



RHIC-STAR重离子碰撞实验中可鉴别粒子的集体流研究

施梳苏

Collective Flow of Identified Particles in Heavy Ion Collisions at RHIC-STAR

SHI Shusu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC72>

引用格式:

施梳苏. RHIC-STAR重离子碰撞实验中可鉴别粒子的集体流研究[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(3):668–673. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC72

SHI Shusu. Collective Flow of Identified Particles in Heavy Ion Collisions at RHIC-STAR[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3):668–673. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC72

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Au+Au重离子碰撞中5~200 GeV碰撞能量下的温度涨落与比热\(英文\)](#)

Temperature Fluctuation and the Specific Heat in Au+Au Collisions at Collision Energies from 5 to 200 GeV

原子核物理评论. 2019, 36(4): 395–399 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.395>

[相对论重离子碰撞的输运模型研究](#)

Transport Model Studies on Relativistic Heavy-ion Collisions

原子核物理评论. 2017, 34(3): 370–373 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.370>

[中重核中单粒子与集体运动的竞争效应\(英文\)](#)

Competition Between the Single-particle Seniority Regime and Collective Motion in Intermediate-mass Nuclei

原子核物理评论. 2018, 35(4): 420–428 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.420>

[相对论重离子碰撞中手征磁效应寻找的现状\(英文\)](#)

Status of the Chiral Magnetic Effect Search in Relativistic Heavy-ion Collisions

原子核物理评论. 2018, 35(3): 225–242 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.03.225>

[基于中能重离子碰撞研究高密对称能](#)

Probing High-density Symmetry Energy Using Heavy-ion Collisions at Intermediate Energies

原子核物理评论. 2020, 37(2): 136–150 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019068>

[中能重离子碰撞中横向流电荷依赖的形状以及实验条件对横向流的影响\(英文\)](#)

Z-dependence Flow Pattern and Experimental Filter Effect on Transverse Flow Extraction in Intermediate-energy Heavy Ion Collisions

原子核物理评论. 2018, 35(1): 18–22 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.018>

RHIC-STAR 重离子碰撞实验中可鉴别粒子的集体流研究

施梳苏

(华中师范大学粒子物理研究所&夸克与轻子教育部重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 本文总结了 RHIC-STAR 重离子碰撞实验中近年来重要的空间各向异性流的结果。主要包括最高能量重离子碰撞中多重奇异及含粲夸克粒子椭圆流的结果和 RHIC 能量扫描计划 BES-I 中椭圆流和直接流的结果, 其中金金碰撞 54.4 和 27 GeV 是最新测量结果。我们发现新碰撞能量点的直接流符合碰撞能量依赖的总体趋势; 椭圆流符合组分夸克标度性, 这表明 54.4 和 27 GeV 的金金碰撞中形成了部分子层次的集体运动。同时展望了未来能量扫描实验的计划以及与之对应的空间各向异性流的研究重点。

关键词: 重离子碰撞; QCD 相结构; 集体流

中图分类号: O571.6

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC72

1 引言

相对论重离子加速器 (RHIC) 位于美国纽约长岛的布鲁海文国家实验室 (BNL), 该实验装置能够将重离子 (例如金核) 最高加速到质心能量 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV。RHIC-STAR 国际实验合作组是 RHIC 上两个大型的实验组之一。RHIC 主要的物理目标之一是产生一种高温高密的新物质形态-夸克胶子等离子体 (QGP)。这种新物质形态的主要特征之一是具有部分子层次自由度。

