

高能重离子碰撞中心快度区鉴别粒子的平均横动量*

谢湔¹⁾ 李景行¹⁾ 郑华^{1)2)†} 张文超¹⁾ 朱励霖³⁾
刘星泉⁴⁾ 谭志光⁵⁾ 周代梅²⁾⁶⁾ Bonasera Aldo⁷⁾⁸⁾

1) (陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710119)

2) (华中师范大学夸克与轻子物理教育部重点实验室, 武汉 430079)

3) (四川大学物理学院, 成都 610064)

4) (四川大学原子核科学技术研究所, 成都 610064)

5) (长沙学院电子信息与电气工程学院, 长沙 410003)

6) (华中师范大学粒子物理研究所, 武汉 430079)

7) (德州农工大学回旋加速器实验室, 美国得克萨斯州大学城 TX 77843)

8) (意大利南方国家实验室, 意大利卡塔尼亚 95123)

(2024 年 6 月 29 日收到; 2024 年 7 月 22 日收到修改稿)

末态粒子的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 是高能重离子碰撞实验中的一个重要观测量. 它反映了软质强子的特性和热核物质的性质, 对其研究有助于获取碰撞系统的演化信息与规律. 基于相对论重离子对撞机 (RHIC) 上的 STAR、PHENIX 实验组和大型强子对撞机 (LHC) 的 ALICE 实验组提供的金核-金核 (Au+Au) 和铅核-铅核 (Pb+Pb) 碰撞中心快度区实验数据, 唯象公式能很好地描述不同碰撞能量下, 鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随碰撞中心度、每核子对的平均碰撞次数、每核子对平均产生的带电粒子多重数快度密度及每次碰撞平均产生的带电粒子多重数快度密度的依赖关系. 结果表明, 鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与碰撞中心度呈线性关系, 而与每核子对的平均碰撞次数 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 、每核子对平均产生的带电粒子多重数快度密度 $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 及每次碰撞平均产生的带电粒子多重数快度密度 $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 呈幂律关系. 同时, 发现鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与碰撞中心度以及每核子对的平均碰撞次数唯象公式中的拟合参数与碰撞能量呈现非常好的幂律函数关系. 因此, 碰撞中心度及每核子对的平均碰撞次数是研究鉴别粒子平均横动量的优选物理量. 本文结果可用于对实验上在其他碰撞能量下鉴别粒子平均横动量的预测.

关键词: 重离子碰撞, 平均横动量, 鉴别粒子, 中心快度区

PACS: 12.40.Ee, 25.75.Ag, 25.75.Ld

DOI: 10.7498/aps.73.20240905

1 引言

相对论重离子碰撞实验的一个主要目标是研究一种新型物质形态——夸克胶子等离子体 (quark

gluon plasma, QGP) 的性质^[1,2]. 根据宇宙大爆炸理论, 这种物质形态可能存在于宇宙大爆炸的极早期阶段. 实验上通过加速射弹粒子与靶粒子直至接近光速并使它们对撞, 在高温高压的条件下核子被打碎、真空被激发, 产生夸克胶子等离子体^[3-5].

* 国家自然科学基金 (批准号: 11905120)、华中师范大学夸克与轻子物理教育部重点实验室开放基金 (批准号: QLPL2024P01) 和四川省自然科学基金面上项目 (批准号: 2024NSFSC0420) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhengh@snnu.edu.cn

近些年, 美国布鲁克海文国家实验室 (Brookhaven national laboratory, BNL) 的相对论重离子对撞机 (relativistic heavy ion collider, RHIC) 和欧洲核子中心 (European center for nuclear research, CERN) 的大型强子对撞机 (large hadron collider, LHC) 致力于通过不同的重离子碰撞能量、碰撞中心度和碰撞弹靶组合对碰撞系统的演化与夸克胶子等离子体的性质进行研究 [6-11]. RHIC-STAR 完成了两期束流能量扫描 (BES) 的金核-金核 (Au+Au) 碰撞, 涵盖的碰撞能量包括每核子对质心能量从 7.7 GeV 到 200 GeV; LHC 上重离子碰撞的最高能量达到了每核子对质心能量 5.44 TeV.

在相对论重离子碰撞中, 系统碰撞发生核反应过程的时间尺度是 10^{-23} s 的量级. 因此, 实验上无法直接对碰撞过程进行观察与测量, 但物理学家可以借助粒子探测系统获取重离子碰撞产生末态粒子的信息. 通过直接对这些探测信息进行分析或建模分析, 物理学家可以从实验上窥见碰撞系统的反应过程与产生物质的性质. 相对论重离子碰撞实验已经找到了新物质形态——夸克胶子等离子体产生的间接证据, 如强子椭圆流组分夸克数标度行为 [12-15]、喷注淬火 [16-19]、 J/ψ 产额压低 [20,21]、重子测量温度标度行为 [22,23] 等. 理论物理学家通过不同模型对重离子碰撞过程进行模拟, 对比模拟结果与实验测量结果, 探索碰撞系统的动力演化、性质与末态粒子的产生机制等 [24-36]. 同时, 对实验观测量进行唯象描述并寻找其规律也是研究高能重离子碰撞物理的重要方法 [37-48]. 目前非常具有潜力的研究方法是将机器学习与人工智能作为工具引入相对论重离子碰撞物理的唯象研究 [49-51].

末态粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 是相对论重离子碰撞实验中的一个重要观测量. 可以通过末态粒子的横动量谱计算得到. 由于低横动量区域的粒子数占末态粒子数中的绝大部分, 因此平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 可以反映软质强子的性质和热核物质的特性 [52]. 该物理量由范-霍夫 (Van Hove) 提出 [53], 并假设 $\langle p_T \rangle$ 与粒子多重数之间的相关性可能表明存在强子相变. 这一想法被应用于质子-反质子的碰撞数据分析中. 文献 [52] 指出, 寻找平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与粒子种类和碰撞能量之间的规律性关系及其背后的物理学原理, 具有重要的意义. 在文献 [54, 55] 中, 基于 RHIC 的 STAR 实验组和 LHC 的 ALICE 实验组测量的金核-金核 (Au+Au) 和铅核-铅核

(Pb+Pb) 碰撞中心快度区的实验数据, Olimov 及其合作者探究了 $\langle p_T \rangle$ 与平均带电粒子多重数快度密度、碰撞系统总的平均碰撞次数和总的平均参与碰撞核子数的关系, 结果表明, $\langle p_T \rangle$ 与所选的三个物理量均满足幂律关系. 然而, 这三个物理量均与碰撞系统本身密切相关, 没有被归一化, 无法在不同碰撞系统之间进行横向比较. 另外, 结果显示, 利用幂律公式拟合数据得到的拟合参数没有表现出明显的规律.

类似于文献 [54, 55], 本文基于 RHIC 实验组提供的束流能量扫描 (BES) Au+Au 碰撞中心快度区的实验数据和 ALICE 实验组提供的 Pb+Pb 碰撞中心快度区的实验数据, 利用唯象公式研究了鉴别粒子的平均横动量 $\langle p_T \rangle$. 不同的是, 本文选取的物理量是归一化的, 如碰撞中心度、每核子对的平均碰撞次数、每核子对平均产生的带电粒子多重数快度密度及每次碰撞平均产生的带电粒子多重数快度密度. 通过经验公式对末态鉴别粒子平均横动量与选取的物理量进行拟合, 探究重离子碰撞中末态粒子平均横动量的规律.

2 实验数据与拟合公式

本文使用的数据来源于 STAR、PHENIX 实验组和 ALICE 实验组公开发表的不同碰撞中心度下, 碰撞能量为 7.7—200 GeV 的 Au+Au 碰撞, 以及碰撞能量为 2.76, 5.02 TeV 的 Pb+Pb 碰撞的数据. 其中鉴别粒子的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ [7-11] 与中心快度区带电粒子多重数快度密度 $\left\langle \frac{dN_{ch}}{d\eta} \right\rangle$ [8,9,56-59] 为实验测量量, 而碰撞中心度 C (Centrality $\times 100$)、平均二元核核碰撞次数 $\langle N_{coll} \rangle$ 与平均参与碰撞核子数 $\langle N_{part} \rangle$ 是实验组通过蒙特卡罗格劳伯模型 (Monte Carlo Glauber model) 对多重数分布计算得到的数据 [8,9,56]. 为能够横向比较不同碰撞系统的结果, 需要对所选取的要研究的物理量进行归一化, 如每核子对的平均碰撞次数 $\frac{2\langle N_{coll} \rangle}{\langle N_{part} \rangle} \equiv \frac{2N_{coll}}{N_{part}}$ 、每核子对平均产生的带电粒子多重数快度密度 $\frac{2}{\langle N_{part} \rangle} \left\langle \frac{dN_{ch}}{d\eta} \right\rangle \equiv \frac{2}{N_{part}} \frac{dN_{ch}}{d\eta}$ 及每次碰撞平均产生的带电粒子多重数快度密度 $\frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \left\langle \frac{dN_{ch}}{d\eta} \right\rangle \equiv \frac{1}{N_{coll}} \frac{dN_{ch}}{d\eta}$.

