



中能区重离子碰撞中椭圆流的动力学产生机制分析

崔特^{1,2}, 刘玲^{1*}, 李鹏程^{3,2}, 王永佳², 李庆峰^{2,1,3,4}

1. 沈阳师范大学物理科学与技术学院, 沈阳 110034;

2. 湖州师范学院理学院, 湖州 313000;

3. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;

4. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000

*联系人, E-mail: liuling@synu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-17; 接受日期: 2021-01-26; 网络出版日期: 2021-04-13

国家自然科学基金(编号: 11875125, U2032145, 12047568)、国家重点研发计划(编号: 2020YFE0202002)和浙江省“万人计划”资助项目

摘要 近年来, 椭圆流(v_2)作为研究重离子碰撞动力学过程的重要观测量之一而备受关注. 本文基于极端相对论量子分子动力学(UrQMD)模型, 反向追踪反应末态处于中心快度区($|y_0| < 0.1$)的核子的演化过程, 探究这些核子的 v_2 随时间的变化. 通过分别记录这些核子在平均场、核子-核子碰撞作用前后的 v_2 来探究这两部分对 v_2 产生的影响. 以入射能量为每核子0.4 GeV、碰撞参数为5 fm的Au+Au碰撞为例, 计算结果表明平均场对中心快度区核子的 v_2 的贡献大约占30%, 而碰撞对它的贡献约占70%. 此外, 还发现不考虑碰撞项中的泡利阻塞效应时给出的 v_2 比考虑泡利阻塞效应时的要大10%左右.

关键词 重离子碰撞, 椭圆流, 平均场, 核子-核子碰撞

PACS: 21.65.+f, 24.10.-i, 25.75.-q

1 引言

核物质状态方程(EOS)表征了每核子能量 $E(\rho, \delta)$ 与核物质密度 ρ 以及同位旋不对称度 δ 的关系. 核物质状态方程不仅与核结构和核反应的研究息息相关, 还与核天体物理中的诸多过程紧密相连, 因此一直以来都是核物理相关研究领域的重要内容之一^[1-14]. 中能(每核子入射能量约

为几百个MeV到几个GeV)重离子碰撞实验是产生高温-高密核物质的重要手段之一, 但是碰撞过程中产生的高温-高密核物质存在的时间非常短, 目前在实验中很难直接测量它的性质, 通常情况下需要借助于输运模型^[1-4]才能间接提取出核物质状态方程的信息. 集体流能够表征末态粒子的集体运动, 其在动量空间分布呈现出各向异性, 是探究核物质状态方程的重要观测量之一^[15, 16]. 将

引用格式: 崔特, 刘玲, 李鹏程, 等. 中能区重离子碰撞中椭圆流的动力学产生机制分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 082011

Cui T, Liu L, Li P C, et al. Analysis of the dynamical mechanism for elliptic flow production in heavy-ion collisions at intermediate energies (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 082011, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0491

末态粒子动量空间方位角分布进行傅里叶展开, 即 $\frac{dN}{d\phi} = v_0[1 + 2v_1 \cos(\phi) + 2v_2 \cos(2\phi)]$, 其中 ϕ 是出射粒子相对于反应平面的方位角, 第一项系数 v_1 被称为直接流, 第二项 v_2 为椭圆流. 对于特定的反应体系、碰撞能量和碰撞参数, v_1 和 v_2 同时依赖于快度 y_0 和横动量 $p_t = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$. 本文主要讨论的是处于中心快度区核子的椭圆流 v_2 (对所有不同 p_t 粒子积分的结果, 也称积分流). 椭圆流定义为: $v_2 \equiv \left\langle \frac{p_x^2 - p_y^2}{p_t^2} \right\rangle = \langle \cos(2\phi) \rangle$, 这里尖括号表示对所有事件所考虑的粒子求平均. 通过上面的定义可以看出, v_2 为正值时表征粒子更倾向于在反应平面(xoz 平面, x 为碰撞参数所在方向, z 为束流方向)内出射, 反之则为出平面(yoZ 平面)挤出.

