arXiv:2611.32516v1 [nucl-ex] 24 Nov 2026

在相同多重数下，Ne+Ne碰撞中的带电强子谱比O+O碰撞更软，碰撞能量为 $\sqrt{s_{\rm NN}} = 5.36$ 太电子伏特

Kishora Nayak[1], *[1]印度奥迪沙邦巴尔加尔*768028*，*Panchayat*学院物理系（2026年11月25日）

ATLAS合作组测量了 $\sqrt{s_{\rm NN}} = 5.36$ 太电子伏特下O+O和Ne+Ne碰撞中的带电强子谱。为检验在给定多重数下横动量谱的谱形是否取决于碰撞系统的大小，研究在相同带电粒子多重数下进行比较，而不是在相同中心度下比较。在相同多重数下，Ne+Ne碰撞的平均横动量 $\langle p_{\rm T}\rangle$ 低于O+O碰撞。无需进行任何谱拟合，已发表的 $\langle p_{\rm T}\rangle$值给出的Ne+Ne/O+O比值在3–4%中心度下为0.9822；即使将O+O的系统不确定度视为不同中心度类别之间不相关，该比值仍比1低6.6个标准差。在$0.4 < p_{\rm T} < 2$ GeV下，Ne+Ne谱可由O+O谱描述，只需将横动量轴按单一伸缩因子压缩，$\lambda_{\rm Ne/O} = 0.969$ 在3–4%类别中如此。根据O+O系统不确定度的共同部分是否在不同中心度类别之间相互抵消，该比值分别比1低9.5个或3.3个标准差。如果在相同多重数下Ne+Ne碰撞具有更大的横向面积，且更大的面积会产生更软的谱，那么这种排序是可以预期的。向外围碰撞方向，软化程度减弱，并且在前向赝快度处相同。在中心碰撞中，谱形与中心度类别的关联比与多重数的关联更紧密。在Xe+Xe和Pb+Pb碰撞中也测试了相同的方法。

一、引言

大型强子对撞机上的轻核碰撞，将集体现象的研究拓展到了质子—原子核碰撞与重离子碰撞所形成系统之间的中等规模系统 [1–4]。2025年，大型强子对撞机提供了 ^{16}O+^{16}O和 ^{20}Ne+^{20}Ne碰撞，能量为 $\sqrt{s_{\rm NN}} = 5.36$ 太电子伏特。这两种原子核相差四个核子，且形状不同：^{16}O预计具有紧凑的 α团簇结构，而^{20}Ne则呈细长形 [5–7]。对O+O和Ne+Ne碰撞中各向异性流的首次测量表明，末态各向异性对初始核几何结构十分敏感 [8–10], ，这与模型计算的预测一致 [7, 11–14]。

各向异性流主要对初始态的形状敏感，而横向动量（$p_{\rm T}$）谱则对其尺寸敏感。在单位快度熵固定、近似即 $\mathrm{d}N_{\rm ch}/\mathrm{d}\eta$ 固定时，较小的横向尺寸会带来更大的熵密度和更强的压强梯度，因此平均横动量 $\langle p_{\rm T}\rangle$ 更大，谱也更硬 [15–17]。在流体动力学描述中，这种硬化源于介质更强的径向膨胀 [18, 19]。尺寸与 $\langle p_{\rm T}\rangle$ 之间的相同关系也被用于将逐事件 $\langle p_{\rm T}\rangle$ 涨落解释为初始尺寸的涨落 [20, 21], ，而且这些涨落对 $p_{\rm T}$ 的依赖性最近已在 Pb+Pb 碰撞 [22, 23]中得到测量。在相同多重数下，较小尺寸对应更大的 $\langle p_{\rm T}\rangle$，即使没有流体动力学膨胀也应如此：在初始态饱和模型中，$\langle p_{\rm T}\rangle$ 与饱和动量成标度关系，而饱和动量的平方与单位横向面积上的多重数成正比 [24]。

要检验 $\langle p_{\rm T}\rangle$ 对尺寸的依赖性，需要以 O+O 和 Ne+Ne 碰撞为两个碰撞系统建立共同的参照。同一个中心度类别在两个不同系统中并不会给出相同的多重数。ATLAS 合作组在细分中心度类别 [25]中测量了 O+O 和 Ne+Ne 碰撞中的带电粒子谱、$\mathrm{d}N_{\rm ch}/\mathrm{d}\eta$ 以及 $\langle p_{\rm T}\rangle$ 。在相同中心度下，谱的 Ne+Ne/O+O 比值几乎不依赖于 $p_{\rm T}$ ，并且 $\langle p_{\rm T}\rangle$ 的数值在$p_{\rm T} > 0.27$ GeV [25], 以内相差不超过 0.3%；而 Ne+Ne 的多重数则大 1.05 至 1.22 倍，具体取决于中心度 [25]。在相同 $\mathrm{d}N_{\rm ch}/\mathrm{d}\eta$下进行比较可以消除多重数差异，正如对$\langle p_{\rm T}\rangle$ 在 pp、p+Pb 和 Pb+Pb 碰撞 [26], 中的研究所做的那样；在这些碰撞中，在相同多重数下，较小系统具有更高的 $\langle p_{\rm T}\rangle$ 。这些系统的尺寸差异很大，并且只有在有限的多重数范围内才会重叠。O+O 和 Ne+Ne 原子核的尺寸接近，且两个系统都在同一个探测器中、以细分中心度类别测量，覆盖了相互重叠的多重数范围，因此可以逐类别进行比较；在已发表的 Ne+Ne/O+O 比值中，系统不确定性有一部分会相互抵消。然而，相同多重数并不一定意味着相同的谱形：最近一项对 O+O、p+Pb 和 Pb+Pb 碰撞中 $\Lambda/K^0_{\rm S}$比值的研究发现，其$p_{\rm T}$ 依赖性按照在 Glauber 模型中计算的横向密度排序时，比仅按多重数排序更为合理 [27], ，因此不同尺寸的系统在相同多重数下可能具有不同的谱形。

本研究旨在检验：在多重数相同时比较 Ne+Ne 与 O+O 碰撞，二者的带电强子谱是否具有相同的形状。如果谱形仅由多重数决定，那么两种谱应当重合；若在相同 $\mathrm{d}N_{\rm ch}/\mathrm{d}\eta$ 下存在差异，则说明谱形还取决于多重数以外的因素，例如

* k.nayak1234@gmail.com

碰撞系统的大小。由于 ^{20}Ne 是较大的原子核，这种尺寸依赖性会使 Ne+Ne 谱更软。两者的差异用伸缩因子 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$量化：在相同多重数下，Ne+Ne 谱可由 O+O 谱描述，只需将每个 p_{T}值乘以 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$，因此 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}} < 1$ 意味着 Ne+Ne 谱更软。对于带电强子，$\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 是一个有效参数，代表以π介子为主的强子混合物的平均值。多重数匹配时已发表的 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$值之比无需谱拟合或重标度假设，是衡量软化最直接的指标。前向赝快度处的谱以及 Xe+Xe/Pb+Pb 对照比较，可用于检验分析中与探测器相关的部分，并判断仅凭多重数匹配是否会造成软化。

本文组织如下。第二节介绍数据、多重数匹配、重缩放拟合、不确定度评估以及方法验证。第三节展示匹配多重数下的谱、$\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 在中赝快度和前向赝快度处的多重数依赖性、匹配多重数下已发表的 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 值的比值，以及Xe+Xe/Pb+Pb对照比较。第四节将等多重数比较与等中心度比较联系起来，从系统大小以及利用爆炸波参数化得到的冻出参数角度讨论结果，并确定相同 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$下的多重数比。第五节给出总结与展望，附录A列出所有中心度类别的多重数匹配结果，以及所有比较类别的伸缩因子。

II. 数据与分析方法

A. 输入数据

本分析采用 ATLAS合作组发表的 O+O 和 Ne+Ne 碰撞中带电强子的测量结果，碰撞能量为 $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 5.36$ 太电子伏特 [25], ，中心度类别宽度为 1%，覆盖 0 至 5%；以及宽度为 5%，覆盖 5% 至 80%。下文所示已发表比值以 70–80% 类别为参照；其他较宽的类别（0–5% 以及 20% 至 80% 范围内宽度为 10% 的类别）仅用于检验多重数的分配（第二节D）。主要输入包括两个系统在 $|\eta| < 0.5$ 、 $0.21 < p_{\mathrm{T}} < 5$ GeV 下的 p_{T} 谱，以及这两组谱的两个比值：各 O+O 中心度类别相对于 O+O 70–80% 类别的比值，以及相同中心度下 Ne+Ne 与 O+O 的比值。多重数取自 $|\eta| < 0.5$ 下的 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$，并外推至 $p_{\mathrm{T}} = 0$；同时采用 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 的 Ne+Ne/O+O 比值。在 $1.5 < |\eta| < 2.25$ 下，使用在那里测得的谱和比值重复分析，同时保留中快度多重数。匹配多重数下 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 的比值（第三节 C ）以及相同 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 下的多重数比（第四节 C ），采用 $p_{\mathrm{T}} > 0.27$ GeV 下的 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 和 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ ，以及它们的 Ne+Ne/O+O 比值。每个数据点都有统计不确定度和总系统不确定度；其处理方法将在第二节D中说明。对照比较（Sec. IIID）采用 ALICE合作组在 Xe+Xe 和 Pb+Pb 碰撞 [28, 29] 中测得的带电强子谱、$\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 和 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ ，以及 ATLAS合作组测得的 $\langle[p_{\mathrm{T}}]\rangle$ [30]; 爆炸波研究（Sec. IVB）采用 ALICE π、K介子和质子在 Pb+Pb 碰撞 [31]中的谱。