在研究不同碰撞能量和碰撞中心度下 Au+Au 和 Pb+Pb 碰撞中产生的末态鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 的规律时, 假设如下四个唯象公式来描述鉴别粒子的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与相关物理量的关系:

$$\langle p_T \rangle = a_1 \cdot C + b_1, \quad (1)$$

$$\langle p_T \rangle = a_2 \cdot \left(\frac{2N_{\text{coll}}}{N_{\text{part}}} \right)^{b_2}, \quad (2)$$

$$\langle p_T \rangle = a_3 \cdot \left(\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta} \right)^{b_3}, \quad (3)$$

$$\langle p_T \rangle = a_4 \cdot \left(\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta} \right)^{b_4}, \quad (4)$$

其中 a_i , b_i 是自由拟合参数. 通过拟合可得到鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与 C , $\frac{2N_{\text{coll}}}{N_{\text{part}}}$, $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$, $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 之间的关系. 在本文研究的重离子碰撞能量范围内, π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 的平均横动量数据与其共轭电荷粒子 π^+ 介子、 K^+ 介子和质子 p 的平均横动量数据几乎一样, 因此本文只研

究 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 的平均横动量.

3 结果与讨论

3.1 平均横动量与中心度

利用线性函数公式 (1) 对碰撞能量为 7.7—200 GeV 的 Au+Au 碰撞以及碰撞能量为 2.76 和 5.02 TeV 的 Pb+Pb 碰撞中产生的末态鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 中心快度区的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与碰撞中心度 C 的关系进行拟合, 结果如图 1 所示. 符号点为实验组的测量数据, 线为 (1) 式的拟合曲线. 相应的拟合参数与 χ^2/NDF 见附录表 A1.

由图 1 可见, 线性函数公式 (1) 能非常好地拟合不同碰撞能量下, 重离子碰撞中心快度区的鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与中心度 C 的依赖关系. 从表 A1 可以观察到, 斜率参数 a_1 都是小于 0, 这表明鉴别粒子的平均横动量是随碰撞中心度 C 的增加 (从中心碰撞到边缘

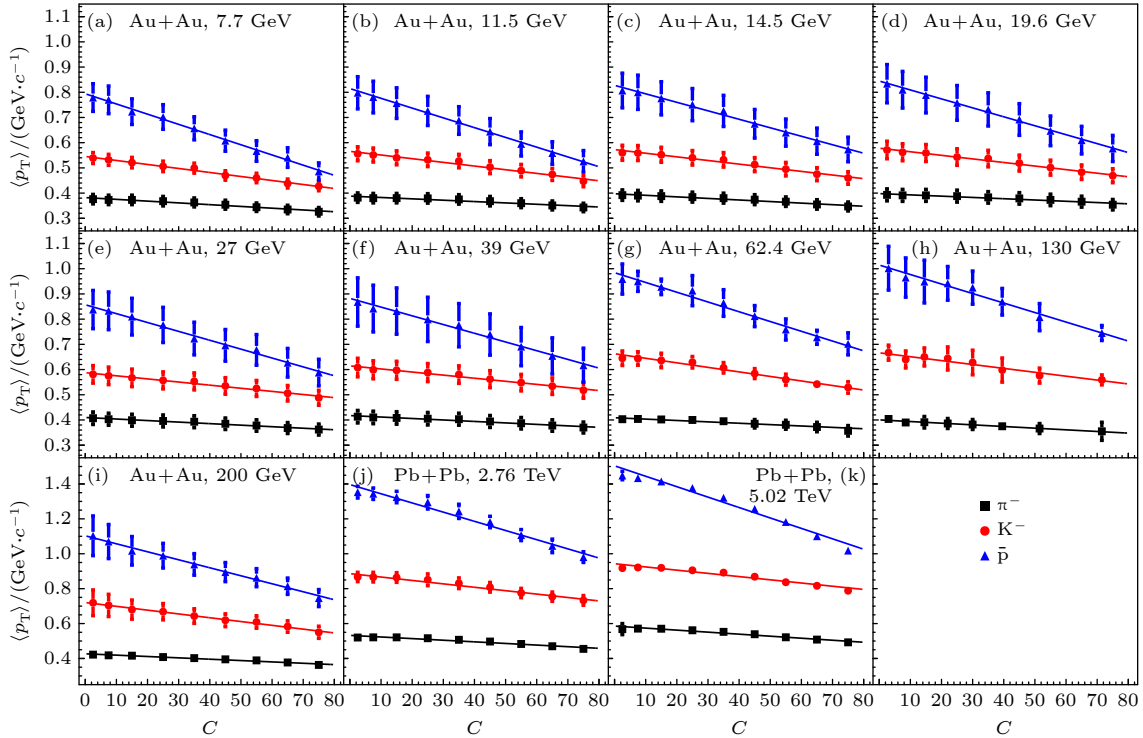


图 1 采用线性函数公式 (1) 对不同碰撞能量下, 中心快度区鉴别粒子的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与碰撞中心度关系的拟合结果. 金核-金核碰撞能量为 7.7 GeV (a); 11.5 GeV (b); 14.5 GeV (c); 19.6 GeV (d); 27 GeV (e); 39 GeV (f); 62.4 GeV (g); 130 GeV (h); 200 GeV (i). 铅核-铅核碰撞能量为 2.76 TeV (j); 5.02 TeV (k). 实验数据来自文献 [7—11]

Fig. 1. Linear fits with Eq. (1) to the experimental midrapidity $\langle p_T \rangle$ versus centrality for the identified particles in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 7.7$ GeV (a), 11.5 GeV (b), 14.5 GeV (c), 19.6 GeV (d), 27 GeV (e), 39 GeV (f), 62.4 GeV (g), 130 GeV (h), 200 GeV (i), and in Pb + Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV (j), 5.02 TeV (k). The experimental data are taken from Refs. [7—11].

碰撞)而减小的. 斜率参数 a_1 可以描述 $\langle p_T \rangle$ 随 C 变化的快慢程度. a_1 的绝对值越接近于 0, 变化越缓慢. 从 a_1 的绝对值可以看到, 质量轻的粒子的平均横动量对碰撞中心度的依赖性很小, 而质量重的粒子对碰撞中心度的依赖性较大. 这可能与不同质量的粒子的产生过程有关. 因为能量守恒, 质量重的粒子主要在碰撞早期产生, 对碰撞系统的能量密度依赖性较强, 因此对碰撞中心度依赖较大; 而质量较轻的粒子在整个碰撞系统演化过程中都可以产生, 因此对碰撞中心度依赖较小. 对截距 b_1 的讨论见 3.5 节.

图 2 给出了鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 的拟合参数斜率绝对值 $|a_1|$ 与截距 b_1 分别随碰撞能量的变化. 图中的点是表 A1 中的拟合参数, 线是幂律函数 $a(\sqrt{s_{NN}})^b$ 的拟合曲线, 可见拟合参数与碰撞能量之间满足很好的幂律关系. 这使 (1) 式具备了对重离子碰撞中鉴别粒子的平均横动量的预言能力. 碰撞中心度 C 是研究重离子碰撞鉴别粒子平均横动量的优选物理量. 在给定碰撞能量时, 斜率参数的绝对值 $|a_1|$ 与截距参数 b_1 满足同样的质量排列关系, 且随碰撞能量的增加都是增大的趋势.

3.2 平均横动量与每核子对的平均碰撞次数

由于实验组没有公布第二期束流能量扫描碰撞能量的二元核碰撞数据, 目前研究鉴别粒子平

均横动量与每核子对的平均碰撞次数的关系时只有 6 个碰撞能量点. 利用幂律函数公式 (2) 对碰撞能量为 14.5, 62.4, 130, 200 GeV 的 Au+Au 碰撞及碰撞能量为 2.76, 5.02 TeV 的 Pb+Pb 碰撞中产生的末态鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 中心快度区的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随每核子对的平均碰撞次数 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 的关系进行拟合, 结果如图 3 所示. 符号点为实验组的测量数据, 线为 (2) 式的拟合曲线. 相应的拟合参数与 χ^2/NDF 见附录表 A2.

由图 3 可见, 幂律函数公式 (2) 能很好地描述不同碰撞能量下, 重离子碰撞中心快度区的鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 之间的依赖关系. 幂律函数的指数 b_2 可以反映平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 变化的快慢程度. 指数 b_2 越小, 变化越缓慢. 从表 A2 可以看到, 指数参数 b_2 均大于 0. 这表明在相对论重离子碰撞中, 鉴别粒子的平均横动量与每核子对的平均碰撞次数 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 是正相关的, 与国内外研究人员对重离子碰撞中粒子横动量产生的认识一致.