重离子碰撞中的集体运动行为一般通过末态粒子在动量空间中的各向异性参数 v_n 的测量来研究。末态粒子在动量空间方位角的分布可用傅里叶函数展开写为

$$\frac{dN}{d\phi} \propto 1 + 2 \sum_{n=1} v_n \cos [n(\phi - \Psi_n)]。$$

直接流 (v_1) 是末态粒子在动量空间相对于事件反应平面对方位角分布的傅里叶展开式的第一项, 它描述了由碰撞产生的粒子和核碎片在 x - z 平面上的方位角的分布情况, 载有碰撞最早期阶段的信息。直接流的大小和形状, 特别是可鉴别粒子的直接流的大小和形状对于碰撞中形成物质系统的状态方程较敏感。为了区分重子阻碍效应和强相互作用相图中与平滑过渡阶段有关联的反向流, 可鉴别粒子的直接流是很好的观测量, 比较不同粒子的直接流在中间快度区的斜率 (dv_1/dy) 可以提供更多的信息。根据流体力学模型, 净重子在中心快度区的 dv_1/dy 分布与物质的状态方程直接相关, 随能量分布的极小值是从强子物质态到 QGP 发生一级相变的特征^[1-2]。椭圆

流 (v_2) 是末态粒子在动量空间相对于事件反应平面对方位角分布的傅里叶展开式的第二项。由于椭圆流是由碰撞系统在初始几何空间呈椭圆状的各向异性而产生的压力梯度差转化而来, 所以椭圆流直接和碰撞早期的动力学相联系。椭圆流的大小依赖于碰撞过程中相互作用的强弱, 因此它可以提供早期重离子碰撞所形成的系统中有效自由度及热动力学参数的信息。RHIC 最主要物理结果之一是观察到了较大的接近理想流体计算的椭圆流; 更重要的是, 中横动量区间 (2~5 GeV/ c) 鉴别粒子的椭圆流测量结果符合组分夸克的标度性 (包括多重奇异粒子 Ξ , Ω 和 φ 介子)。这表明在 RHIC 最高能量的重离子碰撞下: (1) 夸克解禁闭以及部分子层次的集体运动已经达到; (2) 碰撞所形成的具有部分子层次自由度的新物质形态已经趋近于完全热化。近年来, 对空间异性流的形成原因学界也提出了其它可能的解释, 如“部分子逃逸”^[3]。

对于可鉴别粒子的空间各向异性流参量的测量, RHIC-STAR 实验组用到的是事件平面法^[4]。根据每个碰撞事件末态粒子的方位角分布, 我们可以估算事件反应平面在实验室系的角度, 再将事件中感兴趣的鉴别粒子的末态方位角与事件反应平面角关联, 便可测量出各阶空间各向异性流参数。由于末态粒子数目有限, 估算出来的事件反应平面存在一定的涨落, 因此最终的测量结果还需要通过事件反应平面分辨率的修正。实验测量的方法细节在文献^[4-5]中有详细阐述。

收稿日期: 2020-03-20; 修改日期: 2020-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11890711); 中央高校基本科研业务费项目 (CCNU20TS009)

作者简介: 施梳苏 (1982-), 男 (土家), 湖北恩施人, 教授, 博士, 从事高能重离子碰撞实验研究; E-mail: shiss@mail.ccnu.edu.cn。

2 结果与讨论

在 RHIC 最高能量重离子碰撞实验中观测到的鉴别粒子椭圆流的组分夸克标度性表明: 部分子层次的集体运动可能在相应能量的重离子碰撞中达到。2016 年之前发表的结果, 由于统计量的局限性, 多重奇异粒子 Ω 重子的椭圆流是否符合组分夸克标度性并不清楚。多重奇异粒子 (Ξ , Ω) 与 φ 介子的强子散射截面较轻味粒子小, 是优于轻味组分夸克 (u, d) 粒子和奇异粒子的早期碰撞过程的探针。利用 STAR 组 2010~2011 年采集的大统计质心系能量 200 GeV 金金碰撞数据, 我们完成了多重奇异粒子椭圆流的精确测量。测量结果如图 1 所示, 敏感于碰撞早期过程的多重奇异粒子 Ω 重子和 φ 介子的椭圆流与轻味粒子质子和 π 介子的椭圆流在中横动量区间