B. 多重数匹配

为在相同多重数下比较这两个系统，需要获得每个 Ne+Ne 中心度类别 c对应 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 的 O+O 谱。Ne+Ne 的 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 由同一类别的 O+O 数值和已发表比值计算得出，

$$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta\big|_{\mathrm{Ne}}(c) = r_{\mathrm{Ne/O}}(c) \times \mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta\big|_{\mathrm{O}}(c), \quad (1)$$

其中，$r_{\mathrm{Ne/O}}(c)$ 是已发表的 Ne+Ne/O+O $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 比值，而 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta|_{\mathrm{O}}(c)$ 是同一中心度类别的 O+O 多重数。方程（1）重现的已发表 Ne+Ne 多重数，误差在 0.01% 以内。采用匹配后的数值，而非已发表的 Ne+Ne 数值，是因为匹配后的 O+O 谱使用相同的 O+O 多重数尺度：该尺度的总体不确定度会相互抵消，匹配主要取决于 $r_{\mathrm{Ne/O}}$ 的不确定度；在最中心的类别中，这一不确定度为 0.1%，而 Ne+Ne 多重数本身的不确定度为 2.3–2.5%。多重数在 $|\eta| < 0.5$ 处进行匹配，即测量谱的位置。所有类别中，已发表的 Ne+Ne/O+O $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$比值在 $|\eta| < 0.5$ 与任意$|\eta| < 2.4$ 之间的变化都小于 0.9%，处于匹配多重数 $\pm$1% 的变化范围内。

多重数为 m =$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta|_{\mathrm{Ne}}(c)$时的 O+O 谱，通过在多重数满足$m_1 > m > m_2$的两个 O+O 类别 1 和 2 之间进行插值得到。插值针对谱的对数和多重数的对数进行线性处理，

$$\ln f_{\mathrm{O}}(p_{\mathrm{T}}; m) = w_1 \ln f_{\mathrm{O},1}(p_{\mathrm{T}}) + w_2 \ln f_{\mathrm{O},2}(p_{\mathrm{T}}), \quad (2)$$

逐个区间应用，其中 $w_1 = (\ln m - \ln m_2)/(\ln m_1 - \ln m_2)$ 且 $w_2 = 1 - w_1$，其中 $f = (1/p_{\mathrm{T}})\mathrm{d}N/\mathrm{d}p_{\mathrm{T}}$。采用对数插值，是因为给定$p_{\mathrm{T}}$ 区间内的产额近似随多重数呈幂律变化，对这种情况公式（2）是精确的；将三个类别进行二次插值则作为一种系统变化。

例如，Ne+Ne 3–4%类别（$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ =145.0）与O+O 0–1%和1–2%类别相匹配，其权重分别为0.79和0.21；所有类别的权重均列于附录A中。Ne+Ne最中心的三个类别（0–3%）的多重数高于O+O最中心的类别（$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta = 148.4$），因此无法进行匹配，所以比较从Ne+Ne 3–4%开始。每个类别都被赋予一个单独的多重数，尽管其谱是在一定范围的多重数上取平均得到的；这一近似将在第IID节中进行检验。

C. 横向动量重标度

在假设两个谱之间的差异仅在于 p_{T} 轴的伸缩变换的前提下，将Ne+Ne谱与匹配的O+O谱进行比较，

$$\left.\frac{\mathrm{d}N_{\mathrm{Ne}}}{\mathrm{d}p_{\mathrm{T}}}\right|_{p_{\mathrm{T}}} = \frac{C}{\lambda_{\mathrm{Ne/O}}} \left.\frac{\mathrm{d}N_{\mathrm{O}}}{\mathrm{d}p_{\mathrm{T}}}\right|_{p_{\mathrm{T}}/\lambda_{\mathrm{Ne/O}}}, \tag{3}$$

其中，C 是一个自由归一化参数，不参与拟合。由于谱以 p_{T} 区间内的产额形式发布，拟合采用积分形式

$$N_{\mathrm{Ne}}(l,h) = C\, N_{\mathrm{O}}\left(\frac{l}{\lambda_{\mathrm{Ne/O}}}, \frac{h}{\lambda_{\mathrm{Ne/O}}}\right), \tag{4}$$

其中，$N(l,\ h) = \int_l^h (\mathrm{d}N/\mathrm{d}p_{\mathrm{T}})\,\mathrm{d}p_{\mathrm{T}}$ 是区间 $l < p_{\mathrm{T}} < h$内的产额。公式（4）通过将 $p_{\mathrm{T}} \to p_{\mathrm{T}}/\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 代入积分式，可由公式（3）得到。对于不变谱，公式（3）写为 $f_{\mathrm{Ne}}(\ p_{\mathrm{T}} = C\,\lambda^{-2}\ )_{\mathrm{Ne/O}} f_{\mathrm{O}}(\ p_{\mathrm{T}}/\lambda_{\mathrm{Ne/O}})$。

重标度后的区间 $[l/\lambda_{\mathrm{Ne/O}}, h/\lambda_{\mathrm{Ne/O}}]$ 与发布的分箱并不重合。通过将每个分箱内发布的谱建模为关于 p_{T} 的指数函数，并使用分箱中心处的发布值和局部对数斜率，可以计算重标度区间内的产额。对于 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 的每个试探值，分箱 i（边界为 $l_i,\ h_i$）中的对数差为

$$d_i = \ln N_{\mathrm{Ne}}(l_i,h_i) - \ln N_{\mathrm{O}}\left(\frac{l_i}{\lambda_{\mathrm{Ne/O}}}, \frac{h_i}{\lambda_{\mathrm{Ne/O}}}\right) \tag{5}$$

且拟合最小化

$$\chi^2(\lambda_{\mathrm{Ne/O}}) = \sum_{i\in S} \frac{(d_i - \bar{d})^2}{\sigma_i^2}, \qquad \bar{d} = \frac{\sum_{i\in S} d_i/\sigma_i^2}{\sum_{i\in S} 1/\sigma_i^2}, \tag{6}$$

在拟合范围 S 内，即 0.405 至 2.05 GeV 之间已发表的 20 个 p_{T} 区间（记作 $0.4 < p_{\mathrm{T}} < 2$ GeV）。减去加权平均值 $\bar{d}$ 可消除 d_i中的常数 $\ln C$，因此拟合中只涉及谱的形状。逐点不确定度 σ_i 结合了谱及其比值的已发表统计不确定度和系统不确定度，具体如第二节D所述。σ_i在不同的 p_{T} 区间之间被视为不相关；系统不确定度中在 p_{T} 上相关的部分，则通过第二节D所述的谱的相干变化加以计入。

由于强子质量在低 p_{T} 时影响最大，单一伸缩因子对强子混合物的描述在此处最不理想：在最中心的类别中，当拟合从约 0.35 GeV 以下开始时，拟合的 χ^2 增长速度快于自由度数量。因此，拟合从 0.405 GeV 开始，尽管谱的发布范围从 0.21 GeV 起，并在 2.05 GeV 处结束，以将其限制在谱的软部分；对于 Ne+Ne 3–4%，其给出$\chi^2/\mathrm{NDF} = 5.9/18$。

每个区间偏离纯缩放的程度，是式（6）在拟合 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 处的残差，

$$D_i = d_i - \bar{d} \tag{7}$$

针对 $0.405 < p_{\mathrm{T}} < 4.61$ GeV 进行评估，其中 d 取自拟合范围；最高的已发表区间 4.61–5 GeV 被排除，因为对于 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}} < 1$，其重新缩放后的区间超出了测得的 O+O 范围。根据构造，D_i在 S中平均为零，因此在 S 之外偏离纯粹缩放的情况表现为 $D_i \neq 0$。

在 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}} = 1$ 相同数量是图1(a)所示的匹配多重数下 Ne+Ne 谱与 O+O 谱的对数比值，

$$\ln R_{\mathrm{matched},i} = \ln \frac{N_{\mathrm{Ne}}(l_i,h_i)}{N_{\mathrm{O}}(l_i,h_i)} - \left\langle \ln \frac{N_{\mathrm{Ne}}}{N_{\mathrm{O}}} \right\rangle_S, \tag{8}$$

其中，N_{O} 是公式（2）中匹配多重数下的 O+O 产额，而 $\langle\rangle_S$ 是拟合范围内、采用公式（6）的权重 $1/\sigma_i^2$ 得到的加权平均值。随后，差值 $\ln R_{\mathrm{matched},i} - D_i$ 就是采用拟合得到的 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$进行精确重标度时预期的比值，并在图1(a)中以曲线表示。