在中能区重离子碰撞中, 多个实验组的数据都表明中心快度区核子的椭圆流为负值^[16-19], 即核子更倾向于被挤出反应平面, 这主要是由核碰撞中被压缩的核物质在膨胀时受到周围旁观者的阻挡造成的^[15,16]. 随着碰撞能量的增加, 旁观者快速通过碰撞区域, 此时被压缩的核物质在膨胀时受旁观者阻塞的影响减小, 中心快度区粒子的椭圆流就会变成正值. 由此可见, 椭圆流能够反映重离子碰撞中被压缩核物质演化的信息, 因此是探究高密核物质性质的重要探针之一. 从运输模型的角度来看, 平均场和碰撞项作为运输模型中的两个主要部分都会明显影响椭圆流的演化, 而且随着入射能量的改变, 这两者作用的相对强度也会发生变化^[9-11,20-23]. 比如, 在能量较低时, 核子-核子间的碰撞截面虽然比较大, 但由于周围核子的作用, 大多数核子-核子碰撞被阻止(泡利阻塞效应), 此时平均场的作用占主导. 随着入射能量的增加, 碰撞次数增多, 碰撞项作用增强; 又由于粒子更快地离开反应区域, 平均场作用相对减弱^[23]. 在目前引起人们广泛关注的中能区, 平均场和碰撞项对椭圆流的形成都产生重要的影响. 基于运输模型, 定量地分析这两者对椭圆流形成的影响将有助于我们对中能区重离子碰撞中椭圆流产生机制的了解.

本论文将分为以下4个部分: 第2部分择要介绍所使用的UrQMD模型; 第3部分是相关的计算结果及讨论, 主要包括平均场、碰撞项以及泡利阻塞等几个特征因素对椭圆流的影响; 第4部分是结论与

展望.

2 UrQMD 模型介绍

极端相对论量子分子动力学模型, 简称UrQMD模型. 在该模型中, 核子通过具有一定宽度的双高斯波包来表示, 其波包中心的坐标和动量随时间的演化可以用如下哈密顿运动方程来描述^[23-25]:

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \frac{\partial \langle H \rangle}{\partial \mathbf{p}_i}, \quad \dot{\mathbf{p}}_i = -\frac{\partial \langle H \rangle}{\partial \mathbf{r}_i}, \quad (1)$$

其中, $\langle H \rangle$ 是系统的哈密顿量, 它包括动能 T 和相互作用势能 $\langle V_{ij} \rangle$ 两个部分, 其中势能表示为

$$\langle V_{ij} \rangle = \sum_{i \neq j} \left(\frac{\alpha}{2} \left(\frac{\rho_{ij}}{\rho_0} \right) + \frac{\beta}{\gamma + 1} \left(\frac{\rho_{ij}}{\rho_0} \right)^\gamma \right) + \sum_{i \neq j} \left(\frac{t_{md}}{2} \ln^2 \left[1 + a_{md} (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2 \right] \right) \frac{\rho_{ij}}{\rho_0}, \quad (2)$$

其中, ρ_{ij} 为两体相互作用密度^[24], $\alpha = -393 \text{ MeV}$, $\beta = 320 \text{ MeV}$, $\gamma = 1.14$, $t_{md} = 1.57 \text{ MeV}$, $a_{md} = 0.0005 \text{ c}^2/\text{MeV}^2$. 基于这组参数设置, 给出的核物质不可压缩系数为 200 MeV . 近年来, 为了能更好地解释大入射能量范围内的实验结果, 我们对UrQMD模型的平均场、碰撞项等部分做了相应的改进^[26-36]. 当前版本进一步引入了Skyrme能量密度泛函给出的表面能项、表面不对称项以及对称能项:

$$u_{\text{Skyrme}} = u_{\text{sur}} + u_{\text{sur,iso}} + u_{\text{sym}} \\ = \frac{g_{\text{sur}}}{2\rho_0} (\nabla\rho)^2 + \frac{g_{\text{sur,iso}}}{2\rho_0} [\nabla(\rho_n - \rho_p)]^2 \\ + \left(A_{\text{sym}} \frac{\rho^2}{\rho_0} + B_{\text{sym}} \frac{\rho^{\eta+1}}{\rho_0^\eta} + C_{\text{sym}} \frac{\rho^{8/3}}{\rho_0^{5/3}} \right) \delta^2, \quad (3)$$