($2 < p_T < 5$ GeV/c) 的表现: Ω 重子和质子以及 φ 介子和 π 介子的椭圆流大小相当, 且均符合组分夸克标度性 [6]。这表明 RHIC 最高能量重离子碰撞中所形成的椭圆流大部分来源于部分子层次的相互作用。利用高精度的 φ 介子椭圆流测量结果, STAR 实验组发现在低横动量区间 ($p_T < 0.6$ GeV/c) φ 介子与质子椭圆流的质量排序被打破 [6]。理论计算表明, 这可以解释为两种粒子在强子-强子相互中所受到的影响不同所致。由于 φ 介子强子散射截面相比于质子要小, 因此末态强子-强子相互作用产生额外的径向流也就相对于质子较小。径向流会将低横动量区间的粒子推向较高的横动量区间, 从而导致了质量较小的质子的椭圆流小于质量较大的 φ 介子的椭圆流。测量结果第一次从实验上观察到了椭圆流质量排序在介子和质子之间的违背。

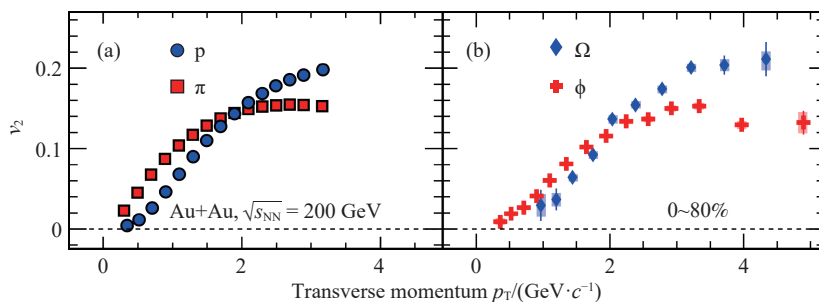


图 1 (在线彩图)RHIC 质心系能量 200 GeV 金金碰撞中 π 介子与质子椭圆流以及 φ 介子与 Ω 重子椭圆流的比较 [6]

STAR 实验组于 2014 年升级安装了重味径迹仪 (Heavy Flavor Tracker, HFT), 其最主要的目标之一便是精确测量含粲夸克粒子的椭圆流, 从而通过粲夸克的集体运动行为研究夸克胶子等离子体的性质。含粲夸克粒子的质量比较大, 相互作用散射截面比较小并且强子化的时间较轻味粒子早, 因此携带了早期碰撞过程部分子态物质的信息。且由于粲夸克的质量相对于 u, d, s 夸克的大得多, 需要强烈的相互作用才有可能形成集体运动。因此对粲夸克集体运动的研究可以解答 u, d, s 夸克在碰撞早期部分子态热化的问题。HFT 的安装使得在 RHIC-STAR 上精确测量含粲夸克粒子的横动量谱和椭圆流具备了可行性。在 2014 年的首次运行中, HFT 工作良好, 共采集了约 1 000 M 质心能量 200 GeV 金金碰撞事件。利用这些数据 STAR 完成了精度较高的 D^0 介子椭圆流的测量, 测量的结果 (如图 2 所示) 表明, 粲夸克在碰撞过程的相互作用中形成了集体运动, 并且与其它含轻味组分夸克 (u, d) 以及奇异夸克 (s) 的粒子一样符合组分夸克标度性 [7]。这表明在质心能量为 200 GeV 的金金碰撞中, 粲夸克与轻味夸克一样可能已经达到完全热化。我们将数据与理论计算相比较, 提

取出粲夸克在热密物质中的扩散系数范围应该在 2~12 之间。

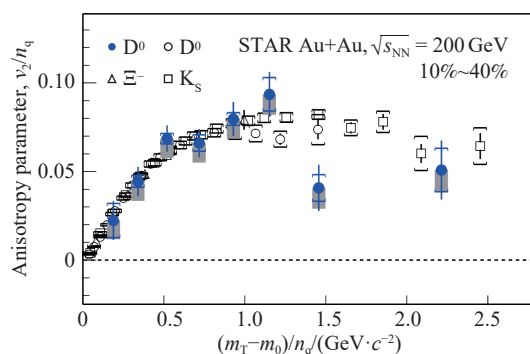


图 2 (在线彩图)RHIC 质心系能量 200 GeV 金金碰撞中 D^0 介子椭圆流的测量结果与 K_S^0 , Λ 和 Ξ 粒子的比较 [7]

