论文

弹靶核的形变效应对中能区U+U碰撞的影响

杨佳焯^{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, 刘玲, E-mail: liuling@synu.edu.cn; 王永佳, E-mail: wangyongjia@zjhu.edu.cn

收稿日期: 2021-01-31; 接受日期: 2021-03-08; 网络出版日期: 2021-06-10

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(编号: 2018R52017)资助项目

摘要 原子核的形变一直以来都是核结构研究中的重要内容之一, 近年来, 核结构效应对核反应或者重离子碰撞的影响受到越来越多的关注. 本文基于极端相对论量子分子动力学(UrQMD)模型, 在初始化部分考虑弹靶核的形变效应, 模拟入射能量为0.4 GeV/nucleon下的²³⁸U+²³⁸U碰撞, 探究了初始化时弹靶核的形变对于反应末态粒子集体流、 π^-/π^+ 产额比以及核阻止本领等观测量的影响. 研究发现, 在形变原子核的尖对尖(长轴对长轴)碰撞中核阻止本领最大. 腰对腰(短轴对短轴)的完全中心碰撞($b=0$ fm)时, 仍然有椭圆流产生. 尖对尖碰撞给出的 π^-/π^+ 产额比大于腰对腰碰撞给出的结果. 此外, 在本文所研究的体系和能量下, 铀核的形变对质子椭圆流的影响大于对称能对它的影响, 但中子质子椭圆流之比几乎不受初始铀核形变效应的影响.

关键词 重离子碰撞, 集体流, 原子核形变, 对称能**PACS:** 13.75.Cs, 21.90.+f, 24.10.-i, 25.70.-z

1 引言

重离子碰撞实验是研究核物质状态方程的重要手段之一^[1-14]. 开展重离子碰撞实验需要借助大型的粒子加速器, 如我国的HIRFL-CSR和在建的HIAF, 美国的RHIC和FRIB, 欧洲的LHC和在建的FAIR, 法国的SPIRAL2, 日本的RIBF等. 虽然这些粒子加速器能够达到的碰撞能量、被加速粒子的类型和主要用途各有差异, 但是探究重离子碰撞中产

生的高密核物质的性质是各个加速器的主要研究内容之一. 重离子碰撞实验结合输运模型模拟是目前常用的提取核物质性质的方法^[12,15,16]. 核结构信息(如原子核的形状和结团结构^[17-19]、中子质子密度分布、核子动量分布等)是输运模型的输入量之一, 因此探究核结构信息对重离子碰撞观测量的影响有十分重要的意义.

近年来, 越来越多的研究表明核结构的效应会影响核反应或者重离子碰撞中的某些观测量, 比如,

引用格式: 杨佳焯, 刘玲, 李鹏程, 等. 弹靶核的形变效应对中能区U+U碰撞的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 112011

Yang J Y, Liu L, Li P C, et al. Effects of nuclear deformation in U+U collisions at the intermediate energy (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 112011, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0029

在熔合反应能区, 靶核形变会使超重核合成截面改变^[20,21]. 在相对论能区的重离子碰撞中, 原子核的结构效应也会对某些观测量产生显著影响^[22-26].

基于相对论输运模型(A Relativistic Transport Model, ART), Li^[27]模拟了入射能量为10 GeV/nucleon, 不同初始形状下的²³⁸U+²³⁸U碰撞, 发现短轴对短轴(Belly-Belly, 亦称腰对腰)中心碰撞($b=0$ fm)时仍然会有椭圆流产生. Luo等人^[28]同样基于ART模型, 计算了入射能量为0.52 GeV/nucleon的²³⁸U+²³⁸U碰撞, 发现原子核形状会在一定程度上影响核阻止本领. 基于同位旋依赖的玻尔兹曼输运模型(Isospin-dependent Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck, IBUU), Wei等人^[29,30]指出不同中子皮厚度会影响非对心²⁰⁸Pb+²⁰⁸Pb碰撞给出的 π^-/π^+ 产额比值; Xu等人^[31]发现不同的初始化形状会在一定程度上影响²³⁸U+²³⁸U给出的核子的直接流、椭圆流以及 π^-/π^+ 产额比值. 基于同位旋依赖的量子分子动力学模型(Isospin-dependent Quantum Molecular Dynamics, IQMD模型), 方德清课题组^[32,33]发现不同的中子皮厚度会影响费米能区重离子碰撞中给出的中子、质子以及³H/³He的产额比值.

