

中能重离子碰撞过程中的镜像核发射率

孙 克, 郭文军

(上海理工大学 理学院, 上海 200093)

摘要: 利用量子分子动力学模型研究了中能重离子碰撞中的镜像核发射率, 选取 4 个稳定的轻反应系统 ($^{64}\text{Ge}+^{64}\text{Ge}$, $^{64}\text{Zn}+^{64}\text{Zn}$, $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$, $^{64}\text{Fe}+^{64}\text{Fe}$) 和 5 个稳定的重反应系统 ($^{124}\text{Ba}+^{124}\text{Ba}$, $^{124}\text{Xe}+^{124}\text{Xe}$, $^{124}\text{Te}+^{124}\text{Te}$, $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$, $^{124}\text{Cd}+^{124}\text{Cd}$), 分别研究了它们在不同的时间、对称势、入射能量、系统中质比下的镜像核发射率的特征。研究表明, 不论轻、重反应系统, 发射率 $Y(n)/Y(p)$ 和镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 都随着系统中质比的增大而增大。 $Y(n)/Y(p)$ 为前平衡发射中子产额与质子产额之比, $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 为前平衡发射 ^3H 产额与 ^3He 产额之比。相对于发射率 $Y(n)/Y(p)$, 同位旋相关平均场对镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 更为灵敏。在重反应系统、缺中子反应系统中, 镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 作为同位旋相关平均场的灵敏探针更为合适。

关键词: 同位旋效应; 镜像核发射率; 重离子碰撞

中图分类号: O 571.6 **文献标志码:** A

Mirror nuclei emissivity in heavy ion collisions

SUN Ke, GUO Wenjun

(College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The mirror nuclei emissivity in medium energy heavy ion collisions was studied by using a quantum molecular dynamics model. Four stable light nuclide reaction systems ($^{64}\text{Ge}+^{64}\text{Ge}$, $^{64}\text{Zn}+^{64}\text{Zn}$, $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$, $^{64}\text{Fe}+^{64}\text{Fe}$) and five stable heavy nuclide reaction systems ($^{124}\text{Ba}+^{124}\text{Ba}$, $^{124}\text{Xe}+^{124}\text{Xe}$, $^{124}\text{Te}+^{124}\text{Te}$, $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$, $^{124}\text{Cd}+^{124}\text{Cd}$) were selected to study the change of the characteristics of the mirror nuclei emissivity at different time, under different incident energy and with different system neutron-proton ratio. The results show that both the $Y(n)/Y(p)$ ratio and the $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ ratio increase with the increase of the system neutron-proton ratio in both light and heavy reaction systems. $Y(n)/Y(p)$ is the ratio of pre-equilibrium neutron yield to proton yield, $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ is the ratio of pre-equilibrium ^3H yield to ^3He yield. Compared with the $Y(n)/Y(p)$ ratio, the isospin-dependent mean field is more sensitive to the $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ ratio. In the heavy reaction system and neutron deficient reaction system, the mirror nuclei emissivity $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ is more suitable as a sensitive probe for isospin-dependent mean field.

收稿日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10905041)

第一作者: 孙 克(1990-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 核物理. E-mail: 2298637098@qq.com

通信作者: 郭文军(1976-), 男, 副教授. 研究方向: 核物理. E-mail: impgwj@126.com

Keywords: *isospin effect; mirror nuclei emissivity; heavy ion collisions*

近年来,随着放射性原子核束的制备和应用,特别是放射性原子核束所引起的中能重离子碰撞的应用,使研究和确定同位旋非对称核物质状态方程成为了研究热点^[1]。研究同位旋非对称核物质状态方程对于了解同位旋非对称物质的性质和放射性原子核的结构十分重要。同时,它对于理解超新星爆发以及中子星冷却^[2-3]等天体演化现象^[4-5]具有重要意义。

