

兰州 CSR 能区 $^{238}\text{U}^{238}\text{U}$ 碰撞椭圆流模拟研究*

吴科军^{1;1)} 罗晓峰² 刘峰¹

1 (华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

2 (中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 用相对论输运模型模拟了束流动能为 520MeV/u 的 $^{238}\text{U}^{238}\text{U}$ 碰撞实验. 研究了在两种极端对撞方位的 UU 碰撞中, 末态核子和 π 介子椭圆流 v_2 与碰撞参数、快度以及横动量的依赖关系. 研究表明, 由于挤压 (squeeze-out) 效应, 末态核子和 π 具有负的椭圆流; 体-体 UU 中心碰撞事件具有最大初始坐标空间形变, 因而具有最大的负的椭圆流, 约 12%; 在最小无偏事件样本下, 体-体和头-头碰撞, 中央快度平台上的核子椭圆流大小相当, 而前者 π 椭圆流略大于后者; 在中央快度平台, 低横动量核子和 π 主要由反应后期 Δ 衰变得到, 而高横动量主要是参与核子再散射生成, 因而在低横动量区它们具有相似的流, 而在较高横动量区 ($>0.3\text{GeV}/c$) 由于旁观核子的再散射和吸收效应, 它们的椭圆流有明显压低.

关键词 形变因子 椭圆流 最小无偏 平均场

1 引言

研究和寻找高温高密核物质特性和部分子自由度的新物质形态是高能核核碰撞实验研究的主要目的^[1, 2]. 近年来, 实验主要集中在高能区域, 也就是核物质相图的高温低重子密度区域^[3]. 在 RHIC, 喷注淬火、椭圆流的组分夸克标度行为^[4] 等似乎都表明已经形成了夸克胶子等离子体 (QGP)^[5]. 然而我们并没有足够的证据证明热化的 QGP 已经形成. 在 RHIC, 曾对此进行了广泛的讨论. 最近, Peter F.Kolb 和 Ulrich Heinz 等人提议在 RHIC 用超重核 UU 代替 AuAu 对撞^[6], 因为在同样能量下的对心碰撞中, 前者能形成更高的中心能量密度, 这将有助于实验上观察和研究 QGP 的形成和性质. 在兰州 CSR^[7], 目标之一就是提供最大束流 $E_b = 520\text{MeV}/u$ 的 UU 碰撞. 通过模拟并研究 UU 碰撞将有助于我们了解反应动力学, 并为高能下的 UU 碰撞提供一些参考.

U 核是具有最大形变因子的稳定核. 对 ^{238}U , 长短轴之比为 1.3^[8]. 同样能量和瞄准距离而不同方位的 UU 碰撞将导致高密物质不同的压缩率和寿命. 特别

是当两个 U 核沿平行于长轴方向碰撞时, 能提高末态粒子多重性, 延长反应时间, 形成更高的中心能量密度和重子密度^[9]. 在这里, 我们定义两个 U 核沿平行于长轴方向的碰撞为头-头碰撞, 而平行于短轴的碰撞为体-体碰撞见图 1. 沿其他各个不同方位的碰撞都是介于这二种极端碰撞之间的.

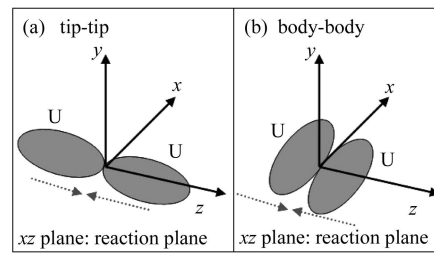


图 1 两种极端 UU 碰撞示意图

(a) 头-头 UU 碰撞; (b) 体-体 UU 碰撞. 束流沿 z 轴, xz 为反应平面, U 核长轴在反应平面内.