近年来, 对称能作为同位旋非对称核物质状态方程中重要的组成部分而备受关注. 中子质子的椭圆流之比是探测对称能密度依赖行为的重要探针之一. 因此, 原子核的形状是否会影响中子质子椭圆流之比值得进一步研究. 本文使用极端相对论量子分子动力学UrQMD (Ultrarelativistic Quantum Molecular Dynamics)模型来模拟入射能量在每核子0.4 GeV下的²³⁸U+²³⁸U碰撞. 为了探究不同的初始化核形状对于反应末态观测量的影响, 本文选取两种极端形变条件下的碰撞, 分别是运动方向平行于长轴的尖对尖碰撞(Tip-Tip), 运动方向垂直于长轴的腰对腰碰撞(Belly-Belly), 同时还选取不具有形变的球对球碰撞(SP-SP), 为初始化形变效应的讨论提供重要的参照.

本文分为如下3个部分: 在第2部分简要的介绍所使用的UrQMD模型、如何初始化形变核以及相关的观测量; 第3部分是相应的计算结果与讨论, 主要包括形变效应对于核阻止、直接流、椭圆流、 π^-/π^+ 产额比的影响; 最后为结论与展望.

2 UrQMD模型和观测量简介

极端相对论量子分子动力学, 简称UrQMD模型, 已被广泛地应用于研究多个能区的重离子碰撞^[34-38], 主要包括初始化、平均场、碰撞项和末态碎片构建四大部分^[34,35]. 在模型中核子的波函数通常由具有一定宽度的高斯波包来表示^[39]:

$$\phi_i(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{(2\pi\sigma_r^2)^{3/4}} \exp\left(\frac{-(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t))^2}{4\sigma_r^2}\right) \exp\left(\frac{i\mathbf{p}_i(t)\mathbf{r}(t)}{\hbar}\right), \quad (1)$$

其中 $\mathbf{r}_i$ 和 $\mathbf{p}_i$ 分别表示第 i 个核子在坐标空间以及动量空间的波包中心的位置及动量, 波包宽度参数 σ_r^2 与原子核的大小有关, 这里取为2 fm². 在UrQMD模型中, 球形核的初始化主要过程如下: 首先利用 $R_0 = 1.128A^{1/3} - 0.89A^{-1/3}$ 计算原子核的半径, 其中 A 为弹核或者靶核的质量数. 其次, 在半径为 R_0 的球内随机抽样每个核子的坐标, 即

$$R_x = R \sin \theta \cos \varphi, \quad (2)$$

$$R_y = R \sin \theta \sin \varphi, \quad (3)$$

$$R_z = R \cos \theta, \quad (4)$$

其中 R 为0到半径 R_0 的随机数, $\theta(0, \pi)$ 和 $\varphi(0, 2\pi)$ 为随机的角度. 若抽样的原子核内任意两个核子之间的距离小于1.6 fm则重新进行抽样. 弹核和靶核内所有的核子坐标确定后, 计算每个核子所在位置的密度以及对应的费米动量 p_F , 每个核子的动量在半径为 p_F 的费米球内随机抽样. 抽样得到弹核和靶核的坐标和动量后, 计算抽样得到原子核的结合能. 若核子结合能与实验值相差小于1 MeV, 则使用本次抽样, 否则重新进行抽样. 对于形变核, 本文考虑如下的抽样方式, 其短轴和长轴分别表示为

$$R_{\text{short}} = R_0 \left[1 - \frac{\beta_2}{4} \sqrt{\frac{5}{\pi}} \right], \quad (5)$$

$$R_{\text{long}} = R_0 \left[1 + \frac{\beta_2}{2} \sqrt{\frac{5}{\pi}} \right]. \quad (6)$$