在中能重离子碰撞的同位旋效应中,对称势、同位旋相关核子-核子碰撞截面等都是非常重要的同位旋相关物理量,为了提取这些同位旋相关物理量的知识,寻找在实验上对它们灵敏的物理观测量(探针)是非常必要的^[6]。文献[7-9]通过量子分子动力学研究发现,原子核阻止、中子发射数和质子发射数是提取同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏探针,而它们对于对称势则不灵敏。文献[10-13]发现同位旋分馏、自由核子中质比和负正 π 介子的比值 π^-/π^+ 是提取同位旋相关平均场的灵敏探针。Xing等^[14-15]对中能重离子碰撞过程中的中子和质子发射数进行分析后发现,在很宽的能量和碰撞参数下,缺中子碰撞系统中,中子(质子)发射数强烈地依赖同位旋相关核子-核子碰撞截面,较弱地依赖对称势,而在丰中子系统中,上述规律减弱。另外,还发现库仑作用和动量相关作用对以上物理观测量具有一定的影响,但并不改变这些物理观测量作为同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏探针。Zhao等^[16]基于重质量弹核打轻质量靶核的反应,发现在入射能量约大于80 MeV/u的能区,中等质量碎片多重性与发射带电粒子总数之间的关联是提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏物理量。Guo等^[17-18]发现具有200~1 000 MeV/u能量的光子与原子核发生碰撞后,中子发射数灵敏地依赖于同位旋相关核子-核子碰撞截面,而对称势对中子发射数的影响不明显。

为了研究中能重离子碰撞中的动力学过程,人们提出了许多原子核输运模型^[19],主要有 Boltzmann 模型和量子分子动力学模型两大类。前者包括 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck (BUU)方程^[20]和 Boltzmann-Langevin (BL)方程等,后者包括量子分子动力学模型(QMD)^[21]和同位旋相关量子分子动力学模型(IQMD)等。Zhang等^[22]使用 BUU

模型研究了 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 系统中的质子椭圆流与对称能的敏感关系,研究发现,质子椭圆流与对称能非常敏感,且质子椭圆流对称能的敏感性随着入射能量的增大而减低,在入射能量为每核子400 MeV左右时对对称能最为敏感。文献[23-25]利用 BUU 模型研究了核子能量在140 MeV/u下 $^{40}\text{Ca}+^{124}\text{Sn}$ 反应中的对称能,发现在高动量情况下,自由核子中质比的速率分布对称能敏感。Zhao等^[26]使用 IQMD 模型,计算了45~150 MeV/u能区内重离子碰撞前平衡发射率 $Y(n)/Y(p)$,发射率 $Y(n)/Y(p)$ 是前平衡发射中子产额与质子产额之比,结果表明, $Y(n)/Y(p)$ 灵敏地依赖于对称势强度,而对核子-核子碰撞截面的同位旋效应、Pauli 势、动量相关势及碰撞参数都不灵敏。Guo等^[27]使用 IQMD 模型研究了中能重离子碰撞中的 α 粒子发射数,发现丰中子碰撞系统 α 粒子发射数强烈地依赖同位旋相关平均场,而较弱地依赖同位旋相关核子-核子碰撞截面的强度和形式。文献[28-29]利用 Skyrme-Hartree-Fock 方法计算所得的中子、质子密度,以及费米模型所得的中子质子费米面,抽样出稳定的 ^{58}Fe 和 ^{58}Ni 初始核,利用同位旋相关量子分子动力学模型,计算了 $^{58}\text{Fe}+^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$ 两个反应系统在不同碰撞参数下的平衡能,计算结果表明,在不同的碰撞参数下,丰中子反应系统的 $^{58}\text{Fe}+^{58}\text{Fe}$ 比 $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$ 具有更高的平衡能,并与实验符合较好。

迄今为止,使用原子核输运模型,发现了许多同位旋相关的灵敏观测量,但镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 作为同位旋相关平均场的灵敏观测量的研究还不明确。发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 是前平衡发射 ^3H 产额与 ^3He 产额之比。本文将在这方面作进一步的研究。