图 4 给出了鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 的拟合参数系数 a_2 与指数 b_2 随碰撞能量的变化. 图中的点是表 A2 中的拟合参数, 线是幂律函数 $a(\sqrt{s_{NN}})^b$ 的拟合曲线, 可见拟合参数与碰撞能量之间满足很好的幂律关系. 这使得 (2) 式具备了对重离子碰撞中鉴别粒子的平均横动量的预言能力. 每核子对的平均碰撞次数 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 是研究

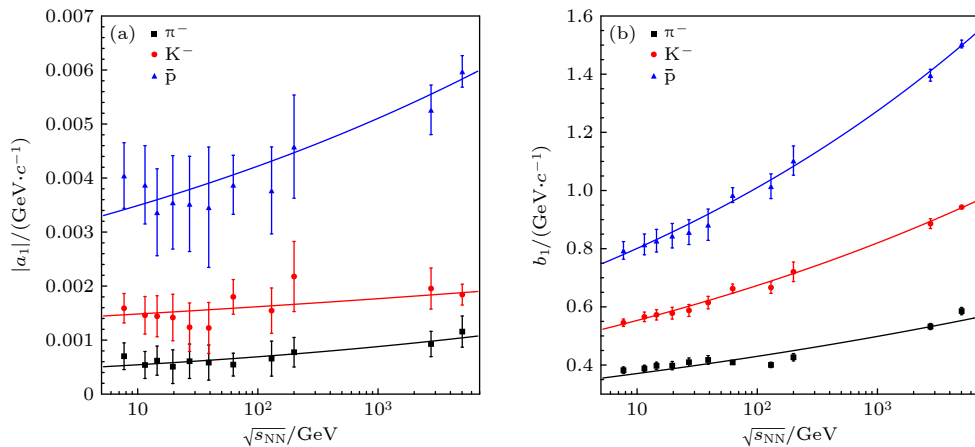


图 2 (1) 式拟合鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随碰撞中心度关系的拟合参数 (a) 斜率绝对值 $|a_1|$; (b) 截距 b_1 与每核子对质心碰撞能量 $\sqrt{s_{NN}}$ 的关系

Fig. 2. The collision energy $\sqrt{s_{NN}}$ dependence of the fitting parameters from Eq. (1): (a) For the absolute values of slope $|a_1|$; (b) for the intercepts b_1 .

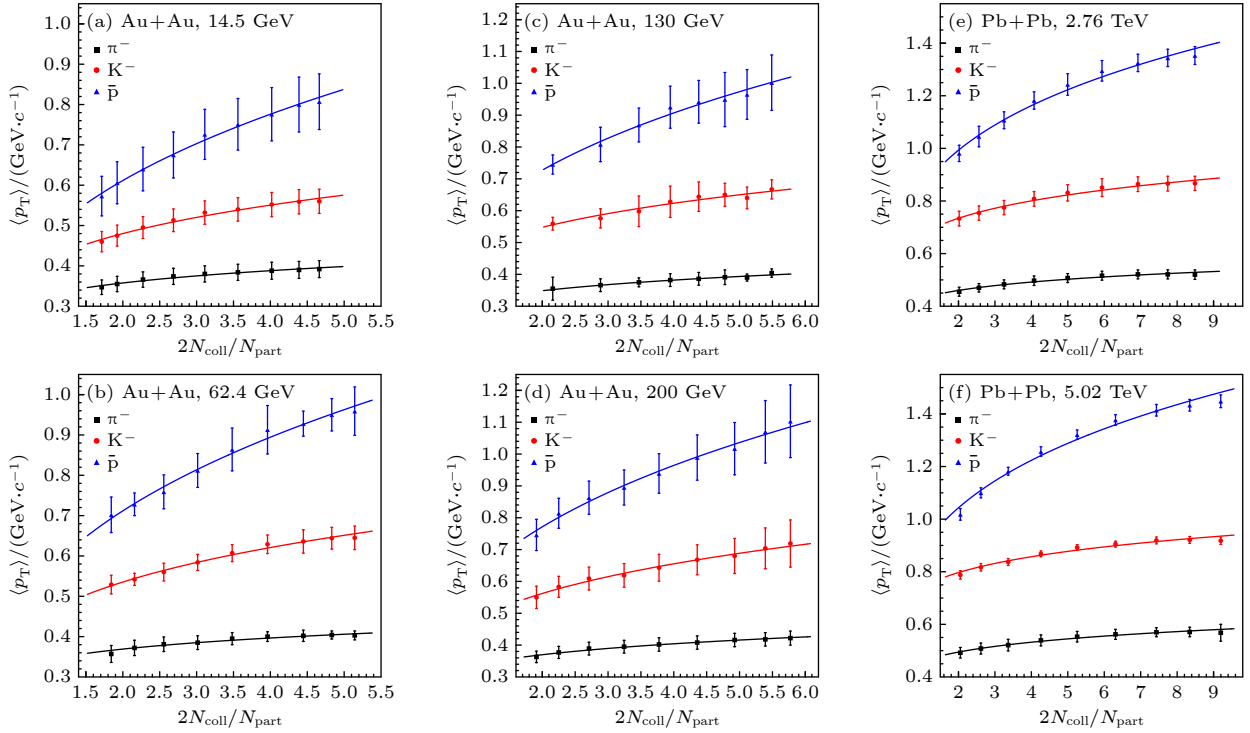


图3 采用幂律函数公式(2)拟合不同碰撞能量下,中心快度区鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与每核子对的平均碰撞次数关系的拟合结果. 金核-金核碰撞能量为 14.5 GeV (a); 62.4 GeV (b); 130 GeV (c); 200 GeV (d). 铅核-铅核碰撞能量为 2.76 TeV (e); 5.02 TeV (f). 实验数据来自文献 [8–11, 56]

Fig. 3. Power-law fits with Eq. (2) to the experimental midrapidity $\langle p_T \rangle$ versus $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ for the identified particles in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 14.5$ GeV (a), 62.4 GeV (b), 130 GeV (c), 200 GeV (d), and in Pb + Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV (e), 5.02 TeV (f). The experimental data are taken from Refs. [8–11, 56].

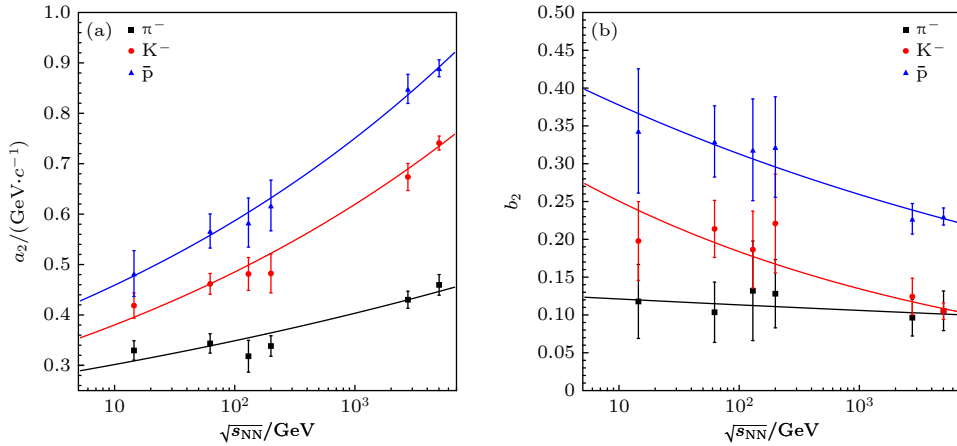


图4 (2)式拟合鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随每核子对的平均碰撞次数关系的拟合参数 (a) 系数 a_2 和 (b) 指数 b_2 与每核子对质心碰撞能量 $\sqrt{s_{\text{NN}}}$ 的关系

Fig. 4. Collision energy $\sqrt{s_{\text{NN}}}$ dependence of the fitting parameters from Eq. (2): (a) For the coefficient a_2 ; (b) for the power b_2 .

重离子碰撞中鉴别粒子平均横动量的优选物理量. 系数 a_2 与指数 b_2 随碰撞能量的变化具有相反的趋势, 系数 a_2 随着碰撞能量的增加而增大, 指数 b_2 随着碰撞能量的增加而减小. 从图4可以看到, 系数参数 a_2 和指数参数 b_2 在给定碰撞能量时满足质量排列关系, 反映了鉴别粒子平均横动量的值, 以及

其随碰撞能量的变化与粒子质量的关联. 值得指出的是, π^- 介子的指数 b_2 对碰撞能量的依赖非常微弱. 随着碰撞能量的增加, 质量较轻的粒子平均横动量随碰撞能量的变化对粒子质量的依赖在减弱. 在碰撞能量为 5.02 TeV 时, π^- 介子与 K^- 介子的指数 b_2 几乎相等.

3.3 平均横动量与每核子对平均产生的带电粒子多重数快度密度

利用幂律函数公式 (3) 对碰撞能量为 7.7—200 GeV 的 Au+Au 碰撞以及碰撞能量为 2.76, 5.02 TeV 的 Pb+Pb 碰撞中产生的末态鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 中心快度区的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与每核子对平均产生的带电粒子多重数快度密度 $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 的关系进行拟合, 结果如图 5 所示 (由于每个碰撞能量的横坐标范围不同, 图 5 中只展示了 4 个碰撞能量的结果). 符号点为实验组的测量数据, 线为 (3) 式的拟合曲线. 相应的拟合参数与 χ^2/NDF 见附录表 A3.