上述 RHIC 最高能量重离子碰撞中部分子层次的集体运动已经达到, 理论上当降低碰撞能量到某一阈值我们应该能观察到部分子层次的集体运动消失。RHIC 能量扫描计划的目标正是据此而探索强相互作用 (QCD) 相结构。STAR 组在 RHIC 的能量扫描计划 I (BES-I) 中取得了一系列重要的测量结果。图 3 展示了 STAR 实验

BES-I 中不同‘净’粒子 [8-9] 直接流在中间快度的斜率随系统碰撞质心能量的变化。实验结果显示, 净质子在碰撞能量 20 GeV 左右的范围内存在极小值 [8-9], 而净 Λ 重子与净质子的结果类似。这与加入一阶相变的流体力学模型计算结果定性符合 [2], 但目前理论上尚无法给出定论。另外当碰撞能量低于 20 GeV 时, 净 K 介子直接流的斜率与净 Λ 重子和净质子斜率有显著的差别, 其原因需要理论和实验进一步研究。RHIC-STAR 于 2017 年采集了新的碰撞能量点 54.4 GeV 以及大统计量的 27 GeV 的金金碰撞数据。利用这些数据, 我们完成了鉴别粒子直接流的初步测量。图 4 展示了质子、反质子、 Λ 超子、反 Λ 超子和 ϕ 介子的直接流在中间快度区间的斜率 [10]。我们发现新的碰撞能量点符合碰撞能量依赖的总体趋势。 ϕ 介子的直接流斜率在 11~15 GeV 之间有

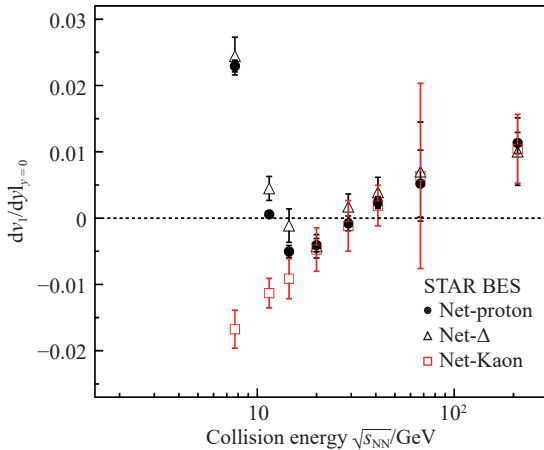


图 3 (在线彩图) 直接流在中间快度区间的斜率: 净质子 (黑色实心点)、净 Λ 超子 (蓝色空心三角) 和净 K 介子 (红色空心方点), 数据来自碰撞中心度为 10% ~ 40% 的金金碰撞

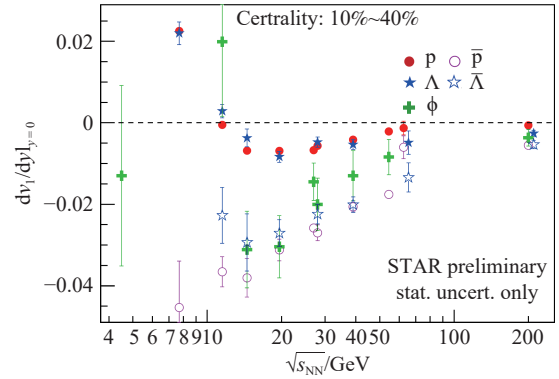


图 4 (在线彩图) 直接流在中间快度区间的斜率: 质子、反质子、 Λ 超子、反 Λ 超子和 ϕ 介子, 数据来自碰撞中心度为 10% ~ 40% 的金金碰撞 [10]