1 理论模型

为了更好地描述中能重离子碰撞过程中的同位旋效应,在量子分子动力学模型(QMD)的基础上发展了同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)。在 IQMD 模型中,首先利用 Skyrme-Hartree-Fock 方法^[30]给出弹核与靶核的中子和质子的密度分布,然后利用 Monte-Carlo 方法分别抽样

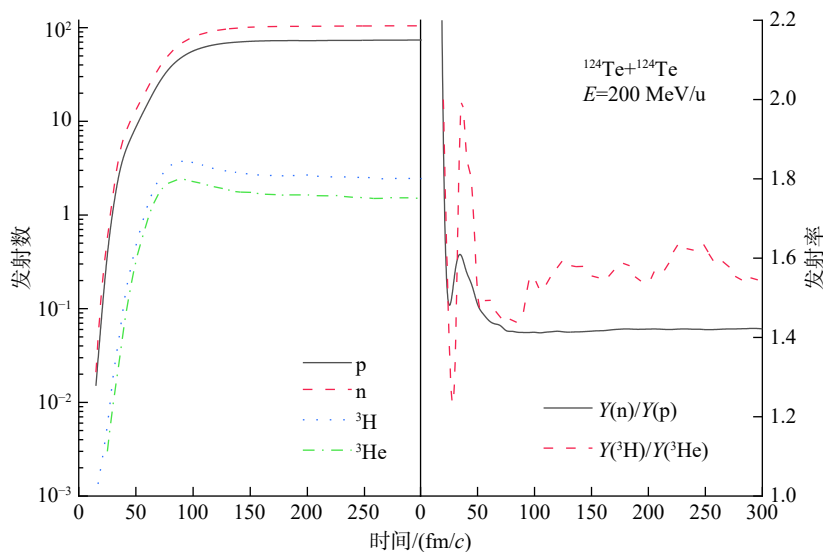


图1 $^{124}\text{Te}+^{124}\text{Te}$ 系统发射数和发射率随时间的变化

Fig.1 Change of emission number and emissivity with time in the $^{124}\text{Te}+^{124}\text{Te}$ system

为了进一步研究和突出镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 对同位旋相关平均场的灵敏性。图2的左边为 $^{124}\text{Te}+^{124}\text{Te}$ 系统 (200 MeV/u) 在不同对称势 u_1, u_2, u_3 情况下 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 和 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 的发射率, 图2的右边为对称势 u_1 下对称势强度系数 $c=28, 30, 32, 34$ MeV/u 时的 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 和 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 的发射率。可以看出, 3种不同对称势和4种不同对称势强度系数下, $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 总是高于 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 。说明在各种不同对称势情况下, 发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 对同位旋相关的平均场更为依赖。

为了去除系统质量数对反应的影响, 选择相同质量数的不同反应系统来研究系统中质比对反应过程的影响。图3是200 MeV/u下, 质量数相同、中质比不同的反应系统中发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 与发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 随系统中质比的变化情况。图3的左边是4个轻反应系统 $^{64}\text{Ge}+^{64}\text{Ge}$, $^{64}\text{Zn}+^{64}\text{Zn}$, $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$, $^{64}\text{Fe}+^{64}\text{Fe}$, 系统中质比分别是1, 1.13, 1.29, 1.46。图3的右边是5个重反应系统 $^{124}\text{Ba}+^{124}\text{Ba}$, $^{124}\text{Xe}+^{124}\text{Xe}$, $^{124}\text{Te}+^{124}\text{Te}$, $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$, $^{124}\text{Cd}+^{124}\text{Cd}$, 系统中质比分别为1.21, 1.30, 1.39, 1.48, 1.58。可以看出, 不论轻、重反应系统, 发