由图 5 可知, 幂律函数公式 (3) 很好地拟合了不同碰撞能量下, 重离子碰撞中心快度区的鉴别粒

子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与 $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 的依赖关系. 幂律函数的指数 b_3 反映了平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随 $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 变化的快慢程度. 指数 b_3 越小, 变化越缓慢. 从表 A3 可以看到, 指数参数 b_3 均大于 0, 表明鉴别粒子的平均横动量与每核子对平均产生的带电粒子多重数快度密度是正相关的.

图 6 给出了鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 的拟合参数系数 a_3 和指数 b_3 随碰撞能量的变化. 图中的点是表 A3 中的拟合参数. 从图 6 可以看到, 与 3.1 和 3.2 节中的结果不一样, 拟合参数 a_3 , b_3 随碰撞能量的变化无明显规律. 因此, $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 只适合研究给定碰撞能量的碰撞系统中鉴别粒子的平均横动量.

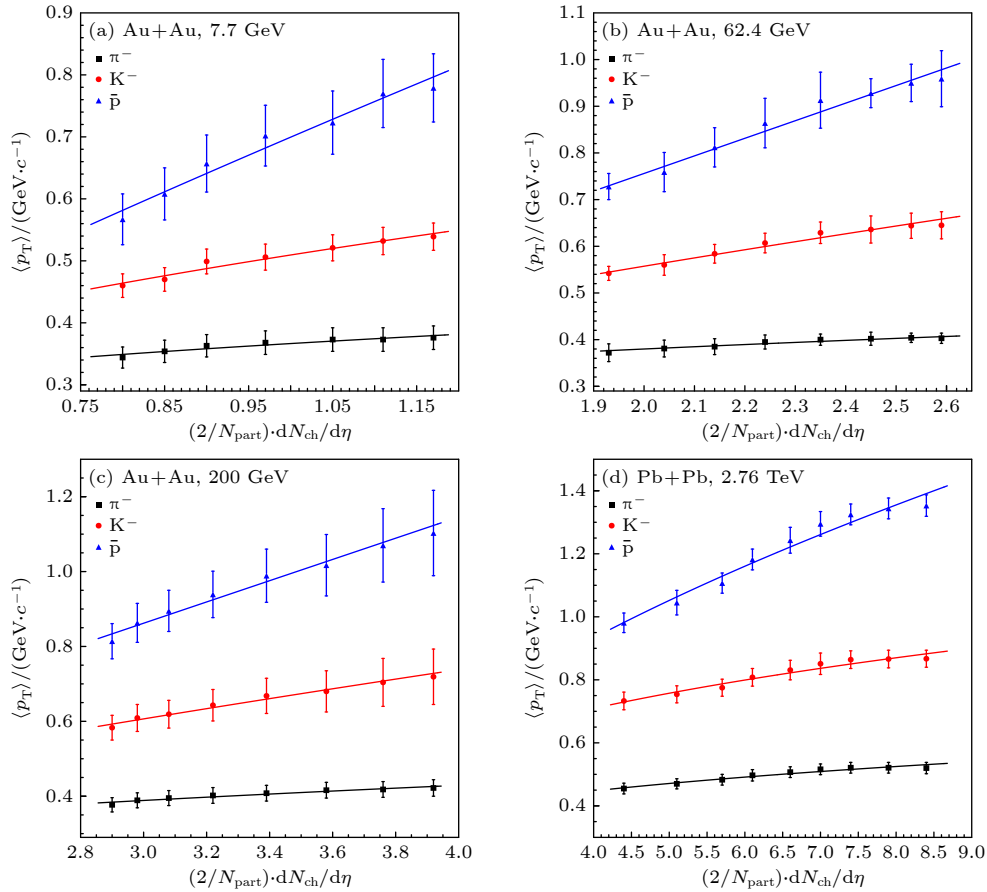


图 5 采用幂律函数公式 (3) 拟合不同碰撞能量下, 中心快度区的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与每核子对平均产生的带电粒子多重数快度密度关系的拟合结果. 金核-金核碰撞能量 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 7.7$ GeV (a); 62.4 GeV (b); 200 GeV (c). 铅核-铅核碰撞能量 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV (d). 实验数据来自文献 [7—11, 56—59]

Fig. 5. Power-law fits with Eq. (3) to the experimental midrapidity $\langle p_T \rangle$ versus $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ for the identified particles in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 7.7$ GeV (a), 62.4 GeV (b), 200 GeV (c), and in Pb + Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV (d). The experimental data are taken from Refs. [7—11, 56—59].

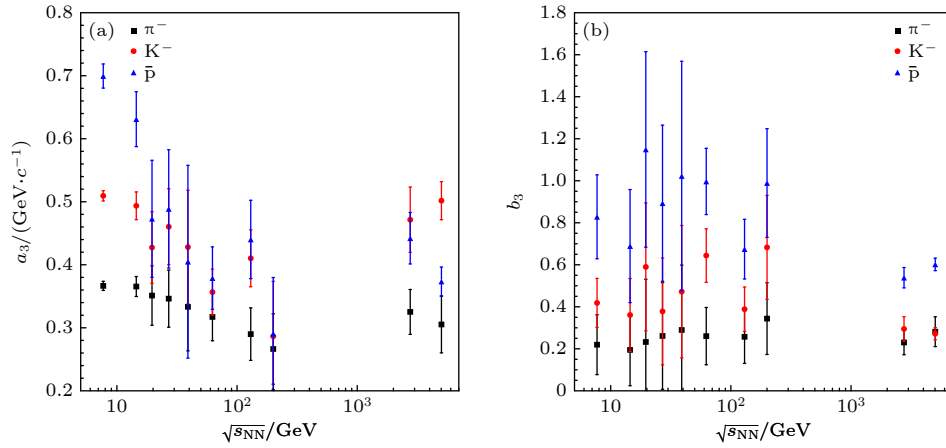


图 6 (3) 式拟合鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随每核子对平均产生的带电粒子多重数赝快度密度的拟合参数 (a) 系数 a_3 和 (b) 指数 b_3 与每核子对质心碰撞能量 $\sqrt{s_{NN}}$ 的关系

Fig. 6. Collision energy $\sqrt{s_{NN}}$ dependence of the fitting parameters from Eq. (3): (a) For the coefficient a_3 ; (b) for the power b_3 .

3.4 平均横动量与每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度

与 3.2 节中的原因一样, 研究鉴别粒子平均横动量与每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度的关系时, 也只有 6 个碰撞能量点. 利用幂律函数公式 (4) 对碰撞能量为 14.5, 62.4, 130, 200 GeV 的 Au+Au 碰撞及碰撞能量为 2.76, 5.02 TeV 的 Pb+Pb 碰撞中产生的末态鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 中心快度区的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度 $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 的关系进行拟合, 结果如图 7 所示. 符号点为实验组的测量数据, 线为 (4) 式拟合曲线. 相应的拟合参数与 χ^2/NDF 见附录表 A4.

由图 7 可以看到, 幂律函数公式 (4) 非常好地拟合了不同碰撞能量下, 重离子碰撞中心快度区的鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 对 $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 的依赖关系. 从表 A4 可以看到, 指数参数 b_4 均小于 0. 这表明鉴别粒子的平均横动量与每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度是负相关的. 从 b_4 的绝对值可以看到, 质量轻的粒子的平均横动量对每次碰撞产生的带电粒子多重数赝快度密度的依赖性很小, 而质量重的粒子对每次碰撞产生的带电粒子多重数赝快度密度的依赖性较大.

图 8 给出了鉴别粒子 π^- 介子、 K^- 介子和反质子 $\bar{p}$ 的拟合参数系数 a_4 和指数 $|b_4|$ 随碰撞能量的变化. 图中的点是表 A4 中的拟合参数, 线是

幂律函数 $a(\sqrt{s_{NN}})^b$ 的拟合曲线. 可见拟合参数系数 a_4 与碰撞能量满足很好的幂律关系, 而拟合参数 b_4 与碰撞能量没有明显规律. 系数参数 a_4 与指数参数的绝对值 $|b_4|$ 在给定碰撞能量时满足同样的质量排列关系. 系数 a_4 随着碰撞能量的增加而增大. 与 3.3 节中结论一样, $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 只适合研究给定碰撞能量的碰撞系统中的鉴别粒子平均横动量.