D. 不确定度和验证

公式（6）的逐点不确定度 σ_i 由统计和系统两部分组成。统计部分来自 Ne+Ne 的 c类别谱和匹配多重数 m 下的 O+O 谱，二者通过平方和开方相加；而进入两个已发表比值的 O+O 类别-c和 70–80% 谱不作贡献，因为已发表比值的统计不确定度是各谱统计不确定度的平方和开方。

系统部分结合了 Ne+Ne/O+O 比值与 O+O 从类别c 到 m的阶跃变化所对应的不确定度；后者根据 O+O 比值相对于 70–80% 类别的系统不确定度 σ_{O}计算得出。当已发表的谱及其比值的系统不确定度具有不对称性时，则采用向上和向下数值的平均值。在拟合范围内，σ_{O} 在 1 GeV 以内低于 1%，并在 2 GeV 时升至约 2%；相比之下，相同中心度下的 Ne+Ne/O+O 比值在中心度类别中的不确定度已知为 0.1–0.3%，因此 O+O 阶跃变化占主导，除非采用类别之间的相关性 σ_{O}。

已发表的 σ_{O} 在从 0–1% 到 35–40% 的所有类别中几乎相同（在 1 GeV 时为 0.76–0.86%），其来源对所有类别均相同 [25]。所有类别共有的部分在计算差值时会抵消，剩下类别相关部分的差值 $|B(c) - B(m)|$ B。如果所有来源的这些部分在相邻类别之间都朝同一方向变化，则该差值的上限为平方和之差 $|\sigma_{\mathrm{O}}^2(c) - \sigma_{\mathrm{O}}^2(m)|^{1/2}$，此值用于所有类别。这种处理基于两个假设，而已发表表格未按来源细分系统不确定度，且

未给出类别之间的相关性，因此无法检验这两个假设：共有部分在所有类别中相同且完全相关，以及所有来源的类别相关部分均朝同一方向变化。因此，所有结果也都按下文定义的不相关极限给出，该极限不依赖这两个假设。中心度高于 40% 时，将该差值线性加到 Ne+Ne/O+O 比值的不确定度上，因为中心度测定（在 O+O 碰撞中有 ± 2.2 % 的不确定度，在 Ne+Ne 碰撞中有 ± 2.5% 的不确定度 [25]）会同时影响两者，且不会在该比值中抵消。

由这些统计和系统部分构成的不确定度称为名义逐点不确定度。在不相关极限这一保守替代方案中，将 O+O 类别 c 和匹配的 O+O 谱的已发表总不确定度进行平方和开方。在这两种情况下，都通过重新拟合来评估九种来源 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$，并将其平方和开方：(i) 在 Ne+Ne/O+O 比值的不确定度范围内对其进行相干扭曲（取 0.3–3 GeV 范围内倾斜、全范围倾斜和曲率三者中的最大值）；(ii) 对 O+O 从 c到 m的阶跃进行同样处理；(iii) 使用二次插值而非线性插值；(iv) 将匹配多重数改变 ± 1%，即中心度类别中 $r_{\mathrm{Ne/O}}$ 已发表不确定度的 10–14 倍，或在该不确定度更大时按其变化（外围类别中最高为 2.2%）；(v) 使用基准 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$($p_{\mathrm{T}} > 0.27$ GeV) 而非外推值进行匹配；(vi) 拟合范围，即在下边界为 0.405、0.5 和 0.6 GeV，上边界为 1.16、1.48、1.89 和 2.41 GeV 的十二种组合中产生的最大偏移；(vii) 拟合的低端边界，即拟合从 0.27 或 0.30 GeV 开始时较大的偏移；(viii) 拟合的不确定度（$\Delta\chi^2 = 1$ 采用名义权重时会高估该不确定度；见 III A 节）；以及 (ix) 拟合权重，采用不相关极限权重或均匀权重时较大的偏移。来源 (i)、(ii) 和 (viii) 使用相同的已发表逐点不确定度，因此其平方和开方是保守的。所得 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$总不确定度记为 σ_{nom}，在不相关极限下则记为 σ_{unc} 。对于 Ne+Ne 3–4% 类别，σ_{nom} 为 0.0032，主要来自匹配多重数、拟合范围、拟合低端边界和匹配变量的变化（各为 0.0013–0.0016）；σ_{unc} 为 0.0094，主要由 O+O 阶跃的形状决定。

对精确重标度后的已发表谱进行闭合检验，可恢复 λ 到 10^{-5}；另一套独立实现采用谱的三次样条模型、自行进行多重数插值，并在$0.405 < p_{\mathrm{T}} < 1.5$ GeV范围内进行无权重拟合，在测试的六个类别中，其结果与主要分析的差异均在 $|\Delta\lambda| \leq 0.0011$ 以内。

使用 O+O 数据单独检验分配给每个类别的单一多重数（第 II B 节）：将已发表的宽类别与插值到相同多重数的较窄类别进行比较，结果应为 $\lambda = 1$。从 20% 到 80% 的 10% 宽类别与 1 的偏差在 0.001 以内，而将 0–5% 类别与 1% 宽类别比较时，偏差约为 0.002。不同宽度的类别仅在两个 Ne+Ne 类别的匹配中出现。Ne+Ne 5–10% 与 1% 宽的 O+O 类别匹配；由于其涵盖的多重数范围窄于 O+O 0–5%，因此该效应低于 0.002，而它使 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 增加。Ne+Ne 10–15% 与 O+O 4–5% 和 5–10% 类别（附录A）匹配，相应的混合宽度 O+O 检验与等宽类别之间的检验相比，差异约为 0.001。

III. 结果

A. 匹配多重数下的谱

图1(a)展示了三个 Ne+Ne 中心度类别的 $\ln R_{\mathrm{matched}}$（式(8)）。对于 3–4% 中心度类别，该比值随 p_{T}持续下降：在相同多重数下，Ne+Ne 碰撞在低 p_{T} 处产生的粒子相对更多，在高 p_{T} 处产生的粒子则少于 O+O 碰撞。曲线表示采用拟合得到的 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$进行精确重标度时预期的比值。只需对 p_{T} 轴进行一次伸缩，即可消除软区间内的差异：图1(b)所示的残差 D在展示的三个类别中，整个拟合范围内的绝对值均低于 0.5%。采用名义不确定度时，所有比较类别的拟合结果均为 $\chi^2/\mathrm{NDF} = 0.005$–0.38，因为这些不确定度主要由在 p_{T}中相关的系统部分主导；因此，它们无法检验重标度假设。仅采用统计不确定度时，3–4%类别在 18 个自由度下的 χ^2 为 24.2，大多数其他类别为 15.2–34.9，但 10–15%和 15–20%类别分别为 68.1 和 49.0；采用这些权重时，$\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 的变化至多为 0.0005。额外加入指数倾斜（即 d_i中与p_{T} 成线性关系的一项），可使名义 χ^2 最多降低 4.2，但会使$\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 进一步偏离 1：3–4%类别偏离 0.0082，其他类别（中心度不超过 70%）最多偏离 0.0156。在拟合范围内，伸缩与倾斜几乎简并，而 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 是单参数描述中的伸缩。对于超出拟合范围的 $2.05 < p_{\mathrm{T}} < 4.61$ GeV，3–4%和 10–15%中心度类别的残差在每个数据点上均为正，并随 p_{T} 增大，在 4.4 GeV处最高达到 2.6%；只有采用名义不确定度时，这一结果才具有显著性。对于 40–45%中心度类别，残差始终处于名义不确定度范围内。下文的伸缩因子均在软区间内拟合。

B. 伸缩因子的多重度依赖性

图2展示了 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 不同Ne+Ne中心度类别（3%至80%）在其$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$处绘制的结果；数值列于附录A中。在所比较的最中心类别3–4%中，$\lambda_{\mathrm{Ne/O}} = 0.9692$：在$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta = 145.0$ 处，Ne+Ne谱沿 p_{T} 轴压缩了3.1%，即为O+O谱的压缩版本。随着多重数降低，伸缩因子升高，在$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta = 107.5$（10–15%）处达到0.9852，在$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta = 80.0$（20–25%）处达到0.9931。从35%中心度开始，$\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 与1一致。在标称不确定度下，从3%至20%中心度的类别中，偏离1的程度介于 3.5σ（10–15%）和 9.5σ（3–4%）之间，而在20%至35%之间低于 3σ 。从40%中心度开始，所有数值均介于