在非对心的球形核核碰撞中, 反应区域在最初的坐标空间是几何不对称的, 这将导致末态粒子在动量空间分布的非对称性. 椭圆流就是用来描述这种末态粒子分布不对称性的末态可观测量之一^[10]. 椭圆流的

2006 - 11 - 02 收稿

* 国家自然科学基金(10575042, 10675111), 中国科学院知识创新项目(KJ9X2-SW-N18)和教育部科技创新工程重大项目培育资金项目(704035)资助

1) E-mail: wukj@iopp.cnu.edu.cn

形成主要是在碰撞后几 fm/c 的时间内完成的, 因而能够提供碰撞早期的信息.

本文利用相对论输运 (ART) 模型^[9] 对束流动能为 520 MeV/u 的 $^{238}\text{U}^{238}\text{U}$ 打靶实验进行了研究, 对比并讨论了在两种极端方位的 UU 碰撞中椭圆流 v_2 对快度、横动量以及中心度的依赖关系.

2 椭圆流

在 ART 模型中, 将束流方向定义为 z 轴 (纵向), 两个碰撞核的中心连线在横向的投影为碰撞参数 b , 它的方向被定为 x 轴, y 轴由右手定则决定. x 和 z 轴组成的平面称为反应平面. 粒子靠近 x 轴出射即为在反应平面内出射, 而靠近 y 轴出射即为在反应平面外出射. 碰撞中, 核核重叠的部分称为参与者, 其他部分称为旁观者.

为了描述末态粒子在动量空间分布的不对称性, 我们将粒子的方位角分布做傅里叶展开为:

$$\frac{dN}{d\phi} \approx 1 + \sum_n 2v_n \cos(n\Delta\phi), \quad (1)$$

这里 $\Delta\phi$ 是粒子与反应平面之间的方位角. 对于多重数为 N 的事件傅里叶展开系数可通过对粒子求平均得到,

$$v_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos(n\Delta\phi_i), \quad (2)$$

v_n 描述各种不同类型的流, 椭圆流被定义为傅里叶展开的第二阶系数 v_2 , 描述了粒子在动量空间分布的各向异性.

3 模拟结果的分析与讨论

在最小无偏碰撞下, 分别有 494,000, 632,000 和 386,000 的头-头、体-体和球形 UU 碰撞事件被选择, 它们的最大碰撞参数 b_{max} 分别取为 13, 19 和 15 fm.

由于产生粒子大部分都在中心快度区, 图 2 显示了中央快度平台 ($|Y_{\text{cm}}| < 0.2$) 上的核子和 π 的椭圆流对碰撞参数 b 的依赖关系, 为了研究 U 核形变的影响, 作为对比, 图中也给出了在不考虑 U 核变形 (球形) 的 UU 碰撞.

在我们的模拟结果中并没有看到同位旋引起的质子和中子以及 π^+ 和 π^- 的椭圆流的差别, 这与在 SIS 观察到的实验事实是一致的^[11].

在较高能量下, 核核之间主要是由单个的核子核子作用控制. 参与者被挤压在反应区域, 由于旁观核子的作用, 它们不能飞离反应平面 (squeeze-out effect),

这种挤压效应将导致反应平面外 (负号) 的椭圆流^[11]. 图 2 中, 核子和 π 的椭圆流都是负的. 这与在 Bevalac 和 SIS 观测到的椭圆流是一致的. 这表明在该碰撞能量下, 核核之间的主要相互作用形式是单个核子核子作用.

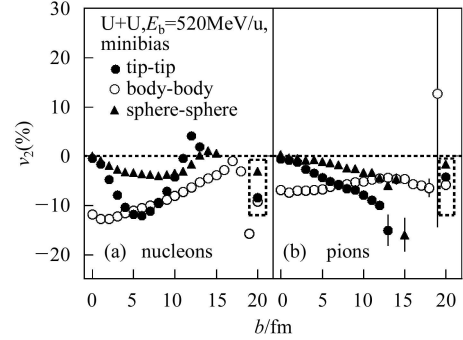


图 2 在 $E_b=0.52\text{GeV/u}$ UU 碰撞下, 中央快度平台 ($|Y_{\text{cm}}| < 0.2$) 核子 (a) 和 π (b) 椭圆流 v_2 随碰撞参数 b 的变化关系

图中虚线框内是整个最小无偏碰撞样本的椭圆流.