变号的迹象, 囿于目前统计量的局限, 还需要 RHIC-STAR BES-II 的测量结果才能下结论。

BES-I 椭圆流的测量中最引人注目的结果之一就是观测到在低于 39 GeV 的碰撞能量下正反粒子椭圆流的差异 [11-14]。如图 5 所示, 我们所测量的重子 (正反质子和正反 Λ 超子) 和介子 (π 介子和 K 介子) 均观察到了差别, 相同碰撞能量下重子和反重子的差别要大于介子和反介子, 而且这种差异随着碰撞能量的减少而增加。正反粒子在较低碰撞能量下椭圆流的差别打破了 RHIC 最高能量重离子碰撞中观察到的组分夸克标度性。STAR 的实验结果引起了理论上的广泛关注, 多种理论模型试图解释这种正反粒子椭圆流的差别随碰撞能量的依赖性。流体与 UrQMD 运输的混合模型 (Hybrid) 仅能描述正反质子的差异 [15]; 引入了部分子和强子势的 NJL 模型不能同时定量描述正反重子和正反介子的椭圆流差别 [16-17]; 解析流体力学模型目前在实验数据的误差范围内能较好描述, 并预言了正反质子的差别会大于正反奇异重子而

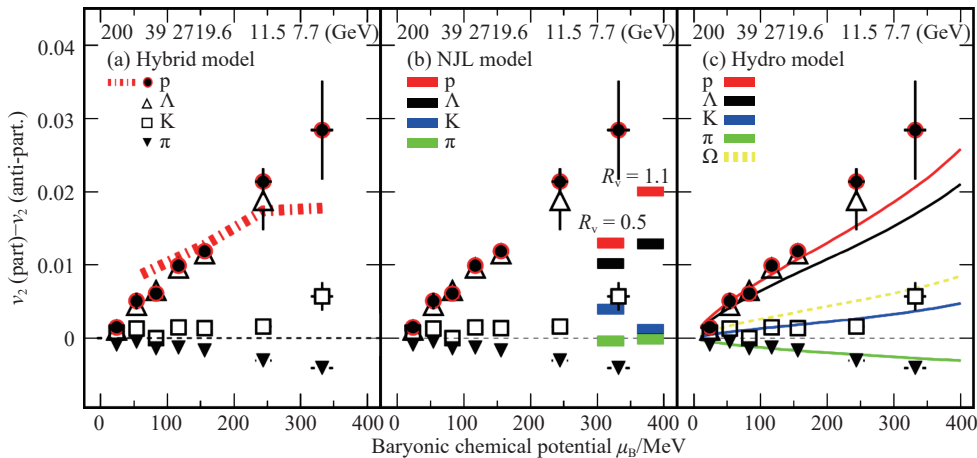


图 5 (在线彩图) RHIC BES-I 中粒子与反粒子椭圆流的差值 (Δv_2): 质子 (黑色实心点)、 Λ 超子 (黑色空心三角)、Kaon 介子 (黑色空心方点) 和 π 介子 (黑色实心三角)

数据来自碰撞中心度为 0~80% 的金金碰撞, 虚线、实心长方形和实线分别是混合 (Hybrid) 模型、NJL 模型和解析流体力学的计算结果。

正反奇异重子的差别又大于正反多重奇异重子,目前的实验数据精度尚不能验证这种与重子种类相关的依赖性^[18]。

多重奇异粒子和 φ 介子具有较小的强子散射截面是碰撞早期部分子态物质系统的良好探针,利用 BES-I 的数据我们测量了这些粒子的椭圆流。图 6 展示了 7.7~62.4 GeV 碰撞中椭圆流组分夸克标度性^[12-13]。由于上述已经观察到的正反粒子椭圆流的差异,我们这里仅展示了反粒子组的结果。可以看到当碰撞能量低于 19.6 GeV 的时候, φ 介子及反三重子有低于其它粒子的迹象,如图中

红圈所示。由于统计量的局限性, φ 介子的椭圆流大小偏离其它粒子的效应为 1.8σ (7.7 GeV) 和 2.3σ (11.5 GeV), 因此 BES-I 的结果并不能下定论。利用前述金碰撞 54.4 和 27 GeV 的数据, 我们完成了鉴别粒子椭圆流的初步测量, 参见图 7^[19]。测量结果显示: 在误差范围内, 这两个能量鉴别粒子的椭圆流测量结果符合组分夸克标度性。这一结论与我们在 BES-I 其它碰撞能量点的结果符合^[11-14], 说明强相互作用相变临界点和相边界应当存在于碰撞能量小于 20 GeV 的系统中。因此 BES-II 的实验聚焦碰撞能量低于 20 GeV 的能量区间。