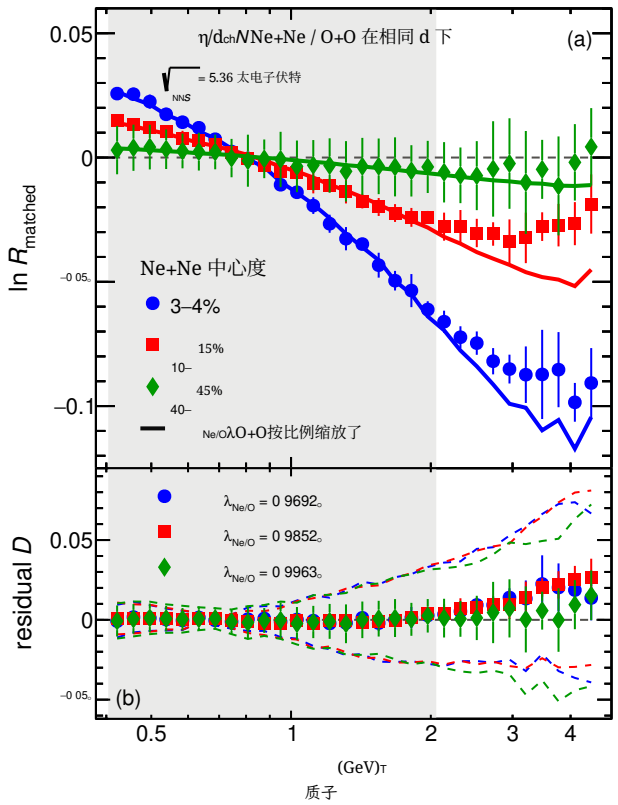

图1。（a）在相同的 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 条件下，Ne+Ne 谱与 O+O 谱的对数比值 $\ln R_{\mathrm{matched}}$，其中 $|\eta| < 0.5$ 的数据来自文献 [25]。曲线表示 $\ln R_{\mathrm{matched}} - D$，即采用拟合得到的 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$、公式（3）进行精确重标度时预期的比值。（b）偏离纯缩放的残差 D，公式（7）。误差棒表示名义的点对点不确定度，已合并统计和系统不确定度（第二节D）；（b）中的虚线表示不相关极限下的不确定度。阴影区域标示拟合范围。

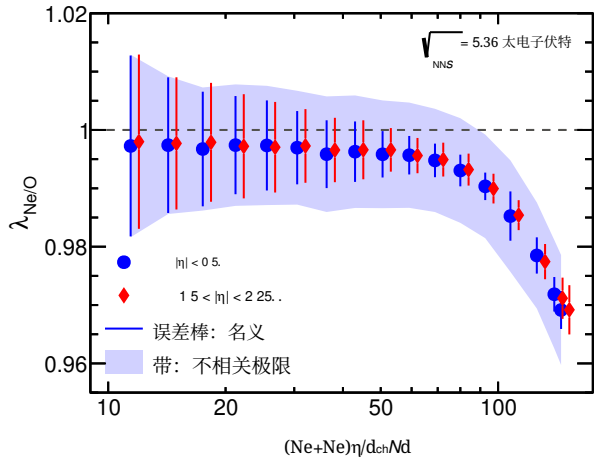

图2。伸缩因子 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 随 Ne+Ne 中心度类别的 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 变化的关系，分别对应中快度和前向赝快度处的谱。误差棒表示名义不确定度；仅针对 $|\eta| < 0.5$ 绘制的带表示不相关极限下的不确定度。为便于观察，前向数据点沿水平方向进行了平移。

0.9958和0.9974之间（中快度处），存在约0.3%的共同偏移，远在不确定度范围内；这些不确定度在这些类别之间具有相关性。在不相关极限下，3–4%和4–5%中心度类别的偏离分别为 3.3σ 和 3.0σ，其他类别则更小：只有与O+O 0–2%类别匹配的两个类别在该极限下达到 3σ，且对这些类别的解释受到限制（第四节A）。相邻的 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 数值具有相关性，因为它们共用O+O输入类别以及已发表比值的系统不确定度，因此，图2中的平滑趋势本身并不能检验不确定度的大小。

$1.5 < |\eta| < 2.25$ 处的谱来自相同事件，但来自不同径迹，这些径迹是在探测器的不同部分重建的。对于相同的中心度类别和匹配多重数，使用这些谱重复了分析。结果也列于附录A中，在所有比较的中心度类别中与中快度处的结果一致，差异在0.12%以内；对于3–4%类别，$\lambda_{\mathrm{Ne/O}} = 0.9692 \pm 0.0042$。由于中心度类别，多重数匹配和 O+O 插值是相同的，因此这一比较检验的是径迹重建和拟合，而非多重数匹配。

C. 匹配多重数下的平均横向动量

已发表的 $\langle p_{\mathrm{T}} \rangle$值衡量了软化程度，未采用重标度假设，也未进行谱拟合。这些值由相同的谱推导而来，并为 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 提供了一项依赖较少假设的交叉检验。图3(a) 展示了 $p_{\mathrm{T}} > 0.27$ GeV时已发表的 $\langle p_{\mathrm{T}} \rangle$ 随同一 p_{T} 范围内已发表的$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 的变化。相同多重数下，Ne+Ne的值低于O+O；而中心度相同的类别具有几乎相同的 $\langle p_{\mathrm{T}} \rangle$。

匹配多重数下 $\langle p_{\mathrm{T}} \rangle$ 的比值由已发表的等中心度比值以及O+O从类别 c到匹配多重数的变化构成，

$$\rho = \left[\frac{\langle p_{\mathrm{T}} \rangle_{\mathrm{Ne}}}{\langle p_{\mathrm{T}} \rangle_{\mathrm{O}}}\right]_c \times \frac{\langle p_{\mathrm{T}} \rangle_{\mathrm{O}}(c)}{\langle p_{\mathrm{T}} \rangle_{\mathrm{O}}(m)}, \tag{9}$$

其中 $\langle p_{\mathrm{T}} \rangle_{\mathrm{O}}(m)$在$\ln \mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$中进行线性插值。比值 ρ 仅使用已发表表格： $\langle p_{\mathrm{T}} \rangle$ 值，以及用于确定匹配多重数 m的$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 值。

对于精确重标度， $\langle p_{\mathrm{T}} \rangle$ 在相应的缩放窗口中满足 $\langle p_{\mathrm{T}} \rangle_{\mathrm{Ne}} = \lambda_{\mathrm{Ne/O}} \langle p_{\mathrm{T}} \rangle_{\mathrm{O}}$，但已发表的数值是对同一固定阈值以上的区域积分所得，并包含 0.27–0.405 GeV 以及 2 GeV 以上的区域，而这些区域不受拟合约束。因此，图3(b) 和表 I 将 ρ 与

表 I. 在匹配多重数下，已发表表格中的 Ne+Ne 与 O+O $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$（$p_{\mathrm{T}} > 0.27$ GeV）的比值 ρ，公式（9），其中多重数在基准 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 上进行匹配；以及对于选定 Ne+Ne 类别（图3中的所有类别），采用拟合 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 的重标度预测 ρ_{pred}，公式（10）。最后两列分别给出 ρ偏离 1 的程度，以其名义不确定度 $\sigma^{\rho}_{\mathrm{nom}}$ 和不相关极限下的不确定度 $\sigma^{\rho}_{\mathrm{unc}}$ 为单位；两者均采用不对称 O+O 系统不确定度中较大的一侧。

Ne+Ne 类别	ρ	ρ_{pred}	$(1-\rho)\ /\sigma^{\rho}_{\mathrm{nom}}$	$(1-\rho)\ /\sigma^{\rho}_{\mathrm{unc}}$
3–4%	0.9822	0.9800	18.6	6.6
4–5%	0.9837	0.9818	16.7	6.1
5–10%	0.9880	0.9862	15.4	4.3
10–15%	0.9918	0.9906	13.3	3.3
15–20%	0.9945	0.9939	12.4	2.2
20–25%	0.9961	0.9956	10.1	1.5
30–35%	0.9975	0.9973	5.6	0.9
40–45%	0.9980	0.9977	3.0	0.7

在相同窗口内拟合得到的 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 的预测进行比较，

$$\rho_{\mathrm{pred}} = \lambda_{\mathrm{Ne/O}} \frac{\langle p_{\mathrm{T}}\rangle_{\mathrm{O}}[0.27/\lambda_{\mathrm{Ne/O}},\ 5/\lambda_{\mathrm{Ne/O}}]}{\langle p_{\mathrm{T}}\rangle_{\mathrm{O}}[0.27,\ 5]}, \qquad (10)$$

其中，$\langle p_{\mathrm{T}}\rangle_{\mathrm{O}}[l,h]$ 是匹配多重数下，O+O谱在 l 与 h（单位为 GeV）之间的平均 p_{T}，见公式（2）；在5 GeV以上则按照最后一个区间的指数函数谱形延拓。已发表比值比预测更接近于1，在最中心类别中约相差0.002，而在外围碰撞中差异更小，这与将 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 传播到比值后得到的不确定度相当；部分差异源于根据指示性的 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 进行匹配，其符号也符合2 GeV以上为正的残差 D 所预期的结果。

已发表的 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 数值还独立给出了软化的显著性，不受谱不确定度的影响。 ρ的不确定度按照谱的方法（第二节D）构建，基于已发表的 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$不确定度，但采用不对称 O+O 系统不确定度中较大的一侧，并将匹配多重数改变 ±1%；后者主导了中心类别中的名义不确定度。采用名义不确定度时， ρ 偏离1的程度在截至35–40%的所有类别中均超过 4σ；在不相关极限下，截至10–15%类别则超过 3σ （表 I）。因此，在不相关极限下，10–15%中心度处的软化——此时匹配的 O+O 类别并非最中心的类别——在 ρ （3.3σ）中具有显著性，但在 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ （1.5σ）中不显著，因为与 p_{T}相关的系统不确定度相比， $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 比值对谱形的敏感性更低。