头-头和球形 UU 中心碰撞核子的 v_2 为 0, 而体-体 UU 中心碰撞核子的 v_2 约为 12%, 为最大值. 图 3 显示了初始坐标空间形变因子 ϵ 随碰撞参数 b 的变化关系. 在这里, 我们定义 ϵ 为:

$$\epsilon = \left\langle \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} \right\rangle. \quad (3)$$

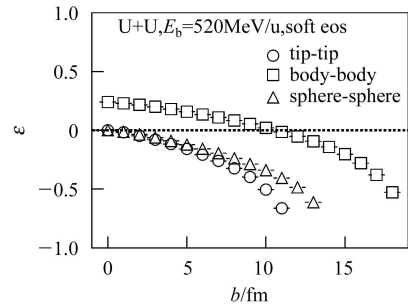


图 3 在 $E_b=0.52\text{GeV/u}$ UU 碰撞下, 重叠区横平面初始坐标空间形变因子 ϵ 与碰撞参数 b 的依赖关系

头-头和球形 UU 中心碰撞初始时刻反应区域在横向平面的投影是球形, 初始坐标空间形变为零. 体-体 UU 中心碰撞初始时刻反应区域在横向平面的投影并不是球形, 而是长轴在 x 轴的椭圆, 此时具有最大的坐标空间不对称性, 这种坐标空间不对称性直接导致了动量空间分布各向异性, 从而具有最大的 v_2 值.

头-头、体-体和球形 UU 碰撞在边缘碰撞时核子 v_2 约为零. 这是因为, 在边缘碰撞下, 重叠区小, 参与

核子数目较少,产生的末态核子少,作为集体效应的椭圆流很小.

在中心快速区,粒子相互作用形式主要是 $\text{NN} \Rightarrow \text{N}\Delta$, $\text{N}\Delta \Rightarrow \pi\text{NN}$. π 主要是在碰撞后期产生,因而它的椭圆流与初始坐标空间形变密切相关.在头-头和球形 UU 碰撞下,初始坐标空间形变随着碰撞参数 b 的增大逐渐增大,所以 π 的椭圆流也逐渐增大;对体-体 UU 碰撞初始坐标空间形变随着碰撞参数 b 的增大先减小,在大约 12fm 处达到零,再增大,此时重叠区域在横向平面的投影椭圆长轴在 y 轴,所以 π 的椭圆流会先减小再增大,转折点在大约 12fm 处.

从中心到半中心头-头和球形 UU 碰撞,在同样碰撞参数 b 下,由于前者反应区域参与者数目较多,因为产生出来的末态核子和 π 较多,它们的椭圆流也较大.

图 4 显示了核子和 π 的椭圆流 v_2 与质心系下快速度 (Y_{cm}) 的依赖关系.

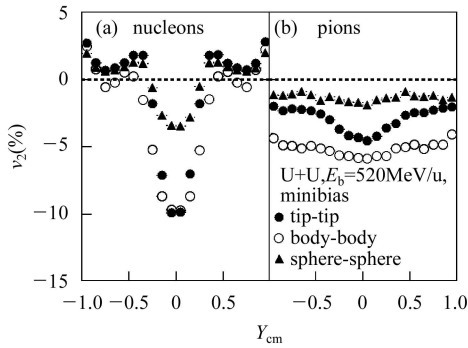


图 4 在 $E_b=0.52\text{GeV/u}$ 最小无偏碰撞下,核子 (a) 和 π (b) 的椭圆流 v_2 与质心系下快速度 Y_{cm} 的依赖关系

由于相对论效应,沿纵向运动的 U 核会有一些的收缩,这决定了碰撞过程不是在瞬间完成,旁观者并不能很快的远离反应区域,它们将对反应区域早期产生的粒子有一定的影响.在中心快速区,粒子之间的相互作用最为猛烈,末态粒子具有最大的各向异性,所以核子和 π 的椭圆流在中央快速平台 ($|Y_{\text{cm}}| < 0.2$) 有最大值.平均场效应(在 ART 模型中,它包含库仑场、内部核子级联和费米子的泡利不相容规则^[9])将贡献正的椭圆流.在射弹快速区和靶快速度区(射弹和靶中心在质心系下快速度约为 0.5),由于新产生的核子较少,所以核子有较小的椭圆流;而 π 的椭圆流由平均场效应及旁观核子的再散射和吸收效应 ($\text{NN} \rightarrow \text{N}\Delta \rightarrow \pi\text{NN}$) 共同决定,后者占主要地位,所以 π 表现出负的椭圆流.从图 2 中清楚看到:在最小无偏碰撞下,中央快速平台上,核子椭圆流在体-体和头-头 UU 碰撞下大小相近,在球形 UU 碰撞中最小;