在本次研究中弹核靶核均取 $\beta_2=0.215$ ^[40]. 对于尖对尖碰撞, 每个核子的坐标抽样遵循

$$R_x = R_{\text{short}} \sin \theta \cos \varphi, R_y = R_{\text{short}} \sin \theta \sin \varphi,$$

$$R_z = R_{\text{long}} \cos \theta.$$

对于腰对腰碰撞, 将计算 R_x 和 R_z 的公式进行交换即可. 在平均场部分, 核子波包中心的坐标和动量 r_i 和 p_i 的动力学演化遵循哈密顿正则方程:

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}_i}, \quad \dot{\mathbf{p}}_i = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{r}_i}, \quad (7)$$

其中, H 为系统的哈密顿量, 可以写为以下形式:

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m} + \langle V_{ij} \rangle. \quad (8)$$

相互作用势能 $\langle V_{ij} \rangle$ 包括动量相关部分以及由Skyrme能量密度泛函给出的密度依赖部分, 具体形式见文献[41, 42]. 本文采用同位旋依赖的最小生成树(Iso-MST)方法进行末态碎块的构建[43]. 末态时, 当两个质子(两个中子, 质子-中子)之间的相对距离 $\delta R_{ij} < 2.8(3.8) \text{ fm}$, 相对动量 $\delta P_{ij} < 0.25 \text{ GeV/c}$, 这两个核子就被看作在同一个碎片中. 关于碰撞项部分以及 π 介子产生部分的内容可见文献[2, 3, 41, 44]. 基于这些改进后的UrQMD模型对中低能区重离子碰撞中的多个实验观测量都能给出较好的描述[2, 3, 41, 42, 44–46]. 为了对比对称能软硬和初始化形变效应对相关观测量的影响, 本文在计算过程中选取了三组常用的由Skyrme相互作用给出的对称能Skz4, SV-sym34和SkI1, 它们对应的对称能斜率参数 L 分别为5.8, 81, 161 MeV. 本文研究的主要观测量为直接流、椭圆流、核阻止本领以及 π^-/π^+ 产额比. 把粒子方位角分布做傅里叶展开得到的第一项和第二项的系数就是直接流(v_1)和椭圆流(v_2):

$$v_1 \equiv \langle \cos(\phi) \rangle = \left\langle \frac{p_x}{p_t} \right\rangle, \quad (9)$$

$$v_2 \equiv \langle \cos(2\phi) \rangle = \left\langle \frac{p_x^2 - p_y^2}{p_t^2} \right\rangle, \quad (10)$$

其中, $p_t = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ 表示横动量. 一般情况下, 对于特定的反应体系, v_1 和 v_2 都依赖于约化快度 y_0 和横动量 p_t . 核阻止本领能表征能量在不同方向上的耗散情况, 也是反映重离子碰撞过程的重要观测量. 核阻止本领的观测量有许多[45, 46], 本文使用FOPI合作

组[47]采用的末态产物横、纵快度分布方差的比值来表征核阻止本领:

$$V_{\text{artl}} = \frac{\Gamma_{\text{dN/dy}_x}}{\Gamma_{\text{dN/dy}_z}}, \quad (11)$$

其中,

$$\Gamma_{\text{dN/dy}_{x,z}} = \langle y_{x,z}^2 \rangle = \frac{\sum (y_{x,z}^2 N_{y_{x,z}})}{\sum (N_{y_{x,z}})}, \quad (12)$$

其中 $y_{x,z}$ 均为约化快度, N_x, N_z 为相应快度区间内的粒子数目. 当 $0 < V_{\text{artl}} < 1$ 时, 表示穿透性较强, 更多的能量仍然沿着碰撞方向耗散; 当 $V_{\text{artl}} = 1$ 时表示完全阻止, 此时粒子沿各个方向膨胀的强度相当; 而 $V_{\text{artl}} > 1$ 时表示过阻止, 意味着产生了较强的横向膨胀.