3.5 讨论

从图 1、图 3、图 5 和图 7 可以观察到, 在 RHIC 和 LHC 能量区域的 Au+Au 和 Pb+Pb 碰撞中, 粒子的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随碰撞中心度 C 、每核子对的平均碰撞次数 $\frac{2N_{\text{coll}}}{N_{\text{part}}}$ 、每核子对平均产生的带电粒子多重数赝快度密度 $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 及每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度 $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 的变化均呈现质量排列关系 $\langle p_T \rangle(\bar{p}) > \langle p_T \rangle(K^-) > \langle p_T \rangle(\pi^-)$. 因为在同一碰撞体系中, 鉴别粒子的平均横动量本身具有粒子质量依赖性, 与所选取的研究物理量没有关系. 这也体现在拟合参数 b_1 , a_i ($i = 2, 3, 4$) 的数值上. 同时发现质量轻的粒子对这四个物理量的依赖性很小, 而质量重的粒子对这四个物理量的依赖性较大. 这些现象可能与粒子的产生时间有关. 在重离子碰撞中, 因为能量守恒, 较重的粒子在碰撞早期产生, 而质量较轻的粒子在整个碰撞系统演化阶段都可以产生.

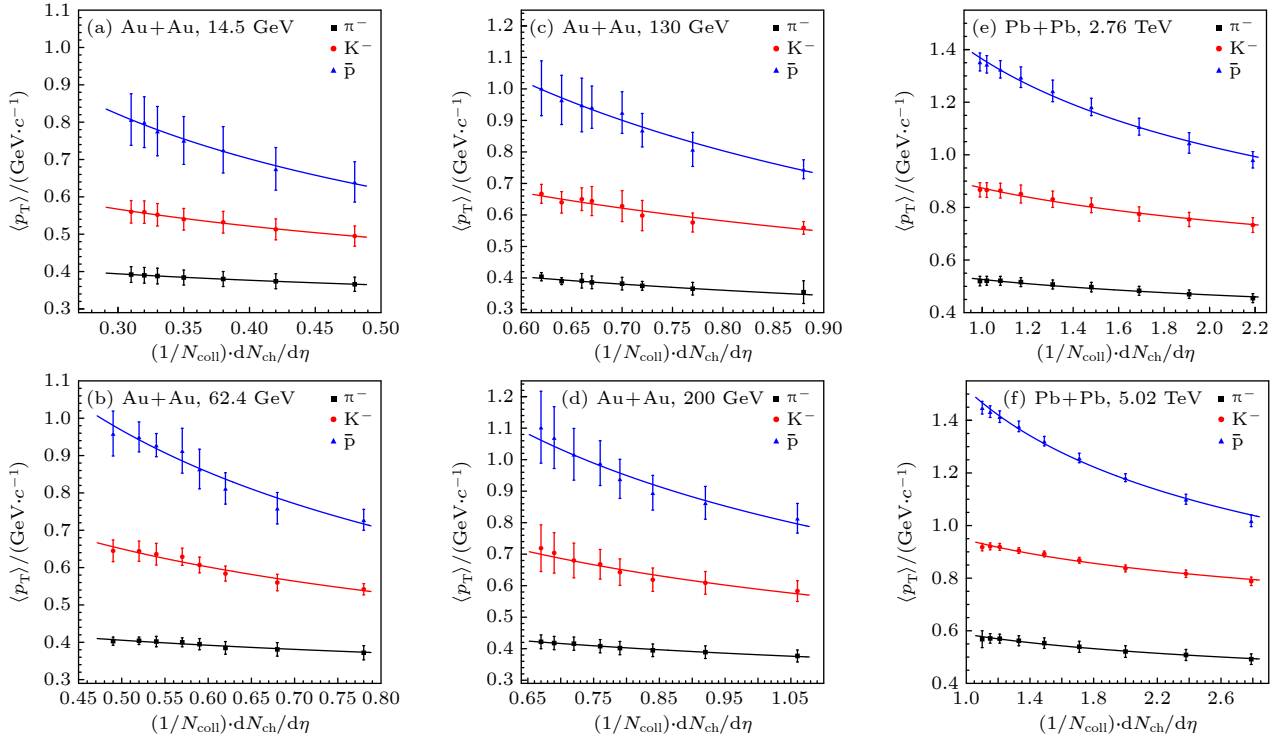


图 7 采用幂律函数公式 (4) 拟合不同碰撞能量下, 中心快度区的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度关系的拟合结果. 金核-金核碰撞能量 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 14.5$ GeV (a); 62.4 GeV (b); 130 GeV (c); 200 GeV (d). 铅核-铅核碰撞能量 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV (e); 5.02 TeV (f). 实验数据来自文献 [8–11, 56–59]

Fig. 7. Power-law fits with Eq. (4) to the experimental midrapidity $\langle p_T \rangle$ versus $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ for the identified particles in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 14.5$ GeV (a), 62.4 GeV (b), 130 GeV (c), 200 GeV (d), and in Pb + Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV (e), 5.02 TeV (f). The experimental data are taken from Refs. [8–11, 56–59].

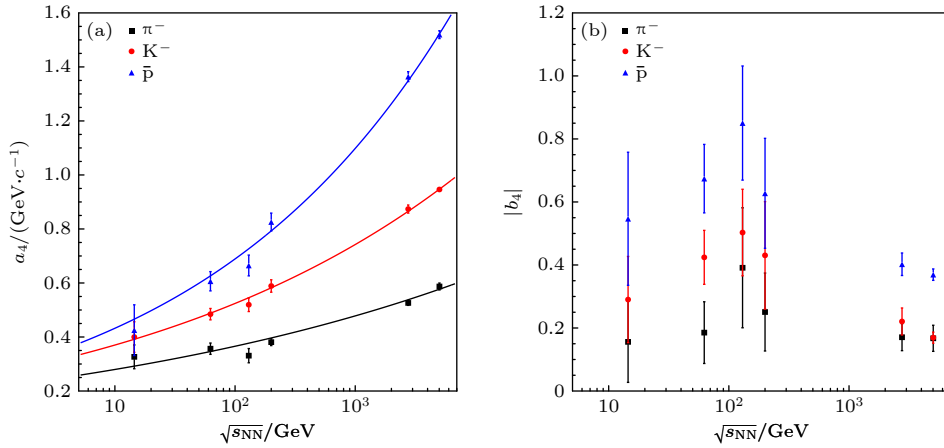


图 8 (4) 式拟合鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度的拟合参数 (a) 系数 a_4 和 (b) 指数 b_4 与每核子对质心碰撞能量 $\sqrt{s_{\text{NN}}}$ 的关系

Fig. 8. Collision energy $\sqrt{s_{\text{NN}}}$ dependence of the fitting parameters from Eq. (4): (a) For the coefficient a_4 ; (b) for the power b_4 .

重离子碰撞中产生末态鉴别粒子的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随碰撞中心度 C 呈现非常好的线性关系, 这是本文的新发现. 与另外三个归一化的物理量 $\frac{2N_{\text{coll}}}{N_{\text{part}}}$, $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$, $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 和文献 [54, 55] 中 $\langle p_T \rangle$ 随未归一化物理量 $\langle N_{\text{part}} \rangle$, $\langle N_{\text{coll}} \rangle$ 和 $\langle dN_{\text{ch}}/d\eta \rangle$

均满足幂律关系. 中心度反映了碰撞发生时两个重离子核之间的重叠程度, 当两个重离子重叠处越多, 碰撞产生的能量密度越高, 区域中参与对撞的核子数增加, 使得更多能量沉积. 因此, 末态鉴别粒子的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随中心度的增加而减小 (从

中心碰撞到边缘碰撞).

从图 2、图 4、图 6 和图 8 可以观察到, 鉴别粒子平均横动量与碰撞中心度 C 和每核子对平均碰撞次数 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 的唯象公式拟合参数与碰撞能量有非常好的幂律关系. 这使得我们在这两种情况下可以对实验上未测量碰撞能量点的鉴别粒子的平均横动量进行预测. 因为碰撞中心度 C 只涉及一个变量, 而每核子对平均碰撞次数 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 涉及两个变量, 所以研究重离子碰撞中鉴别粒子平均横动量的物理量可首选碰撞中心度.

4 结 论

基于 STAR、PHENIX 实验组和 ALICE 实验组发布的实验数据, 利用唯象公式分别对鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随归一化的物理量, 如碰撞中心度 C 、每核子对的平均碰撞次数 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 、每核子对平均产生的带电粒子多重数赝快度密度 $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 、每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度 $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 的关系进行拟合, 给出了重离子碰撞中心快度区的鉴别粒子平均横动量与相

关物理量的依赖关系: 鉴别粒子的平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随碰撞中心度呈线性减小的关系, 与每核子对的平均碰撞次数及每核子对产生的带电粒子多重数赝快度密度呈幂律增长的关系, 与每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度呈幂律减少的关系. 在给定碰撞条件下, 鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 呈现明显的质量排列关系, 随粒子质量的增加而增加. 分析发现鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随碰撞中心度 C 和每核子对的平均碰撞次数 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 的拟合参数 a_i, b_i 与碰撞能量呈现良好的幂律关系. 这表明碰撞中心度 C 、每核子对的平均碰撞次数 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 可作为研究鉴别粒子平均横动量的优选物理量. 本文的结果可用于预测重离子碰撞在其他碰撞能量下产生的鉴别粒子的平均横动量.