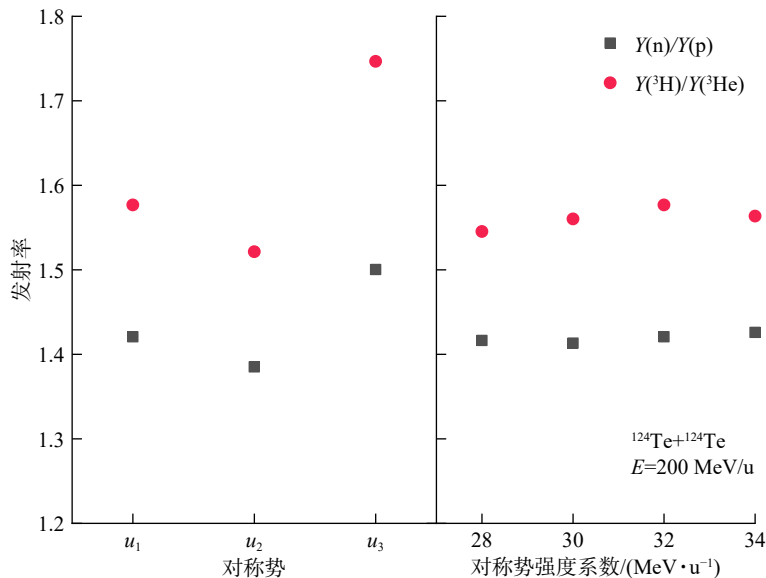


图2 $^{124}\text{Te}+^{124}\text{Te}$ 系统在不同对称势和对称势强度系数下的发射率

Fig.2 Emissivity under different symmetry potentials and symmetric potential intensity coefficients in the $^{124}\text{Te}+^{124}\text{Te}$ system

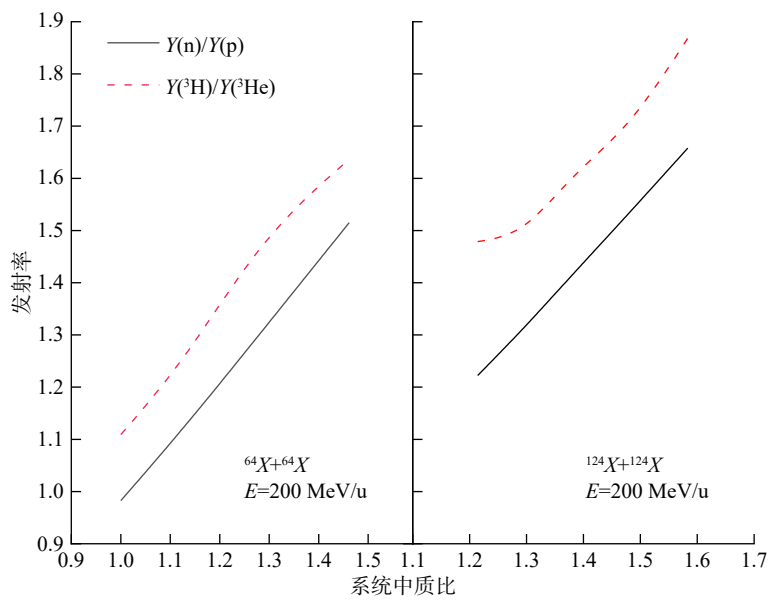


图3 不同反应系统发射率随系统中质比的变化

Fig.3 Change of emissivity with system neutron-proton ratio in different reaction systems

射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 总是比发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 要高,说明发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 将同位旋效应放大,发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 比发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 更加依赖同位旋相关的平均场。发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 与发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 都随系统中质比的升高而升高,这是因为随着系统中质比的升高,气相和液相中的中质比都升高,所以,两种发射率都升高。还可以看出,发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 与发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 之间的间隔几乎不变,而重反应系统中的间隔稍大一些,这是由于重反应系统总的动能更大,反

应更加剧烈,同位旋分馏更彻底。所以,在不同系统中质比下,发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 依然是同位旋相关平均场灵敏的物理观测量,特别是在重反应系统中。

为了去除系统中质比对发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 和发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 的影响,将图3中的每个数据点与系统中质比相除,得到图4。由图4可以看出,发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 要比发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 高很多,说明去除系统中质比影响后,发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 依然是比发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 更灵敏的同位旋