3 结果与分析

为了直观地展现出三种不同初态形状的 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 对心碰撞在整个动力学演化过程中的差异, 图1给出了 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 中心碰撞中尖对尖((a1)–(a5))、腰对腰((b1)–(b5))和球对球((c1)–(c5))碰撞的密度分布随时间的演化图. 可以看到初态弹核和靶核的不同形状导致碰撞中核子的密度分布有差异. 尤其是在20 fm/c左右时, 也是体系达到最大压缩的状态, 不同初始形状给出的密度分布有较为明显的差异. 尖对尖碰撞给出的核子密度分布在沿着 z 轴方向分布最宽, 而腰对腰碰撞给出的核子密度分布沿着 x 方向分布最宽. 核子密度分布的差异会体现在核阻止本领的差异上, 正如图2所示. 尖对尖碰撞给出的出射粒子的核阻止本领 V_{artl} 最大, 而腰对腰碰撞给出的最小, 球形碰撞给出的结果位于两者之间. 这是因为尖对尖碰撞时, 弹核靶核穿过彼此的时间更长, 产生的碰撞更多, 阻碍作用也就更强. 这一结论与文献[28]中采用ART模型计算另一个核阻止本领的观测量($R = \frac{2}{\pi} \frac{\sum P_{ti}}{\sum P_{zi}}$, 其中 P_{ti} 和 P_{zi} 代表第 i 个核子的横向动量和纵向动量)得到的结论相一致.

图3(a)和(b)分别显示了三种不同初始形状条件下 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 半中心碰撞(约化碰撞参数 $b_0 = 0.3$)所产生的直接流及中心碰撞($b = 0 \text{ fm}$)所产生的椭圆流随约化快度 y_0 的变化. 首先, 对于中心碰撞(实心图

图 1 (网络版彩图) $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 系统在入射能量为 0.4 GeV/nucleon 中心碰撞 ($b=0$ fm) 时不同初始化结构的密度分布随时间的演化

Figure 1 (Color online) The time evolution of the density distribution of $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ central ($b=0$ fm) collisions at 0.4 GeV/nucleon.

例)时, 无论哪种形状的碰撞均没有直接流产生. 而半中心碰撞(空心图例)时, 尖对尖碰撞、球对球碰撞和腰对腰碰撞均有直接流产生并且斜率依次变小. 其次, 可以看到中心碰撞时, 尖对尖碰撞以及球对球碰撞没有椭圆流的产生, 而腰对腰碰撞有明显的椭圆流的产生. 这是由于腰对腰中心碰撞的重叠区域(高密度区)密度分布在反应(x - o - z)平面是椭圆形的, 而尖对尖碰撞以及球对球碰撞对应的密度分布在 x - o - z 平面是对称的圆形. 这一结论与其他运输模型给出的结论也相一致 [27,31].

图 2 (网络版彩图) 入射能量为 0.4 GeV/nucleon 的 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 球对球、尖对尖和腰对腰中心碰撞 ($b = 0-2$ fm) 中质子、氘核、氚核的核阻止本领 $Vartl$

Figure 2 (Color online) Mass dependence of $Vartl$ for hydrogen isotopes in SP-SP, Tip-Tip and Belly-Belly central ($b = 0-2$ fm) $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ collisions at beam energy of 0.4 GeV/nucleon.

为了定量地评估初始化形变效应对集体流带来的影响, 图4展示了中心快速区自由质子的直接流 v_1 的斜率和 v_2 随约化碰撞参数的变化. v_{11} 是在中心快速区直接流随约化快速度变化的斜率, 由公式 $v_1(y_0) = v_{10} + v_{11}y_0 + v_{13}y_0^3$ 拟合得到 [48]. 可以看到, 在

图 3 (网络版彩图) 三种不同弹靶核初态结构下约化碰撞参数为 $b_0=0.3$ (空心图例) 时的直接流 (a) 和中心碰撞 $b_0=0$ (实心图例) 中椭圆流 (b) 随约化快速度的变化情况. 约化碰撞参数 $b_0 = b/b_{\text{max}}$, 对于尖对尖碰撞 $b_{\text{max}} = 2R_{\text{short}}$, 而对于腰对腰碰撞 $b_{\text{max}} = 2R_{\text{long}}$