而 π 椭圆流在体-体 UU 碰撞中最大,在球形 UU 碰撞中最小.

图 5 显示了在 3 种 UU 碰撞下,中央快速平台上的核子和 π 椭圆流 (v_2) 随横动量 (P_t) 的变化关系.

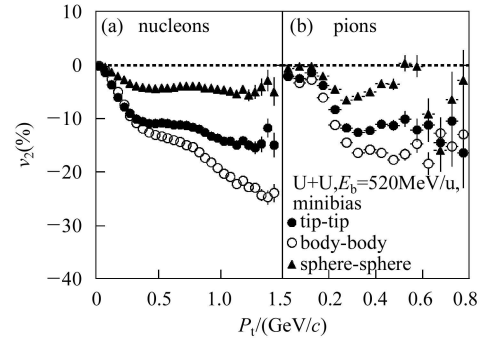


图 5 在 $E_b=0.52\text{GeV/u}$ 最小无偏碰撞下,中央快速度平台 ($Y_{\text{cm}} < 0.2$) 上的核子 (a) 和 π (b) 的椭圆流 v_2 与横动量 P_t 的依赖关系

从图中可以看出:中央快速平台上的核子椭圆流在低横动量区随横动量增加较快,在较高横动量 ($P_t \approx 0.3\text{GeV/c}$) 时出现明显弯折,此后在高横动量区近似线型增加.这与 SIS 能区实验上观察到的结果是一致的,即在低横动量区,核子椭圆流随着横动量的增大而增大^[12],当横动量能被射弹动量标度时,出现明显的弯折^[13, 14]. π 的椭圆流在低横动量区 ($P_t < 0.15\text{GeV/c}$) 是不明显的,在较高横动量区 ($0.15\text{GeV/c} < P_t < 0.3\text{GeV/c}$) 随着横动量增加而增大,大约在 0.3GeV/c 出现明显弯折.我们可以通过反应的动力学机制来解释核子和 π 椭圆流的这种行为.

低横动量区域的行为与流体力学的预言^[15]符合得很好,而高横动量区域与碰撞早期的粒子发射以及部分子通过超密媒质密切相关^[16, 17].低横动量的 π 主要是反应后期产生,它们受到旁观者的遮蔽效应要比核子的少,而高横动量的 π 主要是在碰撞早期和高横动量核子一起产生,旁观核子的吸收效应将压低 π 的椭圆流,所以相同 P_t 下,核子比 π 的椭圆流大.在极高横动量区,核子椭圆流接近流体力学极限^[18].另外由于体-体比头-头 UU 碰撞在初始时刻横平面具有更大的坐标空间形变,在同样瞄准距离下,靠近 x 轴向具有更多的旁观核子,旁观核子的再散射和吸收效应将导致前者在高横动量区域末态强子表现出更加强的反应平面外的椭圆流.

4 总结

本文应用 ART 模型对 $E_b=0.52\text{GeV/u}$ 下 UU 碰撞进行了模拟,并对末态核子和 π 的椭圆流做了分析

和讨论. 由于挤压效应, 产生粒子具有反应平面外的椭圆流, 这与理论预言及实验是一致的^[13, 19]. 体-体 UU 中心碰撞具有最大反应平面外的椭圆流, 这在实验上用椭圆流挑选体-体和头-头的 UU 中心碰撞事件, 研究高密核物质特性, 提供了一个可能方案; 由于重叠区反应最为激烈, 中央快度平台表现出最强的椭圆流; 核子的椭圆流随动量增加而增大, 在大约

0.3GeV/c 出现转折, 旁观核子的再散射和吸收效应将压低 π 的椭圆流.