其中, $\delta = (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p)$ 为同位旋不对称度. 本文采用SV-sym34相互作用, 其对应的参数分别为^[35,37]: $g_{\text{sur}} = 18.2 \text{ MeV fm}^2$, $g_{\text{sur,iso}} = 8.9 \text{ MeV fm}^2$, $A_{\text{sym}} = 20.3 \text{ MeV}$, $B_{\text{sym}} = 14.4 \text{ MeV}$, $C_{\text{sym}} = -9.2 \text{ MeV}$. 对应的对称能的斜率参数 $L = 81 \text{ MeV}$, 对称能的曲率参数 $K_{\text{sym}} = -79.1 \text{ MeV}$. 由于核子是费米子, 泡利不相容原理也需要在模型中考虑^[29], 其作用在较低入射能量重离子碰撞中尤为明显. 当碰

撞后的两个出射核子*i*和*j*同时满足 $\frac{4\pi}{3}r_{ik}^3\frac{4\pi}{3}p_{ik}^3 \geq (2s+1)\left(\frac{h}{2}\right)^3$ 和 $\frac{4\pi}{3}r_{jk}^3\frac{4\pi}{3}p_{jk}^3 \geq (2s+1)\left(\frac{h}{2}\right)^3$, 以及 $P_{\text{block}} = 1 - (1-f_i)(1-f_j) < \xi$ 时, 此次碰撞才会发生, 否则碰撞被阻止, 粒子将保持原有的动量. 其中*k*为与*i*或*j*类型相同的粒子, r_{jk} (r_{ik})为第*j* (*i*)个核子与第*k*个核子之间的相对距离, p_{jk} (p_{ik})为第*j* (*i*)个核子与第*k*个核子之间的相对动量, *s*为粒子的自旋, ξ 为从0到1的随机数, *f*为相空间分布函数.

3 结果与分析

为消除末态碎块构建方式(UrQMD模型中通常使用同位旋依赖的Minimum Spanning Tree方法, 简称iso-MST)对椭圆流的影响, 在此次研究中我们主要关注末态处于中心快度($|y_0| < 0.1$)区的所有核子. 对于本文研究的体系和能量, 平均每个事件处于中心快度区的核子数大约占总核子数的7%. 由于中心快度区大多数核子都处于自由状态(即不在碎块中), 因此本次研究中计算了处于中心快度区的所有核子, 没有考虑碎片的贡献. 本文以入射能量为0.4 GeV/nucleon的 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 半心碰撞($b=5$ fm)为例, 通过追溯反应末态处于中心快度区的所有核子的椭圆流随时间的演化, 定量地分析平均场、碰撞项和泡利阻塞效应对椭圆流形成的影响.

首先, 图1显示了碰撞参数为5 fm, 入射能量为0.4 GeV/nucleon的Au+Au半中心碰撞的中心点处($x=y=z=0$)的密度随时间的演化. 在 $t \approx 16$ fm/c左右时, 中心区域密度达到最大, 约为2倍的饱和密度(ρ_0). 同时可以看到, 有无泡利阻塞效应对中心点密度的影响很小, 说明泡利阻塞并不是通过改变中心点的密度, 而是通过改变碰撞数进而改变粒子的椭圆流. 图1(b)显示的是标记核子(即末态处于中心快度区的)所处的密度环境随时间的演化. 实心点为平均值, 阴影表示平均值的方差. 可以看到, 这些标记核子在最大压缩状态时的平均密度大约为 $1.5\rho_0$, 此时平均密度的方差也达到最大. 即使在最大压缩状态, 这些标记核子中的一部分仍然处于密度较低的环境中. 图2显示的是在不同反应时刻,

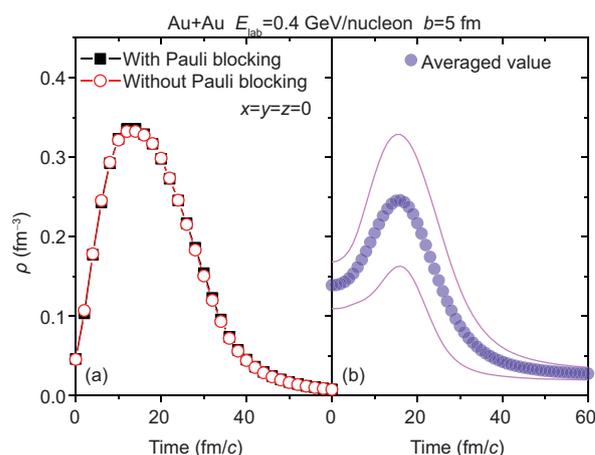


图1 (网络版彩图) (a) 泡利阻塞效应对中心点密度随时间演化的影响, 实心方块和空心圆圈分别表示计算过程中含有和不含泡利阻塞效应的结果. (b) 标记的末态时处于中心快度 $|y_0| < 0.1$ 的核子所经历的密度环境随时间的演化

Figure 1 (Color online) (a) The effect of Pauli blocking on the time evolution of density in the center of the colliding system, the solid squares and the open circles represent the calculations with and without Pauli blocking, respectively. (b) The time evolution of the density experienced by nucleons which are finally emerging in the mid-rapidity $|y_0| < 0.1$.