Figure 3 (Color online) The rapidity distribution of the direct flow (a) and elliptic flow (b) of free protons produced from SP-SP, Tip-Tip and Belly-Belly $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ collisions at 0.4 GeV/nucleon. The open and solid symbols represent the semi-central ($b_0=0.3$) and central ($b_0=0$) collisions, respectively. The reduced impact parameter $b_0 = b/b_{\text{max}}$, is equal to $b_{\text{max}} = 2R_{\text{short}}$ and $b_{\text{max}} = 2R_{\text{long}}$ for Tip-Tip and Belly-Belly $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ collisions, respectively.

三种初始化结构形态下以及随机形变取向碰撞后, 自由质子直接流的斜率 v_{11} 都随着碰撞参数的增大而增大. 与图3(a)的结论一样, 尖对尖碰撞产生的直接流的斜率增长最快并且最大, 腰对腰碰撞产生的直接流的斜率增长最慢且最小, 球对球碰撞的结果介于二者之间, 并且随机形变取向与球对球碰撞的结果十分接近. 当 $b_0=0.5$ 时, 尖对尖碰撞给出的质子的直接流斜率比球形碰撞给出的结果大10%左右. 这是因为在本文所研究的体系能量和碰撞参数下, 尖对尖碰撞时核子经历的碰撞次数最多. 图4(b)展示了随着碰撞参数的增大中心快度区自由质子的 v_2 逐渐减小, 表明随着初始几何不对称性的增大, 椭圆流增强. 还可以看到随着碰撞参数的增加, 不同结构形态碰撞下给出的 v_2 的差异也在逐渐变化. 这是因为椭圆流的大小除了受初始几何形状的影响外, 还受碰撞项(核子核子碰撞以及旁观者的阻碍效应)的影响.

众所周知, 中子质子椭圆流之比(v_2^n/v_2^p)是探测对称能的敏感探针^[2]之一. 为了对比对称能和弹靶核初始化结构效应对椭圆流的影响, 本研究中还考虑了三组不同软硬的对称能参数. 在图5和6中显示的是不同初始形状、不同软硬对称能时给出的质子的 v_2 以及 v_2^n/v_2^p 随速度和横动量的变化. 容易看到虽

图4 (网络版彩图) 三种不同弹靶核初态形状以及随机形变取向, 中心快度区($y_0=0$)自由质子的直接流斜率(a)和椭圆流(b)随约化碰撞参数的变化. 计算的统计误差棒小于点的大小, 所以没有显示

Figure 4 (Color online) The slope of direct flow (a) and elliptic flow (b) of free protons at mid-rapidity ($y_0=0$) as a function of the reduced impact parameter in SP-SP, Tip-Tip, Belly-Belly and random deformation orientation $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ collisions. Where error bars are not shown, they fall within the symbols.

然初始核的形变对质子 v_2 的影响大于对称能对 v_2 的影响, 但 v_2^n/v_2^p 却几乎不受初始核形变的影响. 一般情况下, 像中子质子椭圆流之比这样敏感于对称能的观测量与同位旋相关的量的相关性较高. 本文中虽然改变了弹核和靶核的形状, 但没有改变中子质子的密度分布, 这可能是 v_2^n/v_2^p 不敏感于形变的主要原因. 图7中展示了初始核的不同形变以及不同软硬对称能时给出的 v_2^n/v_2^p (a)以及 π^-/π^+ (b)随约化碰撞

图5 (网络版彩图) 入射能量为0.4 GeV/nucleon的半中心 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 碰撞中自由质子椭圆流 v_2 (a), 中子质子椭圆流之比 v_2^n/v_2^p (b)随约化快度 y_0 的变化情况. 不同线形分别代表三种不同形式的对称能给出的结果, 红色实线、实心方块和空心三角分别代表球对球、尖对尖和腰对腰碰撞

Figure 5 (Color online) The rapidity distribution of the elliptic flow of free protons (a) and the ratio of elliptic flow v_2^n/v_2^p between protons and neutrons (b) produced from semi-central $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ collisions at 0.4 GeV/nucleon. The lines represent the results obtained from SP-SP collisions with different symmetry energies. Solid squares and open triangles stand for Tip-Tip and Belly-Belly $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ collisions, respectively.