D. 对照比较：Xe+Xe 与 Pb+Pb

谱的重标度拟合（第二节 C）和 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 在匹配多重数下的比值（第三节 C）都依赖于多重数插值，这可能会.....

duce $\lambda < 1$ 出于与几何构型无关的原因。为检验

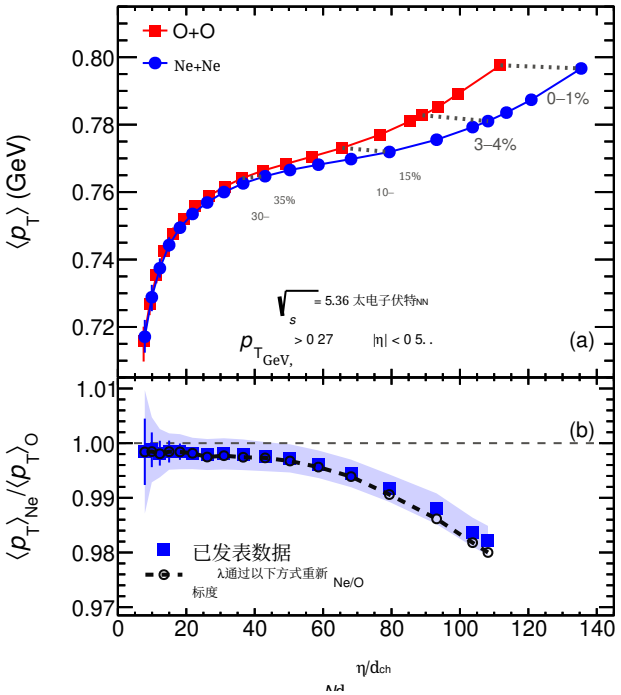

图3。（a）已发表的 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 与 O+O 和 Ne+Ne 碰撞中 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$（$p_{\mathrm{T}} > 0.27$ GeV，$|\eta| < 0.5$）的关系 [25]；实线连接相邻类别，点线连接具有相同中心度的类别。（b）在相同多重数下，Ne+Ne 与 O+O $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 的比值（公式（9））， 取 Ne+Ne 类别的 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$：已发表数据（方块；误差棒：名义不确定度；带：不相关极限，较大一侧）以及由拟合的 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$得到的预测，公式（10）（空心圆，虚线）。

该方法本身是否会产生 $\lambda < 1$，将相同的程序应用于一组较小的原子核位于前方的碰撞系统：Xe+Xe（$A = 129$）在 $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 5.44$ 太电子伏特下与 Pb+Pb（$A = 208$）在 $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 5.02$ 太电子伏特下的碰撞，使用 ALICE 在 $|\eta| < 0.8$ 个相同中心度类别中的带电强子谱以及 ALICE d$N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ [28, 29]。如果几何解释正确，预期结果应为 $\lambda \geq 1$，其符号与 Ne+Ne/O+O 相反。

这两个系统是在不同能量下测量的，因此需要进行修正。利用 Pb+Pb 碰撞在 5.02 和 2.76 太电子伏特下的数据，采用相同方法确定了固定多重数下的能量依赖性，其给出 $\lambda = 1.052$–1.062，并在 $\ln\sqrt{s_{\mathrm{NN}}}$ 中从 5.02 到 5.44 太电子伏特的区间内进行线性缩放（因子为 0.1343）。对于 λ，这给出因子 $E \approx 1.007$；在 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$测量的$p_{\mathrm{T}}$ 范围内采用相同程序得到 1.004–1.006。Xe+Xe/Pb+Pb 值除以这些因子。最小偏置质子-质子谱（在 5.02 太电子伏特下测量，并由 ALICE 内插至 5.44 太电子伏特）给出较小的因子（ λ为 1.0031）；其差异计入系统不确定度。ALICE 为每个点发布单一的系统不确定度，因此相关极限和不相关极限分别通过完全抵消以及将 Xe+Xe 和 Pb+Pb 的系统不确定度按平方和相加来定义。

能量修正后， λ(Xe/Pb)与

在所有可匹配的中心度类别中，均在不确定度范围内与1一致（70–80%的Xe+Xe类别低于Pb+Pb的多重数范围），且没有类别显著低于1（图4(a)）。按照公式（9）使用的ALICE $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 表格给出了相同结果（图4(b)）；与用于Ne+Ne/O+O的ATLAS基准值不同，这些数值包含了向 $p_{\mathrm{T}} = 0$的外推。ATLAS合作组在两个系统中测得的、针对 $0.5 < p_{\mathrm{T}} < 5$ GeV和 $|\eta| < 2.5$的事件平均 $\langle [p_{\mathrm{T}}]\rangle$ ，作为相同接受度范围内带电粒子数 N_{ch} 的函数 [30], ，显示Xe+Xe/Pb+Pb比值在 $N_{\mathrm{ch}} \approx 1500$之前约高于1%并且仅在相关极限下显著，在更高的 N_{ch}处接近1；而在Xe+Xe碰撞的超中心尾部则约高于1达2%（图4(c)）。

因此，匹配多重数程序本身并不会产生像在 Ne+Ne/O+O 碰撞中观测到的那样显著的软化。该控制测试检验的是方法，而非几何解释：匹配的 Pb+Pb 类别并非超中心碰撞，这不同于与最显著的 Ne+Ne 数值相匹配的 O+O 类别；此外，此处也未评估 Xe+Xe 和 Pb+Pb 面积差异大得多时预期的λ(Xe/Pb)。AT- LAS $\langle [p_{\mathrm{T}}]\rangle$ 比值倾向于略高于 1，这一符号与几何构型的预期一致；但仅凭 ALICE 数据无法确定这一符号，因为其系统不确定度较大，而且能量修正与该效应本身一样大。

IV. 讨论

A. 相同中心度与相同多重数

在相同中心度下，Ne+Ne 和 O+O 的谱形几乎相同 [25], ；而在相同多重数下，Ne+Ne 的谱更软。拟合分解将这两项观察联系起来。对于 3–4%类别，将 Ne+Ne 谱拟合到相同中心度类别的 O+O 谱，得到 $\lambda = 0.9979$，形状差异为 0.2%；将该类别的 O+O 谱拟合到匹配多重数下的 O+O 谱（后者高 21%），得到 $\lambda = 0.9712$。两者的乘积 0.9691 重现了匹配值 0.9692。因此，相同多重数下的软化，就是 O+O 的多重数提高到 Ne+Ne 数值时其谱的硬化。该结果结合了两项已发表的观察结果：相同中心度下几乎相同的谱形，以及 O+O 谱的多重度依赖性；并量化了由此得到的结论：在中心碰撞中，谱形更紧密地随中心度类别变化，而不是随多重数变化。

硬化幅度较大，是因为 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 在最中心的碰撞中随多重数急剧上升：在两个最中心类别之间，对数斜率 $a = \mathrm{d}\ln\langle p_{\mathrm{T}}\rangle / \mathrm{d}\ln(\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta)$ 在 O+O 中为 0.091，在 Ne+Ne 碰撞中为 0.103；在 O+O 碰撞中，中心度为 3–10% 时该斜率降至约 0.05，中心度为 10–35% 时降至 0.018–0.023。当多重数增加而重叠几何形状几乎不变时，预期会出现如此陡峭的上升，因此密度会增加 [15, 16, 32]。与 Ne+Ne 3–5% 匹配的 O+O 碰撞属于最中心的 0–2%，其多重数对于 O+O 系统大小而言异常偏高，而且其筛选取决于中心度估计量；这限制了对 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$最中心数值的解读。当匹配的 O+O 类别并非最中心类别时，软化仍然存在：Ne+Ne 10–15% 与 O+O 4–10% 匹配，对应 1.5% 的压缩。

B. 对系统大小的诠释

在相同的 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 下，两个系统产生的单位快度熵大致相同，因此，Ne+Ne 碰撞中的初始态横向面积大于 O+O 碰撞，就意味着更小的初始熵密度。在流体动力学膨胀中，较低的熵密度意味着较低的有效温度和较弱的横向压力梯度，因而产生更软的末态谱 [15, 20, 21]。数据在两个方面与这一图像定性一致：其排序关系为 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}} < 1$，以及该效应在外围碰撞中减弱；在外围碰撞中，重叠区域更多地由少数参与核子的位置决定，而非由原子核的大小决定。

这种排序本身并不能确定其是否源于流体动力学。在初始态饱和模型中， $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 与饱和动量 Q_s 成正比，其中 Q_s^2 与 $(\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta)/S_\perp$ 成正比； $S_\perp$ 是横向面积，而在多重数相同的情况下，更大的面积同样会产生更软的谱 [24]。数据约束的是谱形对横向密度的依赖，而不是产生这种依赖的机制。Ref. [25] 中与数据比较的流体动力学和 EPOS 计算，给出了若干核结构模型在相同中心度下的 Ne+Ne/O+O 比值；至于它们是否也能在匹配的多重数下重现 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 和 ρ ，以及这些量是否能够区分不同的核结构模型，则无法利用已发表的材料进行检验，因为模型计算并未包含在该测量的 HEPData 记录中。