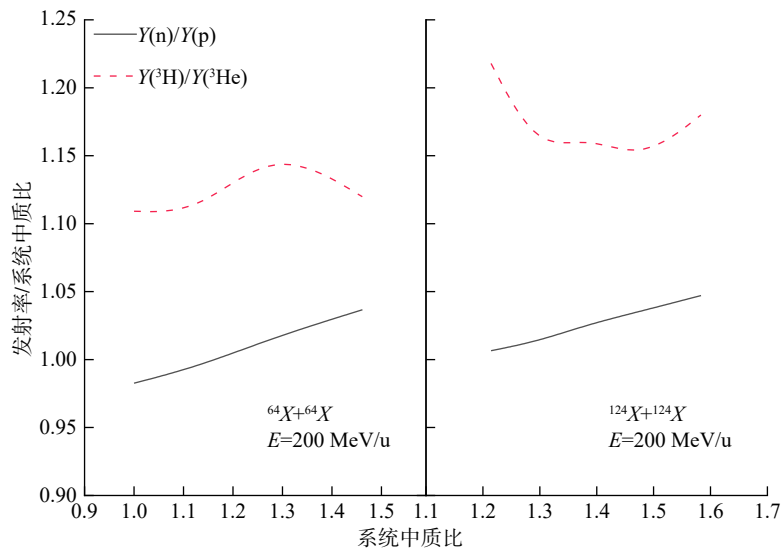


图4 修正后的发射率随系统中质比的变化

Fig.4 Change of emissivity with system neutron-proton ratio after correction

相关平均场的探针。发射率 $Y(n)/Y(p)$ 随着系统中质比的增加而平缓上升, 这是由于随着系统中质比的增加, 同位旋分馏更加剧烈, 使气相中的中质比差异更明显。发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 近似于水平线, 表明系统中质比对发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 的影响不显著。另外, 无论轻反应系统还是重反应系统, 发射率 $Y(n)/Y(p)$ 与发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 之间的间隔都随着系统中质比的升高而减小。这说明在缺中子反应系统中, 发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 对同位旋相关平均场的依赖性比发射率 $Y(n)/Y(p)$ 更强, 发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 是同位旋相关平均场的灵敏探针。

图 5 为轻反应系统 $^{64}\text{Zn}+^{64}\text{Zn}$, $^{64}\text{Fe}+^{64}\text{Fe}$ 和重反应系统 $^{124}\text{Te}+^{124}\text{Te}$, $^{124}\text{Cd}+^{124}\text{Cd}$ 在入射能量为 50, 100, 150, 200, 300 MeV/u 时, 发射率 $Y(n)/Y(p)$ 与发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 的变化情况。系统中质比 $\lambda_{n/p}$ 分别为 1.13, 1.46, 1.39, 1.58。在丰中子系统 $^{64}\text{Fe}+^{64}\text{Fe}$, $^{124}\text{Cd}+^{124}\text{Cd}$ 中, 同位旋分馏效应较为明显, 发射率 $Y(n)/Y(p)$, $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 均高于系统中质比。在缺中子系统 $^{64}\text{Zn}+^{64}\text{Zn}$ 中, 发射率 $Y(n)/Y(p)$ 低于系统中质比, 这是由于缺中子系统比丰中子系统具有更多的质子数, 所以, 具有更强的库仑作用, 库仑势对质子是排斥作用, 对中子是吸引作用, 使得在同位旋分馏过程中更多的质子发射到了气相部分(轻碎片)。同时缺中子系统的中子数和质子数相近, 对称势的影响较小, 而对称势对中子是排斥作用, 对质子是吸引作用,

