F.T. Weiglhofer³⁸, S.C. Wenzel³², J.P. Wessels¹³⁵, S.L. Weyhmiller¹³⁷, J. Wiechula⁶³, J. Wikne¹⁹, G. Wilk⁷⁹, J. Wilkinson⁹⁷, G.A. Willems¹³⁵, B. Windelband⁹⁴, M. Winn¹²⁸, J.R. Wright¹⁰⁸, W. Wu³⁹, Y. Wu¹¹⁸, R. Xu⁶, A. Yadav⁴², A.K. Yadav¹³², S. Yalcin⁷¹, Y. Yamaguchi⁹², S. Yang²⁰, S. Yano⁹², Z. Yin⁶, I.-K. Yoo¹⁶, J.H. Yoon⁵⁷, S. Yuan²⁰, A. Yuncu⁹⁴, V. Zaccaro²³, C. Zampolli³², F. Zanone⁹⁴, N. Zardoshti^{32,100}, A. Zarochentsev¹⁴⁰, P. Závada⁶¹, N. Zaviyalov¹⁴⁰, M. Zhalov¹⁴⁰, B. Zhang⁶, L. Zhang³⁹, S. Zhang³⁹, X. Zhang⁶, Y. Zhang¹¹⁸, Z. Zhang⁶, M. Zhao¹⁰, V. Zhrebchevskii¹⁴⁰, Y. Zhi¹⁰, D. Zhou⁶, Y. Zhou⁸³, J. Zhu^{97,6}, Y. Zhu⁶, S.C. Zugravel⁵⁵, N. Zurlo^{131,54}