附录A 拟合参数表

利用唯象公式 (1)–(4) 分别对鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随碰撞中心度、每核子对的平均碰撞次数、每核子对平均产生的带电粒子多重数赝快度密度及每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度的变化关系进行拟合的参数与 χ^2/NDF 列于表 A1–A4.

表 A1 (1) 式拟合鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与碰撞中心度 C 关系的拟合参数及相应的 χ^2/NDF
Table A1. Fitting parameters of the $\langle p_T \rangle$ versus centrality for the identified particles from Eq. (1) and the corresponding χ^2/NDF .

碰撞系统, 碰撞能量	粒子种类	截距 $b_1/(\text{GeV} \cdot c^{-1})$	斜率 $a_1/(\text{GeV} \cdot c^{-1})$	χ^2/NDF
Au+Au, 7.7 GeV	π^-	0.382 ± 0.011	$-7.01 \times 10^{-4} \pm 2.47 \times 10^{-4}$	0.311/7
	K^-	0.545 ± 0.013	$-1.59 \times 10^{-3} \pm 2.72 \times 10^{-4}$	0.337/7
	$\bar{p}$	0.794 ± 0.030	$-4.05 \times 10^{-3} \pm 6.07 \times 10^{-4}$	0.211/7
Au+Au, 11.5 GeV	π^-	0.388 ± 0.011	$-5.39 \times 10^{-4} \pm 2.50 \times 10^{-4}$	0.397/7
	K^-	0.566 ± 0.016	$-1.46 \times 10^{-3} \pm 3.47 \times 10^{-4}$	0.531/7
	$\bar{p}$	0.815 ± 0.036	$-3.87 \times 10^{-3} \pm 7.24 \times 10^{-4}$	0.097/7
Au+Au, 14.5 GeV	π^-	0.397 ± 0.012	$-6.19 \times 10^{-4} \pm 2.69 \times 10^{-4}$	0.238/7
	K^-	0.572 ± 0.018	$-1.44 \times 10^{-3} \pm 3.79 \times 10^{-4}$	0.323/7
	$\bar{p}$	0.827 ± 0.039	$-3.37 \times 10^{-3} \pm 8.04 \times 10^{-4}$	0.122/7
Au+Au, 19.6 GeV	π^-	0.398 ± 0.014	$-5.08 \times 10^{-4} \pm 3.12 \times 10^{-4}$	0.195/7
	K^-	0.578 ± 0.020	$-1.42 \times 10^{-3} \pm 4.30 \times 10^{-4}$	0.149/7
	$\bar{p}$	0.845 ± 0.042	$-3.55 \times 10^{-3} \pm 8.64 \times 10^{-4}$	0.066/7
Au+Au, 27 GeV	π^-	0.410 ± 0.014	$-6.08 \times 10^{-4} \pm 3.19 \times 10^{-4}$	0.093/7
	K^-	0.588 ± 0.020	$-1.24 \times 10^{-3} \pm 4.48 \times 10^{-4}$	0.179/7
	$\bar{p}$	0.857 ± 0.043	$-3.52 \times 10^{-3} \pm 8.81 \times 10^{-4}$	0.134/7
Au+Au, 39 GeV	π^-	0.417 ± 0.015	$-5.84 \times 10^{-4} \pm 3.25 \times 10^{-4}$	0.151/7
	K^-	0.615 ± 0.021	$-1.22 \times 10^{-3} \pm 4.71 \times 10^{-4}$	0.138/7
	$\bar{p}$	0.882 ± 0.054	$-3.46 \times 10^{-3} \pm 1.11 \times 10^{-3}$	0.091/7

表 A1 (续) (1) 式拟合鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与碰撞中心度 C 关系的拟合参数及相应的 χ^2/NDF
 Table A1 (continued). Fitting parameters of the $\langle p_T \rangle$ versus centrality for the identified particles from Eq. (1) and the corresponding χ^2/NDF .

碰撞系统, 碰撞能量	粒子种类	截距 $b_1/(\text{GeV} \cdot c^{-1})$	斜率 $a_1/(\text{GeV} \cdot c^{-1})$	χ^2/NDF
Au+Au, 62.4 GeV	π^-	0.409 ± 0.007	$-5.46 \times 10^{-4} \pm 2.11 \times 10^{-4}$	0.755/7
	K^-	0.663 ± 0.016	$-1.80 \times 10^{-3} \pm 3.20 \times 10^{-4}$	0.712/7
	$\bar{p}$	0.984 ± 0.025	$-3.87 \times 10^{-3} \pm 5.46 \times 10^{-4}$	0.501/7
Au+Au, 130 GeV	π^-	0.400 ± 0.009	$-6.57 \times 10^{-4} \pm 3.24 \times 10^{-4}$	0.384/6
	K^-	0.666 ± 0.020	$-1.54 \times 10^{-3} \pm 4.19 \times 10^{-4}$	0.478/6
	$\bar{p}$	1.01 ± 0.042	$-3.77 \times 10^{-3} \pm 8.05 \times 10^{-4}$	0.275/6
Au+Au, 200 GeV	π^-	0.427 ± 0.012	$-7.75 \times 10^{-4} \pm 2.73 \times 10^{-4}$	0.234/7
	K^-	0.720 ± 0.033	$-2.18 \times 10^{-3} \pm 6.49 \times 10^{-4}$	0.145/7
	$\bar{p}$	1.10 ± 0.050	$-4.58 \times 10^{-3} \pm 9.55 \times 10^{-4}$	0.222/7
Pb+Pb, 2.76 TeV	π^-	0.532 ± 0.010	$-9.28 \times 10^{-4} \pm 2.34 \times 10^{-4}$	1.099/7
	K^-	0.886 ± 0.017	$-1.95 \times 10^{-3} \pm 3.80 \times 10^{-4}$	0.960/7
	$\bar{p}$	1.40 ± 0.020	$-5.26 \times 10^{-3} \pm 4.58 \times 10^{-4}$	3.124/7
Pb+Pb, 5.02 TeV	π^-	0.586 ± 0.012	$-1.16 \times 10^{-3} \pm 2.88 \times 10^{-4}$	0.707/7
	K^-	0.943 ± 0.008	$-1.84 \times 10^{-3} \pm 1.93 \times 10^{-4}$	6.723/7
	$\bar{p}$	1.50 ± 0.013	$-5.97 \times 10^{-3} \pm 2.91 \times 10^{-4}$	12.752/7

表 A2 (2) 式拟合鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 与每核子对的平均碰撞次数 $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ 关系的拟合参数及相应的 χ^2/NDF

Table A2. Fitting parameters of the $\langle p_T \rangle$ versus $2N_{\text{coll}}/N_{\text{part}}$ for the identified particles from Eq. (2) and the corresponding χ^2/NDF .

碰撞系统, 碰撞能量	粒子种类	系数 $a_2/(\text{GeV} \cdot c^{-1})$	指数 b_2	χ^2/NDF
Au+Au, 14.5 GeV	π^-	0.330 ± 0.019	0.118 ± 0.049	0.180/7
	K^-	0.418 ± 0.025	0.198 ± 0.052	0.235/7
	$\bar{p}$	0.482 ± 0.045	0.343 ± 0.082	0.110/7
Au+Au, 62.4 GeV	π^-	0.344 ± 0.019	0.104 ± 0.040	0.519/7
	K^-	0.462 ± 0.021	0.214 ± 0.038	0.413/7
	$\bar{p}$	0.566 ± 0.034	0.330 ± 0.047	0.352/7
Au+Au, 130 GeV	π^-	0.318 ± 0.032	0.132 ± 0.066	0.375/6
	K^-	0.481 ± 0.033	0.186 ± 0.051	0.448/6
	$\bar{p}$	0.583 ± 0.049	0.318 ± 0.067	0.215/6
Au+Au, 200 GeV	π^-	0.338 ± 0.020	0.128 ± 0.045	0.149/7
	K^-	0.482 ± 0.038	0.221 ± 0.065	0.184/7
	$\bar{p}$	0.617 ± 0.050	0.322 ± 0.066	0.304/7
Pb+Pb, 2.76 TeV	π^-	0.430 ± 0.017	0.096 ± 0.024	0.623/7
	K^-	0.674 ± 0.027	0.124 ± 0.024	0.527/7
	$\bar{p}$	0.848 ± 0.029	0.227 ± 0.020	1.731/7
Pb+Pb, 5.02 TeV	π^-	0.460 ± 0.020	0.105 ± 0.026	0.405/7
	K^-	0.741 ± 0.014	0.105 ± 0.011	3.765/7
	$\bar{p}$	0.889 ± 0.017	0.230 ± 0.011	7.564/7

表 A3 (3) 式拟合鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随每核子对平均产生的带电粒子多重数赝快度密度 $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 的拟合参数及相应的 χ^2/NDF

Table A3. Fitting parameters of the $\langle p_T \rangle$ versus $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ for the identified particles from Eq. (3) and the corresponding χ^2/NDF .