这样中子受到的排斥作用不足, 所以, 缺中子系统中气相部分的中质比会小于系统中质比。而丰中子系统对称势的作用越来越强, 对称势和库仑作用相互竞争, 使得气相部分的中质比高于系统中质比。随着入射能量的提高, 反应更加剧烈, 小碎块的产额越来越大, 同位旋分馏效应减弱, 气相中的中质比逐渐趋近于系统中质比。所以, 随着入射能量的提高, 发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 和发射率 $Y(n)/Y(p)$ 有下降的趋势。在不同体系中质比、质量数、入射能的情况下, 发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 均高于系统中质比, 发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 均高于发射率 $Y(n)/Y(p)$ 。特别是在缺中子系统中, 发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 应当是比发射率 $Y(n)/Y(p)$ 更好的关于同位旋相关平均场的灵敏探针。

图 6 计算了 4 个轻反应系统 $^{64}\text{Ge}+^{64}\text{Ge}$, $^{64}\text{Zn}+^{64}\text{Zn}$, $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$, $^{64}\text{Fe}+^{64}\text{Fe}$ 和 5 个重反应系统 $^{124}\text{Ba}+^{124}\text{Ba}$, $^{124}\text{Xe}+^{124}\text{Xe}$, $^{124}\text{Te}+^{124}\text{Te}$, $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$, $^{124}\text{Cd}+^{124}\text{Cd}$ 的发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 与发射率 $Y(n)/Y(p)$ 之差随能量的变化情况。9 个反应系统的发射率差值趋近于同一条水平线, 且都大于零。说明无论是轻反应系统还是重反应系统, 发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 与发射率 $Y(n)/Y(p)$ 之间的间隔都近乎相同。无论是轻反应系统还是重反应系统, 在不同入射能量下, 发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 总是比发射率 $Y(n)/Y(p)$ 要大, 发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 比发射率 $Y(n)/Y(p)$ 更依赖于同位旋相关平均场, 是同位旋相关平均场合适的灵敏探针。