Affiliation Notes

^I 已故

^{II} 同时隶属于：马克斯-普朗克物理研究所，慕尼黑，德国

^{III} 同时隶属于：意大利国家新技术、能源和可持续发展局（ENEA），博洛尼亚，意大利

^{IV} 同时隶属于：都灵理工大学DET系，都灵，意大利

^V 同时隶属于：阿尔igarh穆斯林大学应用物理系，阿尔igarh，印度

^{VI} 同时隶属于：弗罗茨瓦夫大学理论物理研究所，波兰

^{VII} 同时隶属于：与CERN签署合作协议的机构

Collaboration Institutes

¹ A.I. Alikhanyan 国家科学实验室（叶卡捷琳堡物理研究所）基金会，叶卡捷琳堡，亚美尼亚

² AGH 科学技术大学，克拉科夫，波兰

³ Bogolyubov 理论物理研究所，乌克兰国家科学院，基辅，乌克兰

⁴ Bose 研究所，物理系与天体粒子物理及空间科学中心（CAPSS），加尔各答，印度

⁵ 加利福尼亚理工州立大学，圣路易斯奥比斯波，加利福尼亚，美国

⁶ 华中师范大学，武汉，中国

⁷ 核技术应用及核发展中心（CEADEN），哈瓦那，古巴

⁸ 高等研究与教育中心（CINVESTAV），墨西哥城和梅里达，墨西哥

⁹ 芝加哥州立大学，芝加哥，伊利诺伊，美国

¹⁰ 中国原子能研究院，北京，中国

¹¹ 忠北国立大学，清州，大韩民国

¹² 布拉迪斯拉瓦科梅纽斯大学，数学、物理与信息学院，布拉迪斯拉瓦，斯洛伐克共和国

¹³ 伊斯兰堡 COMSATS 大学，伊斯兰堡，巴基斯坦

¹⁴ 克瑞顿大学，奥马哈，内布拉斯加，美国

¹⁵ 物理系，阿尔igarh 穆斯林大学，阿尔igarh，印度

¹⁶ 物理系，釜山国立大学，釜山，大韩民国

¹⁷ 物理系，世宗大学，首尔，大韩民国

¹⁸ 物理系，加利福尼亚大学，伯克利，加利福尼亚，美国

¹⁹ 物理系，奥斯陆大学，奥斯陆，挪威

²⁰ 挪威卑尔根大学物理与技术系，卑尔根，挪威

²¹ 意大利帕维亚大学物理系，帕维亚，意大利

- 22 意大利卡利亚里大学物理系及INFN卡利亚里分部, 卡利亚里, 意大利
- 23 意大利的里雅斯特大学物理系及INFN的里雅斯特分部, 的里雅斯特, 意大利
- 24 意大利都灵大学物理系及INFN都灵分部, 都灵, 意大利
- 25 意大利博洛尼亚大学物理与天文学系及INFN博洛尼亚分部, 博洛尼亚, 意大利
- 26 意大利卡塔尼亚大学物理与天文学系及INFN卡塔尼亚分部, 卡塔尼亚, 意大利
- 27 意大利帕多瓦大学物理与天文学系及INFN帕多瓦分部, 帕多瓦, 意大利
- 28 意大利萨勒诺大学‘E.R. Caianiello’物理系及INFN萨勒诺分部, 萨勒诺, 意大利
- 29 意大利都灵理工大学DISAT系及INFN都灵分部, 都灵, 意大利
- 30 意大利梅西纳大学MIFT科学系, 梅西纳, 意大利
- 31 意大利巴里大学‘M. Merlin’跨校物理系及INFN巴里分部, 巴里, 意大利
- 32 欧洲核子研究组织 (CERN), 日内瓦, 瑞士
- 33 克罗地亚斯普利特大学电气工程、机械工程与造船工程系, 斯普利特, 克罗地亚
- 34 西挪威应用科学大学工程与科学系, 卑尔根, 挪威
- 35 捷克共和国布拉格捷克技术大学核科学与物理工程系, 布拉格, 捷克共和国
- 36 保加利亚索非亚大学物理系, 索非亚, 保加利亚
- 37 科学学院, P.J. Šafárik 大学, 科希策, 斯洛伐克共和国
- 38 法兰克福高等研究院, 约翰·沃尔夫冈·歌德-法兰克福大学, 法兰克福, 德国
- 39 复旦大学, 上海, 中国
- 40 庆北国立大学, 江陵, 大韩民国
- 41 高哈蒂大学, 物理系, 高瓦哈蒂, 印度
- 42 赫姆霍兹-斯特拉伦-与-核物理研究所, 波恩大学, 波恩, 德国
- 43 赫尔辛基物理研究所 (HIP), 赫尔辛基, 芬兰
- 44 高能物理组, 普埃布拉自治大学, 普埃布拉, 墨西哥
- 45 霍里亚·胡卢贝伊国家物理与核工程研究院, 布加勒斯特, 罗马尼亚
- 46 印度理工学院孟买分校 (IIT), 孟买, 印度
- 47 印度理工学院印多尔分校, 印多尔, 印度
- 48 INFN, 弗拉斯卡蒂国家实验室, 弗拉斯卡蒂, 意大利
- 49 INFN, 巴里分部, 巴里, 意大利
- 50 INFN, 博洛尼亚分部, 博洛尼亚, 意大利
- 51 INFN, 卡利亚里分部, 卡利亚里, 意大利
- 52 INFN, 卡塔尼亚分部, 卡塔尼亚, 意大利
- 53 INFN, 帕多瓦分部, 帕多瓦, 意大利
- 54 INFN, 帕维亚分部, 帕维亚, 意大利
- 55 INFN, 都灵分部, 都灵, 意大利
- 56 INFN, 的里雅斯特分部, 的里雅斯特, 意大利
- 57 韩国仁川仁荷大学
- 58 荷兰乌得勒支大学/尼可夫研究所引力与亚原子物理研究所 (GRASP)
- 59 斯洛伐克科学院实验物理研究所, 科希策, 斯洛伐克共和国
- 60 印度同位素研究所, 布巴内斯瓦尔, 印度
- 61 捷克科学院物理研究所, 布拉格, 捷克共和国
- 62 罗马尼亚布加勒斯特空间科学研究所 (ISS)

- ⁶³德国法兰克福约翰·沃尔夫冈·歌德大学核物理研究所
- ⁶⁴墨西哥墨西哥城国立自治大学核科学研究所
- ⁶⁵巴西联邦里奥格兰德州立大学物理研究所, 阿雷格里港, 巴西
- ⁶⁶墨西哥墨西哥城国立自治大学物理研究所
- ⁶⁷南非索梅塞特韦斯特原子能研究实验室, 国家研究基金会
- ⁶⁸韩国全州全北国立大学
- ⁶⁹德国法兰克福约翰·沃尔夫冈·歌德大学计算机科学研究所, 计算机科学与数学系, 法兰克福, 德国
- ⁷⁰韩国大田韩国科学技术信息研究院
- ⁷¹土耳其科尼亚卡塔伊大学
- ⁷²法国奥赛无限小物理实验室, 伊雷娜·约里奥-居里
- ⁷³法国格勒诺布尔-阿尔卑斯大学亚原子物理与宇宙学实验室, CNRS-IN2P3, 格勒诺布尔, 法国
- ⁷⁴美国加利福尼亚州伯克利劳伦斯伯克利国家实验室
- ⁷⁵ Lund University 物理系粒子物理部, 瑞典 Lund
- ⁷⁶ Nagasaki Institute of Applied Science, 日本 Nagasaki
- ⁷⁷ Nara Women's University (NWU), 日本 Nara
- ⁷⁸ National and Kapodistrian University of Athens, 物理系, 希腊 Athens
- ⁷⁹ National Centre for Nuclear Research, 波兰 Warsaw
- ⁸⁰ National Institute of Science Education and Research, Homi Bhabha National Institute, 印度 Jatni
- ⁸¹ National Nuclear Research Center, 阿塞拜疆 Baku
- ⁸² National Research and Innovation Agency - BRIN, 印度尼西亚 Jakarta
- ⁸³ Niels Bohr Institute, 哥本哈根大学, 丹麦哥本哈根
- ⁸⁴ Nikhef, 国家亚原子物理研究所, 荷兰阿姆斯特丹
- ⁸⁵ 核物理组, STFC Daresbury 实验室, 英国 Daresbury
- ⁸⁶ 捷克科学院核物理研究所, Husinec-Řež, 捷克共和国
- ⁸⁷ 奥克岭国家实验室, 美国田纳西州橡树岭
- ⁸⁸ 俄亥俄州立大学, 美国俄亥俄州哥伦布
- ⁸⁹ 物理系, 科学学院, 萨格勒布大学, 克罗地亚萨格勒布
- ⁹⁰ 物理系, 旁遮普大学, 印度 Chandigarh
- ⁹¹ 物理系, 贾穆大学, 印度贾穆
- ⁹² 物理项目和国际可持续发展研究所与结的轴向超材料 (SKCM2), 广岛大学, 日本广岛
- ⁹³ 物理研究所, 蒂宾根大学, 德国蒂宾根
- ⁹⁴ 物理研究所, 海德堡大学, 德国海德堡
- ⁹⁵ 物理学系, 慕尼黑工业大学, 德国, 慕尼黑
- ⁹⁶ 巴里理工大学和INFN巴里分部, 意大利, 巴里
- ⁹⁷ 研究部和极端物质研究所EMMI, GSI亥姆霍兹重离子研究中心有限公司, 德国, 达姆施塔特
- ⁹⁸ 佐贺大学, 日本, 佐贺
- ⁹⁹ 沙哈核物理研究所, 霍米·巴布哈国家研究院, 印度, 加尔各答
- ¹⁰⁰ 物理与天文学学院, 伯明翰大学, 英国, 伯明翰
- ¹⁰¹ 物理系, 秘鲁天主教大学, 秘鲁, 利马
- ¹⁰² 斯蒂芬·梅耶尔原子物理研究所 (SMI), 奥地利, 维也纳
- ¹⁰³ SUBATECH, IMT大西洋, 南特大学, CNRS-IN2P3, 法国, 南特