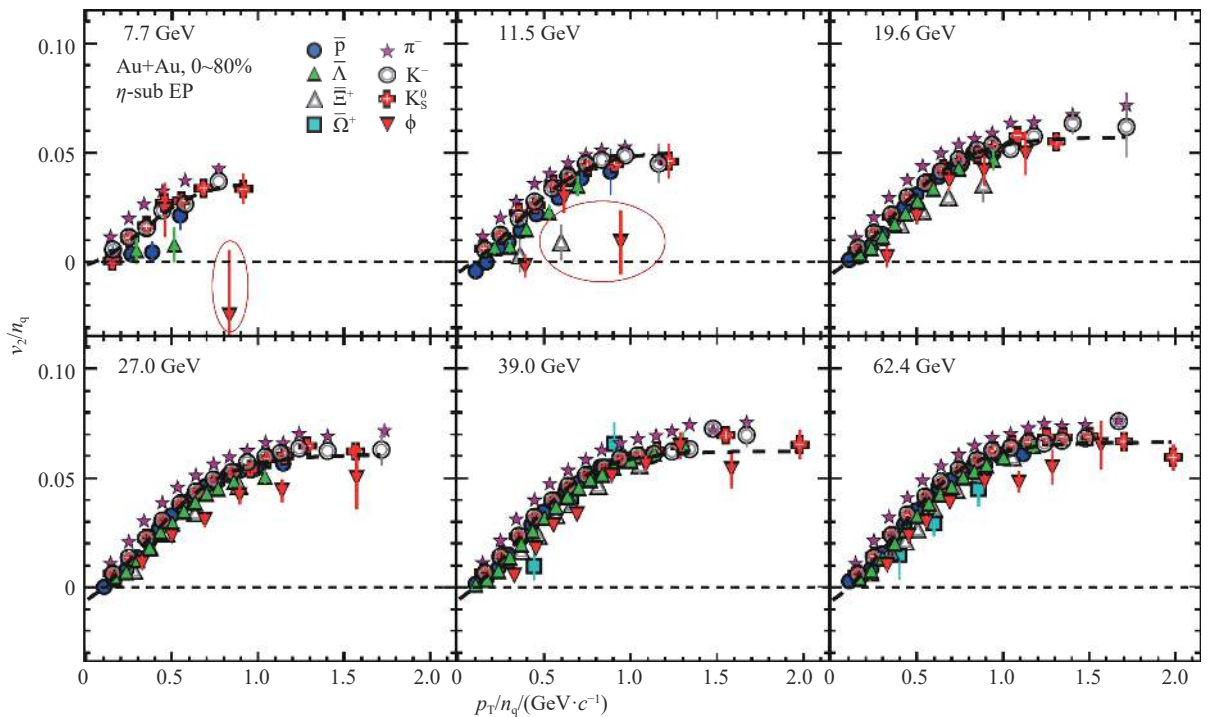


图 6 (在线彩图)RHIC BES-I 中鉴别粒子椭圆流除以组分夸克数相对于横动量除以组分夸克数的依赖性^[13]