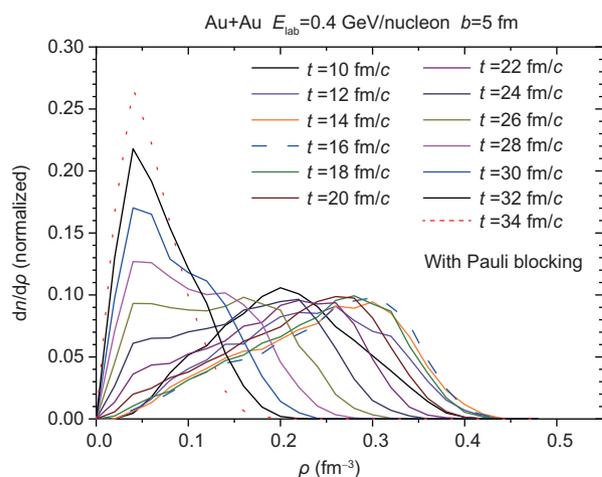


图2 (网络版彩图) 标记核子在时间 $t=10-34$ fm/c的密度分布

Figure 2 (Color online) Density profile of the selected nucleons at $t=10-34$ fm/c.

这些标记核子的密度分布情况. 从 $t=10$ 到 16 fm/c, 由于体系处于趋向压缩状态, 这些标记核子的密度分布逐渐向密度大的方向移动. 当 $t=16$ fm/c (最大压缩状态), 大约80%的标记核子处于密度大于 ρ_0 的

环境中, 而剩下的20%处于低密度环境中. 当 $t \geq 16$ fm/c时, 标记核子的密度分布开始朝低密度端移动. 当 $t=26$ fm/c时, 大约30%的标记核子处于密度大于 ρ_0 的环境中, 而剩下的70%处于低密度环境中. 图1和2表明在整个动力学演化过程中, 末态处于中心快度区的核子经历的密度分布仍然较广, 即经过了高密度区环境也经过了低密度区环境.

其次, 图3中展示的是在单位时间内平均每个标记核子所经历的碰撞数随反应时间的变化情况. 可以看到图3与图1(a)趋势一致, 在 $t \approx 16$ fm/c左右, 中心点密度最大, 单位时间内的碰撞数也达到最大. 当 $t \geq 60$ fm/c时, 核子间相对距离较远, 几乎不再有碰撞发生. 对于本文研究的体系和能量, 有泡利阻塞时, 平均每个标记核子在一次事件中经历了2.5次碰撞, 而没有泡利阻塞时, 每个标记核子在演化全过程中平均经历了2.8次碰撞, 即泡利阻塞减少了约10%的两体碰撞.

我们在模拟过程中通过分别追踪平均场作用和两体碰撞前后核子的椭圆流来探究二者对椭圆流形成的影响. 由碰撞带来的椭圆流的变化可以表示为

$$\Delta v_2^{\text{coll}} = \langle v_2^{\text{after-coll}} - v_2^{\text{before-coll}} \rangle. \quad (4)$$

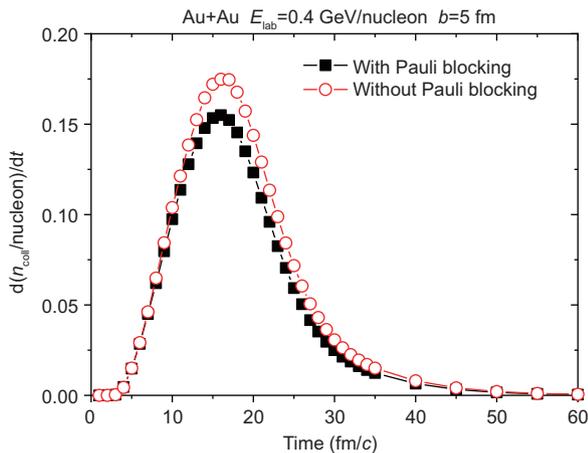


图3 (网络版彩图) 标记核子单位时间内所经历的碰撞数随时间的变化, 实心方块和空心圆圈分别为计算过程中含有和不含有泡利阻塞的结果

Figure 3 (Color online) The time evolution of the number of collisions experienced by the selected nucleons, the solid squares and the open circles stand for the calculations with and without Pauli blocking, respectively.