碰撞系统, 碰撞能量	粒子种类	系数 $a_3/(\text{GeV} \cdot c^{-1})$	指数 b_3	χ^2/NDF
Au+Au, 7.7 GeV	π^-	0.366 ± 0.007	0.220 ± 0.142	0.263/5
	K^-	0.509 ± 0.008	0.418 ± 0.117	0.551/5
	$\bar{p}$	0.700 ± 0.019	0.828 ± 0.200	0.548/5
Au+Au, 14.5 GeV	π^-	0.366 ± 0.016	0.195 ± 0.170	0.063/5
	K^-	0.494 ± 0.022	0.361 ± 0.174	0.237/5
	$\bar{p}$	0.631 ± 0.044	0.689 ± 0.269	0.235/5
Au+Au, 19.6 GeV	π^-	0.351 ± 0.047	0.232 ± 0.299	0.105/5
	K^-	0.427 ± 0.057	0.590 ± 0.304	0.462/5
	$\bar{p}$	0.473 ± 0.093	1.15 ± 0.465	0.621/5
Au+Au, 27 GeV	π^-	0.346 ± 0.045	0.261 ± 0.254	0.081/5
	K^-	0.460 ± 0.060	0.378 ± 0.254	0.123/5
	$\bar{p}$	0.489 ± 0.094	0.893 ± 0.371	0.245/5
Au+Au, 39 GeV	π^-	0.333 ± 0.070	0.290 ± 0.309	0.083/5
	K^-	0.428 ± 0.090	0.472 ± 0.315	0.146/5
	$\bar{p}$	0.405 ± 0.153	1.02 ± 0.546	0.142/5
Au+Au, 62.4 GeV	π^-	0.317 ± 0.038	0.260 ± 0.136	0.331/6
	K^-	0.357 ± 0.036	0.644 ± 0.127	0.662/6
	$\bar{p}$	0.379 ± 0.050	0.997 ± 0.158	0.507/6
Au+Au, 130 GeV	π^-	0.290 ± 0.042	0.257 ± 0.127	0.356/6
	K^-	0.410 ± 0.045	0.388 ± 0.105	0.452/6
	$\bar{p}$	0.440 ± 0.062	0.674 ± 0.142	0.481/6
Au+Au, 200 GeV	π^-	0.266 ± 0.056	0.344 ± 0.171	0.278/6
	K^-	0.286 ± 0.087	0.683 ± 0.247	0.190/6
	$\bar{p}$	0.291 ± 0.089	0.989 ± 0.259	0.383/6
Pb+Pb, 2.76 TeV	π^-	0.325 ± 0.036	0.230 ± 0.058	0.862/7
	K^-	0.471 ± 0.052	0.295 ± 0.058	1.182/7
	$\bar{p}$	0.442 ± 0.041	0.538 ± 0.048	3.699/7
Pb+Pb, 5.02 TeV	π^-	0.305 ± 0.045	0.282 ± 0.071	0.924/7
	K^-	0.502 ± 0.030	0.272 ± 0.029	8.162/7
	$\bar{p}$	0.373 ± 0.023	0.602 ± 0.030	20.985/7

表 A4 (4) 式拟合鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度 $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 的拟合参数及相应的 χ^2/NDF

Table A4. Fitting parameters of the $\langle p_T \rangle$ versus $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ for the identified particles from Eq. (4) and the corresponding χ^2/NDF .

碰撞系统, 碰撞能量	粒子种类	系数 $a_4/(\text{GeV} \cdot c^{-1})$	指数 b_4	χ^2/NDF
Au+Au, 14.5 GeV	π^-	0.326 ± 0.044	-0.156 ± 0.128	0.001/5
	K^-	0.400 ± 0.056	-0.290 ± 0.137	0.026/5
	$\bar{p}$	0.425 ± 0.094	-0.547 ± 0.211	0.052/5

表 A4 (续) (4) 式拟合鉴别粒子平均横动量 $\langle p_T \rangle$ 随每次碰撞平均产生的带电粒子多重数赝快度密度 $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ 的拟合参数及相应的 χ^2/NDF

Table A4 (continued). Fitting parameters of the $\langle p_T \rangle$ versus $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ for the identified particles from Eq. (4) and the corresponding χ^2/NDF .

碰撞系统, 碰撞能量	粒子种类	系数 $a_4/(\text{GeV} \cdot c^{-1})$	指数 b_4	χ^2/NDF
Au+Au, 62.4 GeV	π^-	0.357 ± 0.021	-0.185 ± 0.098	0.411/6
	K^-	0.484 ± 0.021	-0.424 ± 0.086	1.108/6
	$\bar{p}$	0.606 ± 0.036	-0.674 ± 0.109	1.402/6
Au+Au, 130 GeV	π^-	0.331 ± 0.026	-0.391 ± 0.190	0.347/6
	K^-	0.519 ± 0.025	-0.503 ± 0.137	0.720/6
	$\bar{p}$	0.665 ± 0.038	-0.850 ± 0.181	0.384/6
Au+Au, 200 GeV	π^-	0.381 ± 0.013	-0.251 ± 0.124	0.053/6
	K^-	0.589 ± 0.023	-0.430 ± 0.170	0.420/6
	$\bar{p}$	0.826 ± 0.033	-0.627 ± 0.174	0.704/6
Pb+Pb, 2.76 TeV	π^-	0.526 ± 0.009	-0.171 ± 0.042	0.511/7
	K^-	0.874 ± 0.015	-0.221 ± 0.043	0.353/7
	$\bar{p}$	1.36 ± 0.018	-0.402 ± 0.036	1.187/7
Pb+Pb, 5.02 TeV	π^-	0.587 ± 0.013	-0.167 ± 0.041	0.204/7
	K^-	0.946 ± 0.008	-0.169 ± 0.018	1.997/7
	$\bar{p}$	1.52 ± 0.014	-0.369 ± 0.018	2.886/7

参考文献

- [1] Hwa R C, Wang X N 2004 *Quark-Gluon Plasma 3* (Singapore: World Scientific)
- [2] Hwa R C, Wang X N 2010 *Quark-Gluon Plasma 4* (Singapore: World Scientific)
- [3] L P Csernai 1994 *Introduction to Relativistic Heavy Ion Collisions* (New York: Wiley)
- [4] Adams J, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. 2005 *Nucl. Phys. A* **757** 102
- [5] C Y Wong 1994 *Introduction to High-Energy Heavy-Ion Collisions* (Singapore: World Scientific)
- [6] Abelev B I, Adams J, Aggarwal M M, et al. 2007 *Phys. Rev. C* **75** 064901
- [7] Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, et al. 2017 *Phys. Rev. C* **96** 044904
- [8] Adam J, Adamczyk L, Adams J R, et al. 2020 *Phys. Rev. C* **101** 024905
- [9] Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. 2009 *Phys. Rev. C* **79** 034909
- [10] Abelev B, Adam J, Adamova D, et al. 2013 *Phys. Rev. C* **88** 044910
- [11] Acharya S, Adamova D, Adhya S P, et al. 2020 *Phys. Rev. C* **101** 044907
- [12] Adams J, Adler C, Aggarwal M M, et al. 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 052302
- [13] Back B B, Baker M D, Ballintijn M, et al. 2005 *Nucl. Phys. A* **757** 28
- [14] Wang M, Tao J Q, Zheng H, Zhang W C, Zhu L L, Bonasera A 2022 *Nucl. Sci. Tech.* **33** 37
- [15] Abelev B B, Adam J, Adamova D, et al. 2015 *JHEP* **2015** 190
- [16] Adler C, Ahammed Z, Allgower C, et al. 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 202301
- [17] Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al. 2014 *Phys. Rev. C* **90** 024908
- [18] Qin G Y, Wang X N 2015 *Int. J. Mod. Phys. E* **24** 1530014
- [19] Cao S S, Wang X N 2021 *Rep. Prog. Phys.* **84** 024301
- [20] Adcox K, Adler S S, Afanasiev S, et al. 2005 *Nucl. Phys. A* **757** 184
- [21] Zhang S L, Liao J, Qin G Y, Wang E, Xing H 2023 *Sci. Bull.* **68** 2003
- [22] Hwa R C, Zhu L 2018 *Phys. Rev. C* **97** 054908
- [23] Zhu L, Zheng H, Da K, Gong H, Ye Z, Liu G, Hwa R C 2023 *Phys. Rev. C* **107** 064907
- [24] Zhu L, Zheng H, Kong R 2019 *Eur. Phys. J. A* **55** 205
- [25] Tao J Q, Wang M, Zheng H, Zhang W C, Zhu L L, Bonasera A 2021 *J. Phys. G* **48** 105102
- [26] Gao Y, Zheng H, Zhu L L, Bonasera A 2017 *Eur. Phys. J. A* **53** 197
- [27] Tao J Q, He H B, Zheng H, Zhang W C, Liu X Q, Zhu L L, Bonasera A 2023 *Nucl. Sci. Tech.* **34** 172
- [28] Zhu L, Zheng H, Hwa R C 2021 *Phys. Rev. C* **104** 014902
- [29] She Z L, Lei A K, Yan Y L, Zhou D M, Zhang W C, Zheng H, Zheng L, Xie Y L, Chen G, Sa B H 2024 *Phys. Rev. C* **110** 014910
- [30] Wu W H, Tao J Q, Zheng H, Zhang W C, Liu X Q, Zhu L L, Bonasera A 2023 *Nucl. Sci. Tech.* **34** 151
- [31] Zhao W, Zhu L, Zheng H, Ko C M, Song H 2018 *Phys. Rev. C* **98** 054905
- [32] Lin Z W, Zheng L 2021 *Nucl. Sci. Tech.* **32** 113
- [33] Fu B, Liu S Y F, Pang L, Song H, Yin Y 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 142301
- [34] Pang L G, Petersen H, Wang X N 2018 *Phys. Rev. C* **97** 064918
- [35] Ye K F, Wang Q, Shi J H, Qin Z Y, Zhang W C, Lei A K, She Z L, Yan Y L, Sa B H 2024 *Phys. Rev. C* **109** 035201
- [36] Lan S W, Shi S S 2022 *Nucl. Sci. Tech.* **33** 21
- [37] Zheng H, Zhu L 2016 *Adv. High Energy Phys.* **2016** 9632126