本分析并未直接测量熵密度、横向尺寸或径向流速度。 p_{T} 轴上的延展可能由径向流速度、动能冻结温度或两者共同变化所致。对于带电强子， $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 是粒子混合物的有效参数；分析假设在多重数相同的情况下，Ne+Ne 与 O+O 碰撞中的强子组成相同。这一假设得到如下观察的支持：pp、质子+Pb 和 Pb+Pb 碰撞中已鉴别强子产额的比值主要取决于多重数，而较少取决于碰撞系统 [33]。目前尚无 O+O 和 Ne+Ne 碰撞中心度类别中的已鉴别粒子谱；在最小偏置 O+O 碰撞中，利用奇异强子测得的重子介子比有所升高，相较于

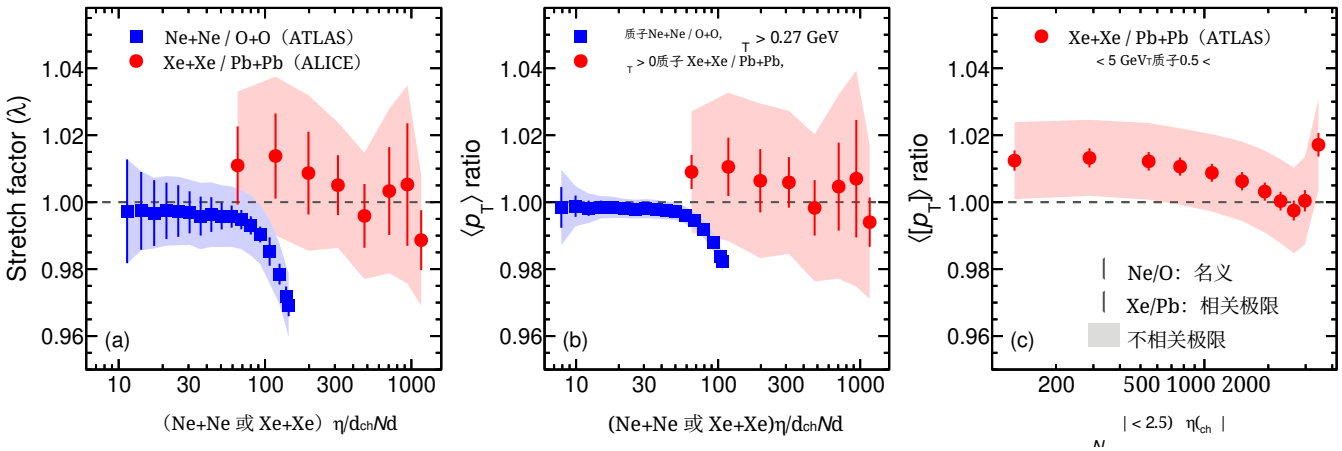

图4。Ne+Ne/O+O的匹配多重数比较 [25], 先列较大核，而Xe+Xe/Pb+Pb对照组则先列较小核。(a) 伸缩因子 λ；Xe+Xe/Pb+Pb数据来自ALICE [28, 29]。(b) 已发表的 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 在匹配多重数下的比值，公式（9）；Xe+Xe/Pb+Pb数据为由ALICE数值外推至 $p_{\mathrm{T}} = 0$的结果。(c) Xe+Xe/Pb+Pb在相同 N_{ch} [30]下的 $\langle[p_{\mathrm{T}}]\rangle$ 比值。Xe/Pb比值已针对能量差进行修正。误差棒：名义不确定度（Ne/O）或相关极限（Xe/Pb）；带：不相关极限。

pp 碰撞 [34]。即使匹配多重数，也无法消除初始条件中的所有差异，例如初始密度的形状及其涨落。

为将 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 与流速度和冻结温度联系起来，将玻尔兹曼–吉布斯爆炸波参数化 [18] 拟合于ALICE合作组在 $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 5.02$太电子伏特下Pb+Pb碰撞中测得的已鉴别强子谱，这些谱来自50–60%和60–70%的中心度类别 [31], ，其多重数涵盖了所比较的中心Ne+Ne类别。利用这些拟合结果构建带电强子谱，在固定各物种产额的情况下，改变平均横向流速度 $\langle\beta_T\rangle$ 或动能冻结温度 T_{kin} ，并通过第 II C 节的拟合得到 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ 。3–4%类别的0.9692对应于在固定 T_{kin}时，将 $\Delta\langle\beta_T\rangle = -0.008$ 改变至 -0.009 ，或在固定 $\langle\beta_T\rangle$时，将 $\Delta T_{\mathrm{kin}} = -4.7$ 改变至 -5.2 MeV。这两种变化在形状上有所不同：考虑3–4%类别的不确定度时，纯伸缩可以描述 T_{kin} 的变化，其$\chi^2 = 2.2$–3.9对应18个自由度；但 $\langle\beta_T\rangle$ 的变化仅为 $\chi^2 = 52$–70，因此数据（$\chi^2 = 5.9$）更类似于冻结温度的变化，而不是单独的流速度变化；不排除两个参数同时发生变化的可能性。在这两种情况下，π介子伸缩幅度最大，质子最小，而温度变化时这一差异更加明显。

C. 相同平均横动量下的多重数比

也可以反过来进行比较：不再考察 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$在相同多重数下的情况，而是确定两个系统具有相同 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 时的多重数。图5(a)显示了该因子

$$k = \frac{\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta|_{\mathrm{Ne}}(c)}{\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta|^{*}_{\mathrm{O}}}, \qquad \langle p_{\mathrm{T}}\rangle_{\mathrm{O}}\left(\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta|^{*}_{\mathrm{O}}\right) = \langle p_{\mathrm{T}}\rangle_{\mathrm{Ne}}(c), \tag{11}$$

Ne+Ne类别的多重数超过O c O碰撞在相同N_{ch}/下的多重数的比值，其中$\eta|^{*}_{\mathrm{O}}$ GeV。O+O $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$在ln d $p_{\mathrm{T}} > 0.27$ d+中进行线性插值，而Ne $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ Ne的数值则由相同类别的ON_{ch}/O数值结合已发表的相同中心度比值ηd+d+(N =) $N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta|_{\mathrm{Ne}}dc$(/)以及$N_{\mathrm{ch}}/\eta|_{\mathrm{O}}(c)$ M =($\langle p_{\mathrm{T}}\rangle_{\mathrm{Ne}}$)得到。如果O$c$O的/$\langle p_{\mathrm{T}}\rangle_{\mathrm{O}}$在交点附近以对数斜率$c$上升，则方程（）给出+。不同于 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ ，对于Ne

$$NM^{-1/a} \qquad a \qquad 11 \qquad k = \qquad k$$

Ne的0–3%类别也可以确定 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$，因为其+位于O $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ O数值的范围内。对于0–1%类别，+。名义不确定度采用与谱相同的相关性假设构建；在不相关极限下，通过将Ne $k = 1.227 \pm 0.005$Ne的 ± 0.020 相对于所有O+O数值移动 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 倍O+O的系统不确定度，可得到$\sqrt{2}$ 的上限。该类别在相同中心度下的多重数比为1.211，并且相同中心度下的+数值仅相差0.12%（ $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ ），因此$M = 0.99882$主要由 k 决定。在1%至15%的中心度范围内， N为1.25–1.30，随后向1减小。横向面积比预计不会呈现这种行为：在最中心类别之外，较小的斜率 k 会放大 a偏离1的微小程度，因此下文仅讨论0–1%类别的数值。

第IV B节中的图示将因子 k 转化为面积比的估计值。平均横动量参数化为

$$\ln\langle p_{\mathrm{T}}\rangle = a \ln \frac{\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta}{S_{\perp}} + \frac{\gamma}{2}\ln S_{\perp} + \mathrm{const}, \tag{12}$$

其中， $S_\perp$ 为有效横向面积，密度系数 a 描述对横向密度的依赖，尺寸系数 γ 描述在密度固定时对尺寸的依赖：在密度固定时， $S_\perp \propto R^2$、 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle \propto R^\gamma$ 。系数 a是经验性的，不能将其认定为声速平方 c_s^2：O+O斜率是在宽度为1%的中心度类别之间测得的，在这些类别中，几何构型仅近似固定；即使几何构型固定，这种认定也并不一定成立 [35]。对于具有相同中心度的Ne+Ne和O+O类别，在 N 和 M 如上所述的情况下，式（12）给出有效面积的比值，

$$\frac{S_\perp^{\mathrm{Ne}}}{S_\perp^{\mathrm{O}}} = \exp\left(\frac{a\ln N - \ln M}{a-\gamma/2}\right). \tag{13}$$