$v_2^{\text{after-coll}}$ 表示的是核子碰撞后的 $\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2}$ 值, $v_2^{\text{before-coll}}$ 则表示碰撞前核子的 $\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2}$ 值, $\langle \dots \rangle$ 表示对所有标记的核子求平均. Δv_2^{coll} 为一个时间步长内标记的核子所经历的所有碰撞造成的 v_2 的总变化. 若在一个时间步长内, 标记的核子无碰撞发生, 则 $\Delta v_2^{\text{coll}}=0$. 平均场对核子椭圆流的贡献可以表示为

$$\Delta v_2^{m.f.}(t) = \langle v_2^{m.f.}(t + \Delta t) - v_2^{m.f.}(t) \rangle, \quad (5)$$

$v_2^{m.f.}(t)$ 表示 t 时刻平均场势修正前核子的 $\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2}$ 值, $v_2^{m.f.}(t + \Delta t)$ 则为考虑平均场势修正后核子的 $\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2}$ 值. 在本次研究中所选用的时间步长为 $\Delta t=1$ fm/c.

图4中分别展示的是考虑和不考虑泡利阻塞效应时, 反应末态处于中心快度($|y_{\text{ol}}| < 0.1$)区核子的椭圆流以及平均场和核子-核子碰撞导致核子的 $\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2}$ 的平均值改变随时间的演化情况. 从图4(a)可以看到, 在 $t=0-5$ fm/c时, 两个原子核逐渐靠近, 密度逐渐增加, 由于较弱吸引的平均场的存在, 这些标记核子的 $\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2}$ 的平均值有微小的上升趋势; 在 $t=5-25$ fm/c时, $\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2}$ 迅速下降, 这是由于随着反应的进行, 两原子核先被压缩, 并形成高密核物质后开始经历膨胀过程, 在受到旁观者的阻塞后, 核子更倾向于沿着垂直于反应平面的方向运动; 当 $t \geq 25$ fm/c时, 由于核子与核子相互远离, 它们之间的相互作用明显减弱, $\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2}$ 几乎保持不变. 还可以看到, 不考虑泡利阻塞时给出的椭圆流比考虑时给出的值最终要大10%左右, 这是由于不考虑泡利阻塞效应时有更多的核子-核子碰撞发生.

通过追踪这些标记核子在平均场和核子-核子碰撞前后动量的变化, 可以分别研究这两者对椭圆流形成的贡献, 相关结果展示在图4(b)和(c)中. 当 $t \leq 5$ fm/c时, $\Delta v_2^{m.f.}$ 大于0而 Δv_2^{coll} 基本等于0, 因为此时核子-核子碰撞还没有发生, 导致核子 v_2 变化的主要因素是平均场的作用; 随着反应的进行, 在 $t=5-16$ fm/c阶段, 高密核物质逐渐形成, 此时平均场变成以排斥为主, 同时核子-核子碰撞增多, 因此 $\Delta v_2^{m.f.}$ 和 Δv_2^{coll} 都小于0, 且它们的绝对值逐渐增大; 在 $t=16-25$ fm/c阶段, 被压缩的核物质开始迅速膨胀, 因此平均场和核子-核子碰撞效应开始逐渐减弱, $\Delta v_2^{m.f.}$ 和 Δv_2^{coll} 都开始逐渐上升. 当 $t \geq 25$ fm/c时,