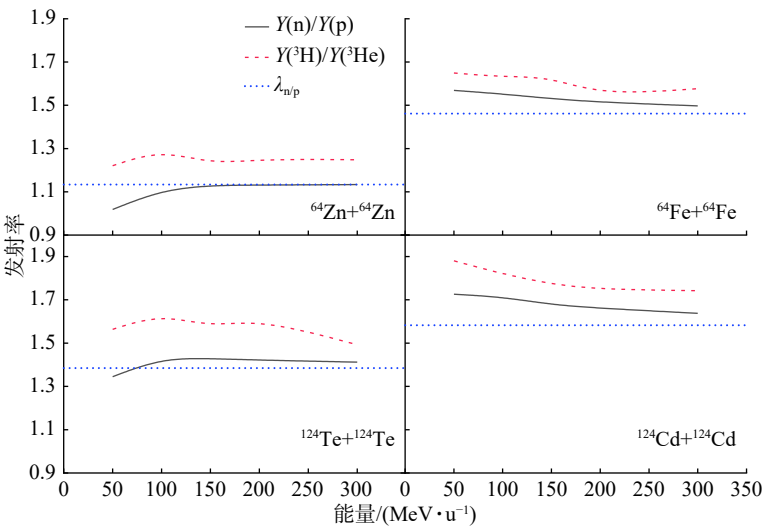


图 5 不同反应系统发射率随能量的变化

Fig.5 Change of emissivity with energy in different reaction systems

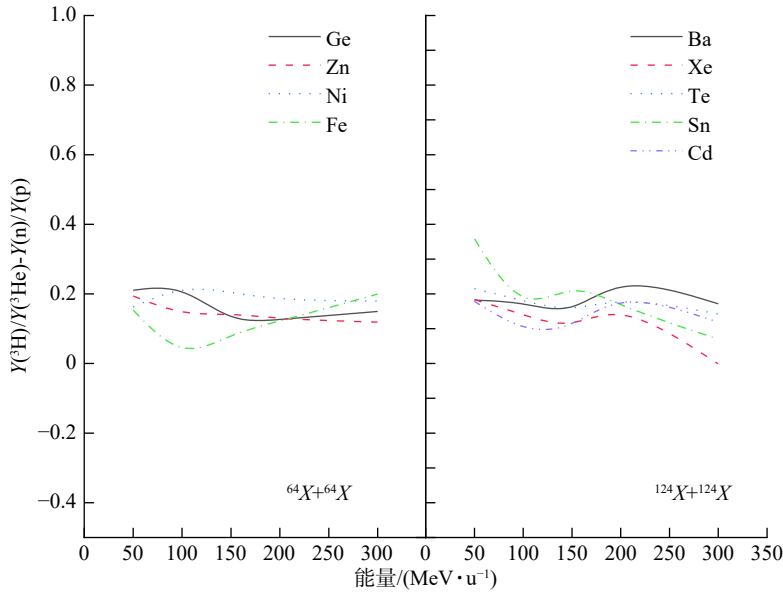


图 6 不同反应系统发射率之差随能量的变化

Fig.6 Change of $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He}) - Y(\text{n})/Y(\text{p})$ with energy in different reaction systems

3 结 论

利用 IQMD 模型对 4 个轻反应系统和 5 个重反应系统进行计算，研究了不同的时间、入射能量、对称势、对称势强度系数及系统中质比下发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 与镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 的变化情况后，得出结论：

a. 镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 和发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 都依赖于同位旋相关平均场，是同位旋相关平均场的灵敏探针。镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 比发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 高很多，镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 是较好的同位旋相关平均场的灵敏探针。

b. 镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 和发射率 $Y(\text{n})/Y(\text{p})$ 都随系统中质比的增加而增加。在缺中子反应系统中，镜像核发射率 $Y(^3\text{H})/Y(^3\text{He})$ 作为同位旋相关平均场灵敏探针的效果更好。

参考文献：

[1] LIU J Y, GUO W J, ZUO W, et al. The equation of state of the isospin asymmetrical nuclear matter[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 1517–1525.
[2] ZHANG N B, LI B A, XU J. Combined constraints on the equation of state of dense neutron-rich matter from terrestrial nuclear experiments and observations of neutron stars[J]. The Astrophysical Journal, 2018, 859(2): 90–101.
[3] ZHANG N B, LI B A. Extracting nuclear symmetry energies at high densities from observations of neutron

stars and gravitational waves[J]. The European Physical Journal A, 2019, 55(3): 39–61.
[4] PEILERT G, STOCKER H, GREINER W. Physics of high-energy heavy-ion collisions[J]. Reports on Progress in Physics, 1994, 57(9): 533–602.
[5] KAHANA S H. Supernovae and the hadronic equation of state[J]. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 1989, 39: 231–258.
[6] LIU J Y, CHEN B, ZHAO Q, et al. A sensitive probe to isospin dependent in medium nucleon nucleon cross section in intermediate energy heavy ion collision[J]. Nuclear Physics Review, 1999, 16(3): 165–168.
[7] LIU J Y, GUO W J, ZHAO Q, et al. Nuclear stopping as a probe to nucleon-nucleon cross section in heavy ion collisions[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, 25(4): 336–342.
[8] YANG Y F, LIU J Y, ZUO W, et al. Entrance channel dependence of the isospin effects of the nuclear stopping in intermediate energy heavy ion collisions[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, 25(8): 765–771.
[9] GUO W J, LIU J Y, ZUO W, et al. Isospin effect of neutron (proton) emission number in intermediate energy heavy ion collisions[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2002, 26(12): 1264–1270.
[10] GUO W J, SUN C A, LIU J Y. Influence of incidence channel condition on isospin fractionation ratio based on the revised isospin-dependent quantum molecular dynamics[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(2): 871–875.
[11] LIU J Y, XING Y Z, GUO W J. Properties and mechanism of isospin fractionation in intermediate energy heavy ion