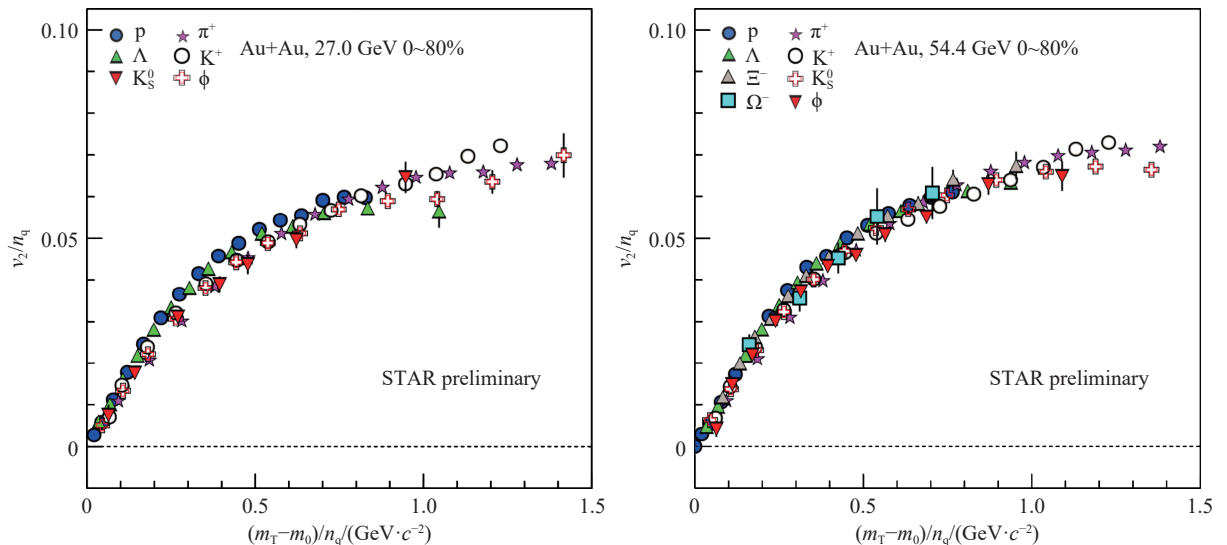


图 7 (在线彩图) 金碰撞 54.4 和 27 GeV 中鉴别粒子椭圆流的组分夸克标度性

3 总结与展望

总结起来, RHIC-STAR 实验多重奇异和含粲夸克粒子椭圆流的结果表明: 在 RHIC 最高能量重离子碰撞中, 轻味夸克 (u, d) 到奇异 (s) 及粲夸克 (c) 的部分子层次的集体运动已经达到。2009 年至 2014 年, RHIC-STAR 实验完成了 BES-I, 共采集了 7.7, 11.5, 14.5, 19.6, 27, 39 和 62.4 GeV 七个碰撞能量点的数据。最主要的发现可以总结为以下三点: (1) 在低于质心系碰撞能量为 39 GeV 的金金碰撞中, 我们观察到了正反粒子椭圆流的差异, 这种差异在重子与反重子之间尤为显著。正反粒子椭圆流的差异使得组分夸克的标度性被破坏, 表明部分子态的物质在低于此能量的碰撞可能并未达到。(2) 在 7.7 和 11.5 GeV 的金金碰撞中, 我们发现 φ 介子的椭圆流有低于其它粒子的迹象, 由于 φ 介子的强子散射截面较小是良好的早期碰撞过程探针, 较小的 φ 介子椭圆流表明部分子态的物质可能并未形成。但是由于统计的局限性, 还需要等待 BES-II 的数据得出清晰的结论。(3) 我们观察到了净质子和净 Λ 超子直接流在中间快度区的斜率随能量的非单调依赖性, 与加入了一阶相变的流体理论计算结果定性相符。利用 STAR 实验于 2017 年采集的新的碰撞能量点 54.4 GeV 以及大统计量的 27 GeV 的金金碰撞数据, 我们完成了直接流和椭圆流的初步测量, 与 BES-I 其它碰撞能量相比观测量符合能量依赖性。

2019 年至 2021 年, RHIC-STAR 正在进行 BES-II, 并已经完成了对撞机的升级。在完成 RHIC 电子冷却和束流升级之后, 亮度与 BES-I 的比较提高倍数在 4~15 之间。按计划 RHIC-STAR 将采集 400 M 19.6 GeV, 250 M 17.1 GeV, 300 M 14.5 GeV, 230 M 11.5 GeV, 160 M 9.2 GeV 和 100 M 7.7 GeV 的数据, 较之于 BES-I 统计量提高了 12~25 倍。目前已经顺利完成了 19.6 和 14.5 GeV 两个碰撞能量的数据采集。与此同时 STAR 组完成了反应平面探测器 (EPD), 内层时间投影室 (iT-PC) 和端盖飞行时间探测器 (eTOF) 的升级。这些新的探测器扩充了 STAR 探测器组的粒子探测范围, 鉴别粒子能力以及提高了重建反应平面分辨率。RHIC 加速器和 STAR 组探测器的升级为完成精确的鉴别粒子尤其是多重奇异粒子和 φ 介子直接流和椭圆流的测量提供