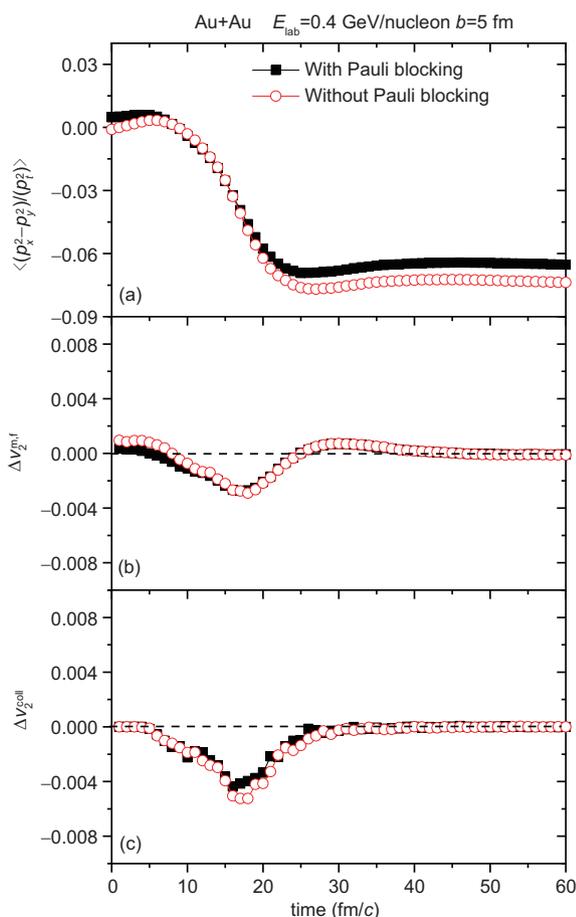


图 4 (网络版彩图) (a) 标记核子的 $\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2}$ 的平均值随时间的演化. 平均场(b)和核子-核子碰撞(c)对标记核子的 $\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2}$ 平均值的变化率的贡献随时间的变化. 实心方块和空心圆圈分别是考虑泡利阻塞和不考虑泡利阻塞的结果

Figure 4 (Color online) (a) The v_2 of the selected nucleons as a function of reaction time. The time evolution of the $\Delta v_2^{m.f.}$ (b) and Δv_2^{coll} (c), respectively. The results obtained from simulations with and without Pauli blocking are represent by solid squares and open circles, respectively.

核子-核子碰撞几乎已经全部停止, 核子开始在低密度环境中演化, 因此 $\Delta v_2^{coll} = 0$. 而由于平均场在低密度时以吸引作用为主, 导致 $\Delta v_2^{m.f.} \geq 0$. 当 $t \geq 40$ fm/c 时, 这些标记的核子已经相互远离, 平均场和核子-核子碰撞效应都变得很弱, 核子动量几乎

致谢 感谢湖州师范学院C3S2 计算中心的大力支持.

参考文献

- 1 Li B, Chen L, Ko C. Recent progress and new challenges in isospin physics with heavy-ion reactions. *Phys Rep*, 2008, 464: 113–281

不再发生改变, 因此椭圆流 v_2 开始保持不变. 通过对比图4(b)和(c)可以看出, 核子-核子碰撞会增强椭圆流(出平面出射增强); 而平均场在低密度区时由于吸引作用会减弱椭圆流(出平面出射减弱), 在高密度区时由于排斥作用会增强椭圆流(出平面出射增强). 总体而言, 在本文所研究的碰撞系统和能量下, 中心快度区核子的椭圆流有70% ($\int \Delta v_2^{coll} \cdot dt / \int (\Delta v_2^{coll} + \Delta v_2^{m.f.}) \cdot dt \approx 70\%$) 是由核子-核子碰撞导致的, 剩下的30% ($\int \Delta v_2^{m.f.} \cdot dt / \int (\Delta v_2^{coll} + \Delta v_2^{m.f.}) \cdot dt \approx 30\%$) 是由平均场贡献的.

4 结论与展望

采用极端相对论量子分子动力学(UrQMD)模型, 通过回溯末态时处于中心快度区的核子在动力学过程中的演化信息记录这些核子在平均场和核子-核子碰撞前后的动量变化, 探究了平均场、碰撞项以及泡利阻塞对椭圆流形成的贡献. 研究表明, 对于入射能量为0.4 GeV/nucleon, 碰撞参数为5 fm的Au+Au碰撞, 核子-核子碰撞对椭圆流的贡献约占70%, 而平均场对椭圆流的贡献约占30%. 泡利阻塞作为碰撞项的重要组成部分, 会压低核子-核子碰撞数, 从而影响椭圆流. 我们的计算结果表明, 泡利阻塞对中心点的密度影响较小, 主要是通过改变碰撞数进而改变粒子的椭圆流. 考虑泡利阻塞时, 平均每个标记核子在一次事件的全部演化过程中所经历的两体碰撞次数减少了约10%, 导致 v_2 相应地减小.