- ¹⁰⁴ 成均馆大学, 韩国, 水原市
- ¹⁰⁵ 素那拉理工大学, 泰国, 那空是世玛
- ¹⁰⁶ 科希策技术大学, 斯洛伐克共和国, 科希策
- ¹⁰⁷ 亨利克·涅沃季尼茨基核物理研究所, 波兰科学院, 波兰, 克拉科夫
- ¹⁰⁸ 得克萨斯大学奥斯汀分校, 美国, 得克萨斯州, 奥斯汀
- ¹⁰⁹ 锡那罗自治大学, 墨西哥, 库利亚坎
- ¹¹⁰ 圣保罗大学 (USP), 巴西, 圣保罗
- ¹¹¹ 坎皮纳斯州立大学 (UNICAMP), 巴西, 坎皮纳斯
- ¹¹² 联邦ABC大学, 巴西, 圣安德烈
- ¹¹³ 开普敦大学, 南非, 开普敦
- ¹¹⁴ 休斯顿大学, 休斯顿, 得克萨斯州, 美国
- ¹¹⁵ 哈维大学, 哈维, 芬兰
- ¹¹⁶ 堪萨斯大学, 劳伦斯, 堪萨斯州, 美国
- ¹¹⁷ 利物浦大学, 利物浦, 英国
- ¹¹⁸ 中国科学技术大学, 合肥, 中国
- ¹¹⁹ 南挪威大学, 孔斯贝格, 挪威
- ¹²⁰ 田纳西大学, 诺克斯维尔, 田纳西州, 美国
- ¹²¹ 威特沃特斯兰德大学, 约翰内斯堡, 南非
- ¹²² 东京大学, 东京, 日本
- ¹²³ 筑波大学, 筑波, 日本
- ¹²⁴ 布加勒斯特理工大学, 布加勒斯特, 罗马尼亚
- ¹²⁵ 克莱蒙奥弗涅大学, CNRS/IN2P3, LPC, 克莱蒙费朗, 法国
- ¹²⁶ 里昂大学, CNRS/IN2P3, 里昂无限大物理研究所, 里昂, 法国
- ¹²⁷ 斯特拉斯堡大学, CNRS, IPHC UMR 7178, F-67000 斯特拉斯堡, 法国
- ¹²⁸ 巴黎-萨克雷大学, 萨克雷研究中 (CEA), IRFU, 核物理系 (DPhN), 萨克雷, 法国
- ¹²⁹ 福贾大学, 福贾, 意大利
- ¹³⁰ 东皮埃蒙特大学, 维尔切利, 意大利
- ¹³¹ 布雷西亚大学, 布雷西亚, 意大利
- ¹³² 可变能量回旋加速器中心, 霍米·巴布哈国家研究所, 加尔各答, 印度
- ¹³³ 华沙理工大学, 华沙, 波兰
- ¹³⁴ 韦恩州立大学, 底特律, 密歇根, 美国
- ¹³⁵ 威斯特法尔-威勒姆斯大学明斯特, 核物理研究所, 明斯特, 德国
- ¹³⁶ 维格纳物理研究中心, 布达佩斯, 匈牙利
- ¹³⁷ 耶鲁大学, 纽黑文, 康涅狄格, 美国
- ¹³⁸ 延世大学, 首尔, 大韩民国
- ¹³⁹ 技术与转移中心 (ZTT), Worms, 德国
- ¹⁴⁰ 根据与CERN的合作协议属于一个研究所
- ¹⁴¹ 根据与CERN的合作协议属于一个国际实验室。