- collisions[J]. Nuclear Physics Review, 2004, 21(2): 86–89.
- [12] YONG G C. Probing nuclear bubble configuration by the π^-/π^+ ratio in heavy-ion collisions[J]. The European Physical Journal A, 2016, 52(5): 118–122.
- [13] YANG Z X, FAN X H, YONG G C, et al. Effects of the initialization of nucleon momentum in heavy-ion collisions at medium energies[J]. Physical Review C, 2018, 98(1): 014623.
- [14] XING Y Z, LIU J Y, GUO W J, et al. Role of momentum dependent interaction on the isospin effects of fragmentations and dissipations at intermediate energy heavy ion collisions[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2002, 26(S1): 63–72.
- [15] XING Y Z, GUO W J, LIU J Y. Isospin fractionation in the heavy ion collisions process at intermediate energy[J]. Progress in Physics, 2004, 24(2): 127–137.
- [16] ZHAO Q, CHEN B, LIU J Y, et al. Probable observable of isospin dependent nucleon-nucleon cross section in intermediate energy heavy ion collisions[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2000, 24(5): 426–430.
- [17] GUO W J, HUANG J W, YONG G C, et al. Nucleon emission number as a probe of isospin-dependent N-N cross section in photonuclear reactions[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(10): 102501.
- [18] GUO W J, LI X J, HUANG J W, et al. Covariance analysis of an isospin-dependent probe[J]. Chinese Physics C, 2015, 39(12): 124101.
- [19] 王梦茹, 郭文军, 郝梓涵, 等. 原子核结合能的协方差分析[J]. 上海理工大学学报, 2018, 40(5): 506–510.
- [20] MALLIK S, CHAUDHURI G, GULMINELLI F. Dynamical and statistical bimodality in nuclear fragmentation[J]. Physical Review C, 2018, 97(2): 024606.
- [21] 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[J]. Physics Reports, 1991, 202(5/6): 233–360.
- [22] ZHANG F, ZUO W, YONG G C. Probing the high density behavior of the symmetry energy by using proton elliptic flow[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2007, 31(8): 741–744.
- [23] YONG G C. Blind spots of probing the high-density symmetry energy in heavy-ion collisions[J]. Physics Letters B, 2018, 786: 422–425.
- [24] FAN X H, YONG G C, ZUO W. Probing the density dependence of the symmetry energy by nucleon flow[J]. Physical Review C, 2018, 97(3): 034604.
- [25] ZHANG F, HU B T, YONG G C, et al. Effects of symmetry energy in the reaction $^{40}\text{Ca}+^{124}\text{Sn}$ at 140 MeV/nucleon[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(5): 052501.
- [26] ZHAO Q, GUO W J, LIU J Y, et al. Isospin dependence of preequilibrium nucleon emission in intermediate energy heavy ion collision[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, 25(3): 244–250.
- [27] GUO W J, GUO S H, SUN C A. Number of α emitted as a probe of the isospin dependent mean-field[J]. Nuclear Physics Review, 2010, 27(3): 263–266.
- [28] CHEN L W, ZHANG F S, ZENG X H, et al. Isospin effects on collective flow in hic at intermediate energies[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1998, 22(11): 1035–1041.
- [29] CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M. Isospin effects on balance energy in hic at intermediate energies[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1999, 23(5): 469–474.
- [30] LIM Y, KWAK K, HYUN C H, et al. Kaon condensation in neutron stars with Skyrme-Hartree-Fock models[J]. Physical Review C, 2014, 89(5): 055804.
- [31] REINHARD P G. The skyrme-hartree-fock model of the nuclear ground state[M]//LANGANKE K, MARUHN J A, KOONIN S E. Computational Nuclear Physics 1. Berlin, Heidelberg: Springer, 1991: 28–50.
- [32] LIU J Y, GUO W J, REN Z Z, et al. Isospin- and momentum-dependent interaction in isospin-dependent quantum molecular dynamics[J]. Chinese Physics, 2006, 15(8): 1738–1745.
- [33] LIU J Y, GUO W J, XING Y Z, et al. Isospin momentum-dependent interaction and its role on the isospin fractionation ratio in intermediate energy heavy ion collisions[J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(1): 65–68.

(编辑: 石 瑛)