对于 $\gamma = 0$， $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 仅取决于密度，因此相等的 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$意味着密度相等，而相同 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$下的面积比就是多重数比：取 $a = 0.091$时，根据 O+O 碰撞中两个最中心度类别之间的斜率，式（13）给出 0–1%类别的数值为 1.227，即 k 的值。图5(b)展示了该类别下的式（13）（$N = 1.2112$, $M = 0.99882$）。对于$\gamma = 0$ ，当斜率 a 介于 0.091 和 0.25 之间时，面积比为 1.217–1.227；后者接近超中心 Pb+Pb 碰撞中测得的斜率 0.241 ± 0.016 [16], 大于（$20/16)^{2/3} = 1.160$，也就是半径与 $A^{1/3}$成正比时的数值；它还接近 1.240，即 ^{20}Ne（3.0055 fm）与 ^{16}O（2.6991 fm）的实测均方根电荷半径之比的平方 [36]。正的 γ 会增大面积比，而式（13）在 $\gamma = 2a$处发散，因此结果对 γ非常敏感；要得到 1.160， γ 必须介于 -0.07 和 -0.16之间，而此处无法确定 γ 。与电荷半径的一致也可能部分出于偶然，因为在 $\gamma = 0$ 时，面积比接近 N，而在中心碰撞中，该值接近参与核子数之比。电荷半径包含质子的电荷分布，并非核子密度分布的半径；有效面积也包含核子宽度的影响，这使预期比值更接近 1。此外，在不相关极限下，电荷半径对应的数值落在 k 不确定度的上限范围内； $S_\perp$ 是被选为最中心 0–1 %的碰撞的有效面积，它与核半径的关联仅通过一个初态模型建立 [37, 38]。因此，与电荷半径的比较只能作为参考，并不能测量核尺寸。

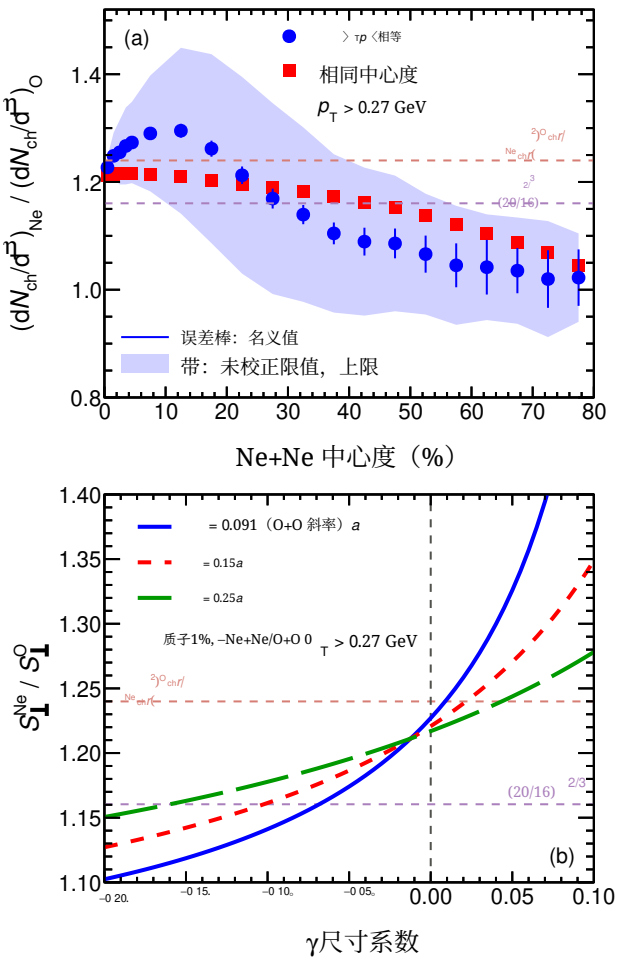

图5。（a）对于 $p_{\mathrm{T}} > 0.27$ GeV，Ne+Ne/O+O 的多重数比在相同 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$、 k以及相同中心度下随 Ne+Ne 中心度的变化；误差棒：名义不确定度；带：不相关极限下的上限。（b）0–1% 类别中有效横向面积的比值（式（13））随尺寸系数 γ 的变化，分别对应密度系数 a 的三种取值（$a = 0.091$：O+O 在 0–1 % 与 1–2%类别之间的斜率； $a = 0.15$：中间值； $a = 0.25$：接近超中心 Pb+Pb 斜率 [16]）；在所示范围内，来自已发表比值的相对不确定度最大为 0.6%，竖线表示 $\gamma = 0$。虚水平线：$(20/16)^{2/3}$ 以及 ^{20}Ne 与 ^{16}O 的均方根电荷半径平方比 [36]。

V. 总结与展望

ATLAS合作组发表的带电强子谱 [25] ，针对Ne+Ne和O+O碰撞，在$\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 5.36$ 太电子伏特下进行了比较，且多重数相同多重数，其中将 O+O 的测量值插值到 Ne+Ne 各中心度类别对应的 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 处，范围为 3% 至 80%。在相同多重数下，Ne+Ne 的谱更软。已发表 $\langle p_{\mathrm{T}}\rangle$ 值的比值为：Ne+Ne 3–4% 时为 0.9822，Ne+Ne 10–15% 时为 0.9918， 6.6σ 并且即使 O+O 的系统不确定度在不同中心度类别之间不相关， 3.3σ 仍低于 1。在$0.4 < p_{\mathrm{T}} < 2$ GeV处，对于 Ne+Ne 3–4%类别，这一差异可由伸缩因子 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}} = 0.9692 \pm 0.0032$ 描述；如果 O+O 系统不确定度的共同部分在类别之间相互抵消，则 9.5σ低于 1；如果不抵消，则为 3.3σ (± 0.0094)；随着多重数降低，它逐渐趋近于 1，并且从大约 35%中心度开始与 1 一致。前向赝快度谱给出的伸缩因子在 0.12% 以内相同，而 Xe+Xe/Pb+Pb 对照表明，该方法本身不会产生如此显著的软化。

由于相同中心度下的谱形几乎相同，在中心碰撞中，谱形与中心度类别的关系比与多重数的关系更为密切。如果在相同多重数下横向面积更大，会产生更软的谱，那么这种排序正是预期结果；流体动力学图像和初态饱和图像都给出了这一预期，而数据无法区分二者。在爆炸波模型描述中，3–4%类别的拉伸对应于动能冻结温度降低约 5 MeV，或平均横向流速度降低 0.008–0.009；其谱形更接近于温度变化所产生的形状。在 0–1%类别中，超出 O+O 多重数范围后，Ne+Ne 碰撞在比 O+O 碰撞高 23% 的多重数下达到相同的 $\langle p_{\mathrm{T}} \rangle$ （$k = 1.227 \pm 0.005$）。

在匹配多重数下对 O+O 和 Ne+Ne 碰撞的横向面积进行计算，并对以相同方式分析的谱开展流体动力学或输运计算，是将当前结果转化为对 ^{16}O 和 ^{20}Ne 结构约束所必需的。按来源公布 O+O 系统不确定度的分解结果，将有助于在此给出的两种显著性估计之间作出判断。在细分中心度类别中测量已鉴别粒子谱，将能够分别对 π介子、K介子和质子进行相同的比较，从而区分流速度的变化与冻结温度的变化，因为二者所预言的质量排序不同。

致谢

作者感谢Somadutta Bhatta博士就ATLAS数据的系统不确定度进行的有益讨论。本研究得到OSHEC、高等教育部、奥迪沙邦政府的支持，项目编号为23EM/PH/124，隶属MRIP 2023。

数据可用性

所有输入数据均已在 HEPData 中公开：记录 181329.v1 [25]，85727.v3 [28]，86210.v1 [29],153671.v1 [30]，104923.v1 [31]和 146016.v1 [16]。分析代码可根据合理请求向作者获取。

附录A：拉伸因子与多重数匹配

表 II 列出了所有十七个参与比较的 Ne $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$ Ne 类别在中快度和前向赝快度处的伸缩因子，以及其名义不确定度；此外还列出了中快度处不相关极限下的不确定度。表 III 按中心度类别列出了两个系统的多重数、已发表比值 $r_{\mathrm{Ne/O}}$、两个 O+O 类别，以及公式（2）中用于获得多重数与 Ne+Ne 类别相同的 O+O 谱的权重。由于$r_{\mathrm{Ne/O}} > 1$，每个 Ne+Ne 类别都与更中心的多个 O+O 类别匹配；从中心度 40% 起，则与相同中心度的 O+O 类别以及下一个更中心的类别匹配。在中心度不超过 10% 的类别中，比值为 1.21–1.22；在 75–80% 类别中降至 1.05。因此，随着碰撞趋于外围，匹配的 O+O 类别逐渐接近相同中心度的 Ne+Ne 类别。