图6 (网络版彩图) 与图5相似, 这里显示的是自由质子椭圆流(a)和中子质子椭圆流之比 v_2^n/v_2^p (b)随横动量 p_T 的变化

Figure 6 (Color online) Similar to that in Figure 5, but here is the transverse momentum distribution of the elliptic flow v_2 (a) and the elliptic flow ratio of neutrons with respect to protons v_2^n/v_2^p (b).

图 7 (网络版彩图)中心快度区中子质子椭圆流之比 v_2^n/v_2^p (a)和 π^-/π^+ 的总产额比 π^-/π^+ (b)随约化碰撞参数 b_0 的变化

Figure 7 (Color online) The ratio of elliptic flow between protons and neutrons v_2^n/v_2^p (a) and the production ratio of π^-/π^+ (b) as a function of the reduced impact parameter.

参数的变化。“硬”(SkI1)的对称能给出的 v_2^n/v_2^p 最大、 π^-/π^+ 最小,而“软”(Skz4)的对称能给出的 v_2^n/v_2^p 最小、 π^-/π^+ 最大,这是由于在高压时“硬”(“软”)的对称能对中子的排斥更强(弱),这与之前的许多研究结果都一致[44,49]。在不同约化碰撞参数下,形变对 v_2^n/v_2^p 的影响都小于对称能对它的影响。尖对尖碰撞给出的 π^-/π^+ 产额比略大于腰对腰碰撞给出的 π^-/π^+ 产额比,这与Xu等人[31]采用IBUU模型给出的结论相一致。由于本次研究中考考虑的三组对称能的“软硬”差异明显,所以形变对 π^-/π^+ 产额比的影响略小于对称能的影响。当进一步细化对称能软硬程度的研究时,形变对利用 π^-/π^+ 产额比探测对称能的影响则需要引起重视。

致谢 感谢湖州师范学院C3S2计算中心的大力支持。

4 结论与展望

基于极端UrQMD模型,考虑初始化过程中弹靶核的不同结构形态,以入射能量为每核子0.4 GeV的 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 碰撞为例,探究了弹靶核初始化结构效应对核阻止本领、直接流、椭圆流以及中质子椭圆流之比、 π^-/π^+ 产额比的影响。发现尖对尖碰撞时给出的核阻止本领最强,腰对腰最弱。对于碰撞参数等于0 fm的中心碰撞,由于腰对腰碰撞所产生的高温-高密区域在 x - o - y 平面有显著的不对称性,从而有较明显的椭圆流产生,而对于初始时是尖对尖或者是球形碰撞的情况不会有椭圆流产生。随着碰撞参数的增大,弹靶核的初态结构效应对中心快度区椭圆流的影响逐渐减小。此外,还发现初态结构效应对自由质子的椭圆流随快度和横动量的变化影响明显强于对称能对它们的影响,而中子质子的椭圆流之比随快度和横动量的变化情况受初始核形变的影响都较弱。还发现尖对尖碰撞给出的 π^-/π^+ 产额比要大于腰对腰碰撞给出的结果,利用 π^-/π^+ 产额比探测对称能的密度依赖行为时,形变的影响需要引起重视。

本研究中只考虑了初始时弹核和靶核的形状对观测量的影响,除此之外,核结构研究中热点关注的核子皮、中子和质子的密度分布、核子动量分布等因素对重离子碰撞的影响,尤其是对称能敏感观测量的影响值得进一步研究,从而为精确地确定对称能的密度依赖行为清除障碍,相关工作仍在进行中。