- [38] Zheng H, Zhu L 2015 *Adv. High Energy Phys.* **2015** 180491
- [39] Zheng H, Zhu L, Bonasera A 2015 *Phys. Rev. D* **92** 074009
- [40] Zhu L L, Wang B, Wang M, Zheng H 2022 *Nucl. Sci. Tech.* **33** 45
- [41] Zhu L L, Zheng H, Yang C B 2008 *Nucl. Phys. A* **802** 122
- [42] Tao J, Wu W, Wang M, Zheng H, Zhang W, Zhu L, Bonasera A 2022 *Particles* **5** 146
- [43] Wong C Y, Wilk G 2012 *Acta Phys. Polon. B* **43** 2047
- [44] Wong C Y, Wilk G, Cirto L J L, Tsallis C 2015 *Phys. Rev. D* **91** 114027
- [45] Deppman A, Megias E, Menezes D P 2020 *Phys. Rev. D* **101** 034019
- [46] Yang P P, Liu F H, Olimov K K 2023 *Entropy* **25** 1571
- [47] Pradhan G S, Sahu D, Rath R, Sahoo R, Cleymans J 2024 *Eur. Phys. J. A* **60** 52
- [48] Wu J, Lin Y, Li Z, Luo X, Wu Y 2021 *Phys. Rev. C* **104** 034902
- [49] Bernhard J E, Moreland J S, Bass S A 2019 *Nat. Phys.* **15** 1113
- [50] He Y Y, Pang L G, Wang X N 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 252302
- [51] Heffernan M R, Gale C, Jeon S, Paquet J F 2024 *Phys. Rev. C* **109** 065207
- [52] Feng Y T, Shao F L, Song J 2022 *Phys. Rev. C* **106** 034910
- [53] Van Hove L 1982 *Phys. Lett. B* **118** 138
- [54] Olimov K K, Liu F H, Musaev K A, Olimov A K, Tukhtaev B J, Saidkhanov N S, Yuldashev B S, Olimov K, Gulamov K G 2021 *Int. J. Mod. Phys. E* **30** 2150029
- [55] Olimov K K, Lebedev I A, Tukhtaev B J, Fedosimova A I, Liu F H, Khudoyberdieva S A, Kanokova S Z 2023 *Int. J. Mod. Phys. E* **32** 2350066
- [56] ALICE Publications 2018 <https://cds.cern.ch/record/2636623>
- [57] Aamodt K, Abrahantes Quintana A, Adamova D, et al. 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 032301
- [58] Adam J, Adamova D, Aggarwal M M, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 222302
- [59] Adare A, Afanasiev S, Aidala C, et al. 2016 *Phys. Rev. C* **93** 024901

Midrapidity average transverse momentum of identified charged particles in high-energy heavy-ion collisions^{*}

Xie Zhen¹⁾ Li Jing-Xing¹⁾ Zheng Hua^{1)2)†} Zhang Wen-Chao¹⁾ Zhu Li-Lin³⁾
Liu Xing-Quan⁴⁾ Tan Zhi-Guang⁵⁾ Zhou Dai-Mei²⁾⁶⁾ Bonasera Aldo⁷⁾⁸⁾

1) (*School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*)

2) (*Key Laboratory of Quark and Lepton Physics (MOE), Central China Normal University, Wuhan 430079, China*)

3) (*College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

4) (*Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

5) (*School of Electronic Information and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha 410003, China*)

6) (*Institute of Particle Physics, Central China Normal University, Wuhan 430079, China*)

7) (*Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA*)

8) (*Laboratori Nazionali del Sud, INFN, Catania 95123, Italy*)

(Received 29 June 2024; revised manuscript received 22 July 2024)

Abstract

The average transverse momentum $\langle p_T \rangle$ of final particles is an important observable in high-energy heavy-ion collision experiments. It reflects the properties of soft hadrons and thermonuclear matter, and it can also be used to deduce the information about the evolution of collision systems. By using the phenomenological linear and power-law functions, we study the dependence of the average transverse momentum $\langle p_T \rangle$ at midrapidity in Au + Au and Pb + Pb collisions from the STAR, PHENIX and ALICE Collaborations on four normalized physical quantities, i.e. the collision centrality, the average number of binary collisions per participant pair $\frac{2N_{\text{coll}}}{N_{\text{part}}}$, the average pseudorapidity density of charged particles per participant pair $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$ and the average pseudorapidity density of charged particles per binary collision $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$. The results show that the average transverse momentum $\langle p_T \rangle$ of identified particles exhibits a good linear relationship with collision centrality, and it follows a nice power-law relationship with the average number of binary collisions per participant pair $\frac{2N_{\text{coll}}}{N_{\text{part}}}$, the average pseudorapidity density of charged particles per participant pair $\frac{2}{N_{\text{part}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$, and the average pseudorapidity density of charged particles per binary collision $\frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{dN_{\text{ch}}}{d\eta}$. It is also found that the fitting parameters in the proposed phenomenological functions for the average transverse momentum $\langle p_T \rangle$ with collision centrality and the average number of binary collisions per participant pair follow a power-law function with collision energy, which endows the phenomenological approach with predictive ability. Therefore, the collision centrality and the average number of binary collisions per participant pair are good physical quantities for studying the average transverse momentum of identified particles in high-energy heavy-ion collisions. The results in this study can be used to predict the average transverse momentum of identified particles at other collision energy of which the experimental data are not available so far. The mass ordering of the average transverse momentum of identified particles, i.e. π^- , K^- and $\bar{p}$, is also discussed and explained by the particle production time related to energy conservation, at a given collision centrality and energy.

Keywords: heavy-ion collisions, average transverse momentum, identified particle, midrapidity

PACS: 12.40.Ee, 25.75.Ag, 25.75.Ld

DOI: 10.7498/aps.73.20240905

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11905120), the Open Fund of Key Laboratory of Quark and Lepton Physics in Central China Normal University, China (Grant No. QLPL2024P01), and the Natural Science Foundation of Sichuan Province, China (Grant No. 2024NSFSC0420).

[†] Corresponding author. E-mail: zhengh@snnu.edu.cn

高能重离子碰撞中心快度区鉴别粒子的平均横动量

谢湔 李景行 郑华 张文超 朱励霖 刘星泉 谭志光 周代梅 Bonasera Aldo

Midrapidity average transverse momentum of identified charged particles in high-energy heavy-ion collisions

Xie Zhen Li Jing-Xing Zheng Hua Zhang Wen-Chao Zhu Li-Lin Liu Xing-Quan Tan Zhi-Guang
Zhou Dai-Mei Bonasera Aldo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 181201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240905

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240905>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

重离子碰撞中QCD物质整体极化的实验测量

Measurements of global polarization of QCD matter in heavy-ion collisions

物理学报. 2023, 72(7): 072401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222452>

重离子碰撞中的矢量介子自旋排列

Global spin alignment of vector mesons in heavy ion collisions

物理学报. 2023, 72(7): 072502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230071>

中高能重离子碰撞中的电磁场效应和手征反常现象

Electromagnetic field effects and anomalous chiral phenomena in heavy-ion collisions at intermediate and high energy

物理学报. 2023, 72(11): 112502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230245>

相对论重离子碰撞中 π 介子椭圆流劈裂

Elliptic flow splitting of charged pions in relativistic heavy-ion collisions

物理学报. 2023, 72(13): 132101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230454>

相对论重离子碰撞中的喷注淬火效应

Jet quenching effect in relativistic heavy-ion collisions

物理学报. 2023, 72(20): 200304 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230993>

相对论重离子碰撞中光子-光子相互作用的碰撞参数依赖性

Impact parameter dependence of photon-photon interactions in relativistic heavy-ion collisions

物理学报. 2023, 72(20): 201201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230948>