了支持。

目前俄罗斯在建的 NICA 实验和德国在建的 FAIR 实验, 聚焦高重子密度区域, 是下一代束流能量扫描实验装置 [19]。NICA 的能量覆盖范围是 4 ~ 11 GeV, FAIR 的能量覆盖范围是 2 ~ 5 GeV。新一代加速器具有较高的亮度, 使得我们可以在这些能量范围采集到海量的数据。利用这些数据, 我们可以开展集体流的精确测量, 尤其是多重奇异粒子和 φ 介子的直接流和椭圆流测量以及不同中心度中净粒子直接流斜率的研究, 从而聚焦高重子密度区域深入探索强相互作用相结构。

参考文献:

- [1] RHISCHKE D. Heavy Ion Physics, 1995, 1: 309.
- [2] STOCKER H. Nucl Phys A, 2005, 750: 121.
- [3] HE L, EDMONDS T, LIN Z W, et al. Phys Lett B, 2016, 753: 506.
- [4] POSKANZER A, VOLOSHIN S. Phys Rev C, 1998, 58: 1671.
- [5] VOLOSHIN S, POSKANZER A, SNELLINGS R. 2008, arXiv: 0809.2949.
- [6] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al (STAR Collaboration). Phys Rev Lett, 2016, 116: 062301.
- [7] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al (STAR Collaboration). Phys Rev Lett, 2017, 118: 212301.
- [8] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al (STAR Collaboration). Phys Rev Lett, 2014, 112: 162301.
- [9] ADAMCZYK L, ADAMS J R, ADKINS J K, et al (STAR Collaboration). Phys Rev Lett, 2018, 120: 062301.
- [10] NAYAK K (for the STAR collaboration). 2020, arXiv: 2002.12066.
- [11] ADAMCZYK L, AGAKISHIEV G, AGGARWAL M M, et al (STAR Collaboration). Phys Rev C, 2012, 86: 054908.
- [12] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al (STAR Collaboration). Phys Rev Lett, 2013, 110: 142301.
- [13] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al (STAR Collaboration). Phys Rev C, 2013, 88: 014902.
- [14] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al (STAR Collaboration). Phys Rev C, 2016, 93: 014907.
- [15] STEINHEIMER J, KOCH V, BLEICHE M, et al. Phys Rev C, 2012, 86: 044903.
- [16] XU J, SONG T, KO C M. Phys Rev Lett, 2014, 112: 012301.
- [17] LIU H, WANG F T, SUN K J, et al. Phys Lett B, 2019, 798: 135002.
- [18] HATTA Y, MONNAI A, XIAO B W. Phys Rev D, 2015, 92: 114010.
- [19] LUO X F, SHI S S, XU N, et al. Particles, 2020, 3: 278.

Collective Flow of Identified Particles in Heavy Ion Collisions at RHIC-STAR

SHI Shusu¹⁾

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

Abstract: In this paper, we review the recent key results on anisotropic flow in heavy ion collisions at RHIC-STAR experiment. It mainly includes the results of elliptic flow of multi-strange and charm hadrons in top energy heavy ion collisions, and the results of elliptic and directed flow from RHIC Beam Energy Scan Program I. The results of 54.4 and 27 GeV are brand-new. We find the new results of directed flow follow the energy dependence trend; the Number of Constituent Quark scaling of elliptic flow indicates the partonic collectivity has been built-up in Au+Au collisions at 54.4 and 27 GeV. We also introduce the future plans of Beam Energy Scan experiments and the research focus of the anisotropic flow.

Key words: heavy ion collision; QCD phase structure; collectivity

Received date: 20 Mar. 2020; **Revised date:** 10 Jun. 2020

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11890711); Self-determined Research Funds of CCNU from the Colleges Basic Research and Operation of MOE (CCNU20TS009)

1) E-mail: shiss@mail.ccnu.edu.cn.