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
- 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 Feng Z Q. Nuclear dynamics and particle production near threshold energies in heavy-ion collisions. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 40
- 5 Ono A. Dynamics of clusters and fragments in heavy-ion collisions. *Prog Particle Nucl Phys*, 2019, 105: 139–179
- 6 Xu J. Transport approaches for the description of intermediate-energy heavy-ion collisions. *Prog Particle Nucl Phys*, 2019, 106: 312–359
- 7 Colonna M. Collision dynamics at medium and relativistic energies. *Prog Particle Nucl Phys*, 2020, 113: 103775

- 8 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]
- 9 Zhao H W, Xu H S, Xiao G Q, et al. Huizhou accelerator complex facility and its future development (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 112006 [赵红卫, 徐珊瑚, 肖国青, 等. 惠州加速器集群装置及其未来发展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112006]
- 10 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]
- 11 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]
- 12 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]
- 13 Xiao Z G. Transport of isospin degree of freedom in heavy ion reactions and the constraint of symmetry energy (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2020, 37: 249–259 [肖志刚. 重离子碰撞中同位旋自由度输运和对称能约束. 原子核物理评论, 2020, 37: 249–259]
- 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 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]
- 16 Feng Z Q. Strange particle production and hypernucleus formation in medium and high energy heavy-ion collisions (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 735–744 [冯兆庆. 中能重离子碰撞中奇异粒子产生和超核形成机制. 科学通报, 2018, 63: 735–744]
- 17 Ren Z X, Zhang S Q, Zhao P W, et al. Stability of the linear chain structure for ^{12}C in covariant density functional theory on a 3D lattice. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 112062
- 18 Ring P. A rotating α -chain in the nucleus ^{12}C . *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 112063
- 19 Wang Y, Wu X, Zhang S, et al. Selection rules of electromagnetic transitions for chirality-parity violation in atomic nuclei. *Sci Bull*, 2020, 65: 2001–2006
- 20 Liu Z H, Bao J D. Deformation effects of target nuclei in superheavy nucleosynthesis (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2004, 21: 370–373 [刘祖华, 包景东. 超重核合成中的靶核形变效应. 原子核物理评论, 2004, 21: 370–373]
- 21 Li Q, Zuo W, Li W, et al. Deformation and orientation effects in the driving potential of the dinuclear model. *Eur Phys J A*, 2005, 24: 223–229
- 22 Xu H, Wang X, Li H, et al. Importance of isobar density distributions on the chiral magnetic effect search. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 022301
- 23 Li H, Xu H, Zhao J, et al. Multiphase transport model predictions of isobaric collisions with nuclear structure from density functional theory. *Phys Rev C*, 2018, 98: 054907
- 24 Zhang S, Ma Y G, Chen J H, et al. Nuclear cluster structure effect on elliptic and triangular flows in heavy-ion collisions. *Phys Rev C*, 2017, 95: 064904
- 25 Filip P, Lednicky R, Masui H, et al. Initial eccentricity in deformed $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ and $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV at the BNL relativistic heavy ion collider. *Phys Rev C*, 2009, 80: 054903
- 26 Shou Q Y, Ma Y G, Sorensen P, et al. Parameterization of deformed nuclei for Glauber modeling in relativistic heavy ion collisions. *Phys Lett B*, 2015, 749: 215–220
- 27 Li B A. Uranium on uranium collisions at relativistic energies. *Phys Rev C*, 2000, 61: 021903
- 28 Luo X F, Dong X, Shao M, et al. Stopping effects in U+U collisions with a beam energy of 520 MeV/nucleon. *Phys Rev C*, 2007, 76: 044902
- 29 Wei G F. Elimination of the influence of neutron-skin size difference of the initial colliding nuclei in Pb+Pb collisions. *Phys Rev C*, 2015, 91: 014616
- 30 Wei G F, Li B A, Xu J, et al. Influence of neutron-skin thickness on the π^-/π^+ ratio in Pb+Pb collisions. *Phys Rev C*, 2014, 90: 014610
- 31 Xu J, Martinot Z, Li B A. Disentangling effects of collision geometry and symmetry energy in U+U collisions. *Phys Rev C*, 2012, 86: 044623
- 32 Sun X Y, Fang D Q, Ma Y G. Nuclear equation of state dependence of the probe of neutron skin thickness (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2016, 33: 8–12 [孙小艳, 方德清, 马余刚. 中子皮厚度测量探针对核物质状态方程的依赖性. 原子核物理评论, 2016, 33: 8–12]
- 33 Sun X Y, Fang D Q, Ma Y G, et al. Neutron/proton ratio of nucleon emissions as a probe of neutron skin. *Phys Lett B*, 2010, 682: 396–400
- 34 Bass S. Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions. *Prog Particle Nucl Phys*, 1998, 41: 255–369
- 35 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