[1] J. Brewer、A. Mazeliauskas 和 W. van der Schee, arXiv:2103.01939（2021年）。[2] J. L. Nagle 和 W. A. Zajc，核与粒子科学年评 **68**，211（2018年），arXiv:1801.03477。[3] J. F. Grosse-Oetringhaus 和 U. A. Wiedemann, arXiv:2407.07484（2024年）。[4] S. Huang、Z. Chen、J. Jia 和 W. Li, 《物理评论 C 》 **101**，021901 2020 1904 10415 ( )，arXiv: . .[5] W. Broniowski 和 E. Ruiz Arriola, 《物理评论快报》 **112**，112501（2014年），arXiv:1312.0289。[6] C. Zhang、J. Chen、G. Giacalone、S. Huang、J. Jia 和马余刚，《物理学快报 B》**862**，139322（2025年），arXiv:2404.08385。[7] G. Giacalone 等，《物理评论快报》**135**，012302（2025年），arXiv:2402.05995。[8] ALICE合作组，I. J. Abualrob 等，《物理评论快报》**137**，082301（2026年），arXiv:2509.06428。[9] ATLAS合作组，G. Aad 等，《物理评论C》**113**，045205 2026 2509 05171 ( )，arXiv: . .[10] CMS合作组，A. Hayrapetyan 等，《物理评论快报》**137**，082302（2026年），arXiv:2510.02580。[11] S. H. Lim 等，《物理评论C》**99**，044904（2019年），arXiv:1812.08096。[12] M. D. Sievert和J. Noronha-Hostler，《物理评论C》**100**，024904（2019），arXiv：1901.01319。[13] B. Schenke、C. Shen和P. Tribedy，《物理评论C》**102**，044905（2020），arXiv：2005.14682。[14] G. Nijs和W. van der Schee，《物理评论C》**106**，044903（2022），arXiv：2110.13153。[15] F. G. Gardim 等，《自然·物理》**16**，615（2020），arXiv：1908.09728。[16] CMS合作组，A. Hayrapetyan 等，《物理学进展报告》**87**，077801（2024），arXiv：2401.06896。[17] G. Giacalone、B. Schenke和C. Shen，《物理评论快报》**128**，042301（2022），arXiv：2111.02908。[18] E. Schnedermann、J. Sollfrank和U. W. Heinz，《物理评论C》**48**，2462（1993），arXiv：nucl-th/9307020。[19] U. Heinz和R. Snellings，《核与粒子科学年评》**63**，123（2013），arXiv：1301.2826。[20] W. Broniowski、M. Chojnacki和L. Obara，《物理评论C》**80**，051902（2009），arXiv：0907.3216。[21] P. Bozek和W. Broniowski，《物理评论C》**85**，044910（2012），arXiv：1203.1810。[22] ATLAS合作组，G. Aad 等，《物理评论快报》**136**，032301（2026），arXiv：2503.24125。[23] ALICE合作组，S. Acharya 等，《物理评论快报》**136**，032302（2026），arXiv：2504.04796。

表 II. 在相同 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 下，Ne+Ne 谱相对于 O+O 谱的伸缩因子 $\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$，见公式（3）。对于 $|\eta| < 0.5$：总名义不确定度 σ_{nom}、不相关极限下的总不确定度 σ_{unc}，以及以各自不确定度为单位表示的偏离 1 的程度；对于 $1.5 < |\eta| < 2.25$：名义不确定度。$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ 是 Ne+Ne 类别在 $|\eta| < 0.5$ 时的数值，并外推至 $p_{\mathrm{T}} = 0$（表 III）。

		$\lvert\eta\rvert < 0.5$					$1.5 < \lvert\eta\rvert < 2.25$	
Ne+Ne 类别	$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$	$\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$	σ_{nom}	σ_{unc}	$(1-\lambda_{\mathrm{Ne/O}})/\sigma_{\mathrm{nom}}$	$(1-\lambda_{\mathrm{Ne/O}})/\sigma_{\mathrm{unc}}$	$\lambda_{\mathrm{Ne/O}}$	σ_{nom}
3–4%	145.0	0.9692	0.0032	0.0094	9.5	3.3	0.9692	0.0042
4–5%	139.3	0.9718	0.0030	0.0093	9.5	3.0	0.9712	0.0035
5–10%	125.7	0.9785	0.0031	0.0091	6.9	2.4	0.9774	0.0030
10–15%	107.5	0.9852	0.0042	0.0096	3.5	1.5	0.9854	0.0026
15–20%	92.7	0.9903	0.0024	0.0089	4.1	1.1	0.9900	0.0025
20–25%	80.0	0.9931	0.0027	0.0090	2.6	0.8	0.9932	0.0027
25–30%	68.9	0.9948	0.0029	0.0088	1.8	0.6	0.9949	0.0029
30–35%	59.2	0.9957	0.0033	0.0090	1.3	0.5	0.9956	0.0030
35–40%	50.5	0.9958	0.0040	0.0092	1.0	0.5	0.9966	0.0037
40–45%	43.0	0.9963	0.0052	0.0096	0.7	0.4	0.9966	0.0051
45–50%	36.3	0.9958	0.0058	0.0099	0.7	0.4	0.9966	0.0055
50–55%	30.5	0.9970	0.0063	0.0098	0.5	0.3	0.9973	0.0063
55–60%	25.5	0.9973	0.0077	0.0102	0.3	0.3	0.9970	0.0078
60–65%	21.2	0.9974	0.0084	0.0104	0.3	0.2	0.9972	0.0089
65–70%	17.5	0.9967	0.0098	0.0105	0.3	0.3	0.9979	0.0102
70–75%	14.2	0.9974	0.0116	0.0118	0.2	0.2	0.9977	0.0113
75–80%	11.4	0.9973	0.0155	0.0156	0.2	0.2	0.9980	0.0149

表 III。多重数匹配。对于每个中心度类别：O+O 和 Ne+Ne 中的 $\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$ ($|\eta| < 0.5$，外推至 $p_{\mathrm{T}} = 0$)，后者来自公式（1）；已发表比值 $r_{\mathrm{Ne/O}}$；包围 Ne+Ne 多重数的 O+O 类别 1 和 2（中心度以 % 表示），以及公式（2）中类别 1 的权重 $w_1 = 1 - w_2$。短横线表示：Ne+Ne 多重数高于最中心的 O+O 类别，因此该类别未被使用。

中心度	$\mathrm{d}N_{\mathrm{ch}}/\mathrm{d}\eta$		$r_{\mathrm{Ne/O}}$	O+O 类别	w_1
	O+O	Ne+Ne		1, 2	
0–1%	148.4	179.6	1.2101	—	—
1–2%	133.0	161.3	1.2132	—	—
2–3%	125.2	152.1	1.2142	—	—
3–4%	119.5	145.0	1.2134	0–1, 1–2	0.79
4–5%	114.7	139.3	1.2151	0–1, 1–2	0.43
5–10%	103.7	125.7	1.2124	1–2, 2–3	0.06
10–15%	89.0	107.5	1.2079	4–5, 5–10	0.36
15–20%	77.2	92.7	1.2007	5–10, 10–15	0.26
20–25%	67.0	80.0	1.1934	10–15, 15–20	0.25
25–30%	58.1	68.9	1.1864	15–20, 20–25	0.19
30–35%	50.2	59.2	1.1792	20–25 , 25–30	0.13
35–40%	43.2	50.5	1.1700	25–30 , 30–35	0.05
40–45%	37.0	43.0	1.1598	35–40 , 40–45	0.96
45–50%	31.6	36.3	1.1490	40–45 , 45–50	0.88
50–55%	26.9	30.5	1.1339	45–50 , 50–55	0.78
55–60%	22.8	25.5	1.1192	50–55、55–60	0.68
60–65%	19.2	21.2	1.1027	55–60、60–65	0.57
65–70%	16.1	17.5	1.0846	60–65、65–70	0.46
70–75%	13.3	14.2	1.0682	65–70、70–75	0.35
75–80%	10.9	11.4	1.0456	70–75、75–80	0.22

[24] L. McLerran、M. Praszałowicz和B. Schenke，《核物理A》**916**，210（2013），arXiv：1306.2350。[25] ATLAS合作组，G. Aad 等，arXiv：2606.20257（2026）。[26] ALICE合作组，B. B. Abelev 等，《物理学快报B》**727**，371（2013），arXiv：1307.1094。[27] Neeraj和A. Sarkar，arXiv：2611.04865（2026）。[28] ALICE合作组，S. Acharya 等，《物理学快报B》**788**，166（2019），arXiv：1805.04399。[29] ALICE合作组，S. Acharya 等，《高能物理学杂志》**11**，013（2018），arXiv：1802.09145。[30] ATLAS合作组，G. Aad 等，《物理评论快报》**133**，252301（2024），arXiv：2407.06413。[31] ALICE合作组，S. Acharya 等，《物理评论C》**101**，044907（2020），arXiv：1910.07678。[32] R. Samanta、S. Bhatta、J. Jia、M. Luzum和J.- Y. Ollitrault，《物理评论C》**109**，L051902（2024），arXiv：2303.15323。[33] ALICE合作组，J. Adam 等，《自然·物理》**13**，535（2017），arXiv：1606.07424。[34] CMS合作组，A. Hayrapetyan 等，arXiv：2608.18256（2026）。[35] L. Gavassino 等，《物理评论C》**112**，054903（2025），arXiv：2503.20765。[36] I. Angeli和K. P. Marinova，《原子数据与核数据表》**99**，69（2013）。[37] M. Rybczyński和W. Broniowski，《物理评论C》**100**，064912（2019），arXiv：1910.09489。[38] C. Loizides，《物理评论C》**113**，014914（2026），arXiv：2507.05853。