感谢美国劳伦兹伯克利实验室许怒研究员、美国阿肯萨斯州立大学李宝安教授、上海交通大学陈列文教授、中国科学院近代物理研究所肖志刚副研究员以及中国科学技术大学董昕博士的讨论与指导.

参考文献(References)

- 1 Stock R. J Phys., 2004, **G30**: S633
- 2 XU N. Nucl. Phys., 2005, **A751**: 109
- 3 Stephanov M A. Prog. Theor. Phys., 2004, **153**(Suppl.): 139; hep-ph/0402115. Int. J. Mod. Phys., 2005, **A20**: 4387
- 4 Lourencol. Nucl. Phys., 2002, **A698**: 13—22; Satz H. Nucl. Phys., 2003, **A715**: 3—19; Stock R. J. Phys., 2004, **G30**: S633-S1423
- 5 Heinz U. Nucl. Phys., 2003, **A721**: 30; Gyulassy M. Nucl-th/0403032; Shuryak E V. Nucl. Phys., 2005, **A750**: 64; Müller B. Nucl. Phys., 2005, **A750**: 84
- 6 Heinz U, Kuhlman A. Nucl-th/0411054; Kolb Peter F et al. hep-ph/0006129
- 7 LI X G et al. Nucl. Phys. Rev., 2005, **22**(3): 243
- 8 Bohr A, Mottelson B. Nuclear Structure, (Vol. II) New York: Benjamin, 1975, 133
- 9 LI B A. Phys. Rev., 2000, **C61**: 021903
- 10 Kolb P F, Huovinen P, Heinz U W et al. Phys. Lett., 2001, **B500**: 232
- 11 Wilson W K et al. Phys. Rev., 1990, **C41**: R1881
- 12 Danielewicz P. Phys. Rev., 1995, **C51**: 716
- 13 Bastid N et al. Nucl. Phys., 1997, **A622**: 573
- 14 Lambrecht D et al. Z. Phys., 1994, **A350**: 115
- 15 Kolb P F, Huovinen P, Heinz U et al. Phys. Lett., 2001, **B500**: 232
- 16 Heiselberg H, Levy A M. Phys. Rev., 1999, **C59**: 2716
- 17 WANG X N. Phys. Rev., 2001, **C63**: 054902
- 18 Gyulassy M, Vitev I, WANG X N. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 2537
- 19 Ollitrault J Y. Nucl-ex/9802005

Simulation for Elliptic Flow of UU Collisions at CSR Energy Region in Lanzhou^{*}

WU Ke-Jun^{1,1)} LUO Xiao-Feng² LIU Feng¹

1 (Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)

2 (University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract We employ here a Relativistic Transport (ART) Model for Uranium + Uranium collisions at $E_b = 0.52\text{GeV}/u$. We study the impact parameter, rapidity and transverse momentum dependence of elliptic flow v_2 for nucleons and pions in two extreme orientation UU collisions. It indicates that elliptic flow of nucleons and pions are always out-of plane as a result of squeeze-out effect. The maximal absolute value of elliptic flow, which is about 12%, appears in body-body central UU collisions when the initial spatial anisotropy reach the maximum. In minibias events, the magnitudes of elliptic flow are similar for mid-rapidity nucleons in tip-tip and body-body UU collisions, but which is smaller for mid-rapidity pions in tip-tip. Nucleons and pions are produced primarily by Δ decay at low transverse momentum and by participant rescattering at high transverse momentum. Thus, elliptic flow in tip-tip and body-body are similar and have a visible drop in higher transverse momentum ($P_t > 0.3\text{GeV}/c$) as a result of spectators rescatterings and reabsorbtionas.

Key words deformation, elliptic flow, minibias, mean field

Received 2 November 2006

^{*} Supported by National Natural Science Foundation of China (10575042, 10675111), Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-N18) and the Cultivation Fund of the Key Scientific and Technical Innovation Project, Ministry of Education of China (704035)

1) E-mail: wukj@iopp.cnu.edu.cn