- 36 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
- 37 Liu Y, Wang Y, Li Q, et al. Collective flows of pions in Au+Au collisions at energies 1.0 and 1.5 GeV/nucleon. [Phys Rev C](#), 2018, 97: 034602
- 38 Ye Y, Wang Y, Li Q, et al. Beam energy dependence of cumulants of the net-baryon, net-charge, and deuteron multiplicity distributions in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=3.0\text{--}5.0$ GeV. [Phys Rev C](#), 2020, 101: 034915
- 39 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
- 40 Moller P, Nix J R, Myers W D, et al. Nuclear ground-state masses and deformations. [Atom Data Nucl Data Tables](#), 1995, 59: 185–381
- 41 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
- 42 Wang Y, Guo C, Li Q, et al. Constraining the high-density nuclear symmetry energy with the transverse-momentum-dependent elliptic flow. [Phys Rev C](#), 2014, 89: 044603
- 43 Zhang Y, Li Z, Zhou C, et al. Effect of isospin-dependent cluster recognition on the observables in heavy ion collisions. [Phys Rev C](#), 2012, 85: 051602
- 44 Liu Y, Wang Y, Cui Y, et al. Insights into the pion production mechanism and the symmetry energy at high density. [Phys Rev C](#), 2021, 103: 014616
- 45 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
- 46 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
- 47 Reisdorf W, Andronic A, Auerbeck R, et al. Systematics of central heavy ion collisions in the 1 A GeV regime. [Nucl Phys A](#), 2010, 848: 366–427
- 48 Reisdorf W, Stockmeier M, Andronic A, et al. Systematics of pion emission in heavy ion collisions in the 1 A GeV regime. [Nucl Phys A](#), 2007, 781: 459–508
- 49 Wang Y, Li Q, Leifels Y, et al. Study of the nuclear symmetry energy from the rapidity-dependent elliptic flow in heavy-ion collisions around 1 GeV/nucleon regime. [Phys Lett B](#), 2020, 802: 135249

Effects of nuclear deformation in U+U collisions at the intermediate energy

YANG JiaYe^{1,2}, LIU Ling^{1*}, LI PengCheng^{3,2}, WANG YongJia^{2*} & 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

Nuclear deformation is an important topic in the study of nuclear structure. The influence of nuclear structure on nuclear reactions and heavy-ion collisions has attracted considerable attention recently. Based on the ultra-relativistic quantum molecular dynamics (UrQMD) model, the effect of nuclear deformation in $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ at the beam energy of 0.4 GeV/nucleon is investigated and several observables, such as the stopping power, collective flow, and π^-/π^+ yield ratio, are calculated. It is found that the stopping power obtained with tip-tip (the two nuclei with their long axes head-on) collisions is the largest among collisions with different deformations. For belly-belly (the two nuclei with their short axes head-on and long axes parallel in the reaction plane) collisions, the elliptic flow exists even for the most central collision ($b=0$ fm). π^-/π^+ yield ratio obtained with tip-tip collision is larger than that obtained with belly-belly collision. In addition, the influence of nuclear deformation on the elliptic flow of free protons is stronger than that of nuclear symmetry energy in $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ collisions at 0.4 GeV/nucleon, while the elliptic flow ratio between neutrons and protons shows hardly any sensitivity to different deformations of uranium.

heavy-ion collision, collective flows, nuclear deformation, symmetry energy

PACS: 13.75.Cs, 21.90.+f, 24.10.-i, 25.70.-z

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0029](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0029)