平均场、核子-核子碰撞以及泡利阻塞对中能区重离子碰撞中椭圆流的形成和演化还会受到碰撞体系大小、碰撞参数、碰撞能量以及末态碎片形成等因素的影响. 利用追踪末态处于中心快度区的核子在平均场和碰撞前后的动量变化, 可以系统地分析这些因素对椭圆流的影响, 将为我们深入理解中能区重离子碰撞中的椭圆流的产生奠定更加坚实的基础, 相关工作正在整合分析中.

- 2 Wang Y J, Li Q F. Application of microscopic transport model in the study of nuclear equation of state from heavy ion collisions at intermediate energies. *Front Phys*, 2020, 15: 44302
- 3 Zhang Y X, Wang N, Li Q F, et al. Progress of quantum molecular dynamics model and its applications in heavy ion collisions. *Front Phys*, 2020, 15: 54301
- 4 Xu J. Semiclassical descriptions for quantum transport of heavy-ion collisions (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 072001 [徐骏. 重离子碰撞量子输运的半经典描述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 072001]
- 5 Wang S T, Hu Q, Sun Y Z, et al. Progress of study on the properties of nuclear matter with high baryon density at CSR energy region (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 102006 [王世陶, 胡强, 孙亚洲, 等. CSR能区的高重子密度核物质研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 102006]
- 6 Xiao Z G. Heavy ion reactions and equation of state of nuclear matter (in Chinese). *Physics*, 2020, 49: 137–143 [肖志刚. 重离子核反应与核物质状态方程. 物理, 2020, 49: 137–143]
- 7 Xu J, Liu H, Ko C M. Elliptic flow splittings between particles and their antiparticles in relativistic heavy-ion collisions (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 790–799 [徐骏, 刘鹤, Ko C M. 相对论重离子碰撞中正反粒子椭圆流的劈裂. 科学通报, 2020, 65: 790–799]
- 8 Feng Z Q. Nuclear dynamics and particle production near threshold energies in heavy-ion collisions. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 40
- 9 Ono A. Dynamics of clusters and fragments in heavy-ion collisions. *Prog Particle Nucl Phys*, 2019, 105: 139–179
- 10 Xu J. Transport approaches for the description of intermediate-energy heavy-ion collisions. *Prog Particle Nucl Phys*, 2019, 106: 312–359
- 11 Colonna M. Collision dynamics at medium and relativistic energies. *Prog Particle Nucl Phys*, 2020, 113: 103775
- 12 Ma Y G, Xu N, Liu F. Study of the QCD phase structure at HIAF (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 112009 [马余刚, 许怒, 刘峰. 基于HIAF集群的QCD相结构研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112009]
- 13 Ye Y L, Yang X F, Liu Y, et al. Radioactive ion beam physics related to HIAF (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 112003 [叶沿林, 杨晓菲, 刘洋, 等. 与HIAF装置相关的放射性核束物理研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112003]
- 14 Li Q F, Li Z X. The density- and isospin-dependent Δ -formation cross section and its decay width. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 972011
- 15 Danielewicz P. Determination of the equation of state of dense matter. *Science*, 2002, 298: 1592–1596
- 16 Andronic A, Lukasiak J, Reisdorf W, et al. Systematics of stopping and flow in Au+Au collisions. *Eur Phys J A*, 2006, 30: 31–46
- 17 Pinkenburg C, Ajitanand N N, Alexander J M, et al. Elliptic flow: Transition from out-of-plane to in-plane emission in Au+Au collisions. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 1295–1298
- 18 Reisdorf W, et al. (FOPI Collaborations). Systematics of central heavy ion collisions in the 1 A GeV regime. *Nucl Phys A*, 2010, 848: 366–427
- 19 Reisdorf W, et al. (FOPI Collaborations). Systematics of azimuthal asymmetries in heavy ion collisions in the 1 A GeV regime. *Nucl Phys A*, 2012, 876: 1–60
- 20 Xu J, Chen L W, Tsang M Y B, et al. Understanding transport simulations of heavy-ion collisions at 100 A and 400 A MeV: Comparison of heavy-ion transport codes under controlled conditions. *Phys Rev C*, 2016, 93: 044609
- 21 Zhang Y X, Wang Y J, Colonna M, et al. Comparison of heavy-ion transport simulations: Collision integral in a box. *Phys Rev C*, 2018, 97: 034625
- 22 Ono A, Xu J, Colonna M, et al. Comparison of heavy-ion transport simulations: Collision integral with pions and Δ resonances in a box. *Phys Rev C*, 2019, 100: 044617
- 23 Li Q, Shen C, Guo C, et al. Nonequilibrium dynamics in heavy-ion collisions at low energies available at the GSI Schwerionen Synchrotron. *Phys Rev C*, 2011, 83: 044617
- 24 Bass S. Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions. *Prog Particle Nucl Phys*, 1998, 41: 255–369
- 25 Aichelin J. “Quantum” molecular dynamics—A dynamical microscopic n -body approach to investigate fragment formation and the nuclear equation of state in heavy ion collisions. *Phys Rep*, 1991, 202: 233–360
- 26 Li Q, Li Z, Soff S, et al. Probing the equation of state with pions. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2006, 32: 151–164
- 27 Li Q, Li Z, Soff S, et al. Medium modifications of the nucleon nucleon elastic cross section in neutron-rich intermediate energy HICs. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2006, 32: 407–415
- 28 Li Q, Bleicher M, Stöcker H. The effect of “pre-formed” hadron potentials on the dynamics of heavy ion collisions and the HBT puzzle. *Phys Lett B*, 2008, 659: 525–530
- 29 Li Q, Shen C, Guo C, et al. Nonequilibrium dynamics in heavy-ion collisions at low energies available at the GSI Schwerionen Synchrotron. *Phys Rev C*, 2011, 83: 044617
- 30 Wang Y, Guo C, Li Q, et al. Collective flow of light particles in Au+Au collisions at intermediate energies. *Phys Rev C*, 2014, 89: 034606

- 31 Zou L Y, Li M, Guo C C, et al. Influence of the time-step on the production of free nucleons and pions from heavy-ion collisions around 1 GeV/nucleon. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2016, 59: 122011
- 32 Li Q F, Wang Y J, Wang X B, et al. Helium-3 production from Pb+Pb collisions at SPS energies with the UrQMD model and the traditional coalescence afterburner. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2016, 59: 632002
- 33 Li M, Guo C C, Zou L Y, et al. The influence of KN potential on the production of kaon mesons in heavy-ion collisions at intermediate energies (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 062002 [李淼, 郭琛琛, 邹丽艳, 等. KN势对重离子碰撞中K介子产生的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 062002]
- 34 Du Y S, Wang Y J, Li Q F, et al. The effect of Lorentz-like force on collective flows of K^+ in Au+Au collisions at 1.5 GeV/nucleon. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 062011
- 35 Li P, Wang Y, Li Q, et al. Effects of the in-medium nucleon-nucleon cross section on collective flow and nuclear stopping in heavy-ion collisions in the Fermi-energy domain. *Phys Rev C*, 2018, 97: 044620
- 36 Li P C, Wang Y J, Li Q F, et al. Collective flow and nuclear stopping in heavy ion collisions in Fermi energy domain. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 177
- 37 Dutra M, Lourenço O, Sá Martins J S, et al. Skyrme interaction and nuclear matter constraints. *Phys Rev C*, 2012, 85: 035201

Analysis of the dynamical mechanism for elliptic flow production in heavy-ion collisions at intermediate energies

CUI Te^{1,2}, LIU Ling^{1*}, LI PengCheng^{3,2}, WANG YongJia² & LI QingFeng^{2,1,3,4}

¹College of Physics Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China;

²School of Science, Huzhou University, Huzhou 313000, China;

³School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

⁴Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Elliptic flow (v_2) is an essential observable for studying the dynamic process of heavy-ion collisions, and has attracted significant attention in recent years. Based on the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model, by tracking the nucleons that are emitted at mid-rapidity ($|y_0| < 0.1$) in the entire collision process, the time evolution of elliptic flow of these selected nucleons is studied. The contributions of the mean-field potential and collision term to the elliptic flow are disentangled by recording the momenta of nucleons before and after each collision and propagation in the potential. In the semi-peripheral ($b=5$ fm) Au+Au collision at $E_{\text{beam}} = 0.4$ GeV/nucleon, approximately 30% of the v_2 is attributed to the mean-field potential, while the remaining 70% is attributed to the nucleon-nucleon collisions. v_2 is further increased (by approximately 10%) if the Pauli blocking effect is excluded.

heavy ion collisions, elliptic flow, mean-field, nucleon-nucleon collision

PACS: 21.65.+f, 24.10.-i, 25.75.-q

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0491](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0491)