

文章编号: 1007-4627(2017)03-0525-04

# 140 A MeV $^{58,64}\text{Ni}+^9\text{Be}$ 反应中同位旋标度规律的研究

乔春源<sup>1,†</sup>, 马春旺<sup>1,†</sup>, 牛菲<sup>1,2</sup>, 许景丽<sup>1</sup>, 丁甜甜<sup>1</sup>, 宋一丹<sup>1</sup>

(1. 河南师范大学物理与材料科学学院, 河南 新乡 453007;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

**摘要:** 利用反对称化的分子动力学 (AMD) 模型模拟 140 A MeV  $^{58,64}\text{Ni}+^9\text{Be}$  反应, 并利用同位旋标度法研究两相似反应系统的  $\Delta\mu_{n(p)}/T$  随时间演化趋势。分析比较不同碰撞参数和不同反应系统间的  $\Delta\mu_{n(p)}/T$  随时间演化结果, 结果表明碰撞参数对重核的对称能影响大, 系统不对称度越大对对称能的影响越大, 为间接研究激发核体系对称能系数的能量依赖提供了帮助。

**关键词:** 同位旋标度; 对称能; 密度; 反对称化分子动力学模型

**中图分类号:** O571.53      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.525

## 1 引言

中能区重离子核反应过程复杂, 产生了从亚饱和和密度到超饱和和密度区的核物质, 提供了研究各种不同温度、不同密度下核物质性质的机会, 尤其是核物质的对称能。核物质对称能在核物理和核天体物理中具有重要的研究意义, 是当前核物理研究的热点之一<sup>[1,2]</sup>。核物质对称能依赖于温度和密度, 在实验上无法直接观测, 需要利用敏感于对称能的观测量间接测量。目前基于各种观测量研究不同密度下的核物质对称能的研究取得了一定的进展, 但是如何准确约束还存在很大的挑战<sup>[3,4]</sup>。

基于余核的产额提出了许多探针, 例如: 同位旋标度 (Isoscaling)<sup>[5]</sup>、同量异位素产额比 (Isobaric yield ratio, IYR)<sup>[6]</sup>等探针, 其中同位旋标度法是研究亚饱和和密度区对称能的重要方法<sup>[7-10]</sup>。在实验上和理论上, 在统计学模型和动力学模型上对同位旋标度现象均已做了系统性的研究, 关于次级衰变对同位旋标度现象的影响也进行了大量的研究<sup>[6,11-22]</sup>。

基于巨正则系综理论, 质量数为  $A$  的余核  $(N, Z)$  产额为<sup>[24,25]</sup>

$$Y(N, Z) = C_0 A^{-\tau} \exp[\mu_n N + \mu_p Z - F(Z, N, T)]/T, \quad (1)$$

其中:  $C_0$  是归一化常数;  $A^{-\tau}$  与余核的熵有关;  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别是中子化学势和质子化学势;  $Z$  和  $N$  分别是余核的质子数和中子数;  $F(Z, N, T)$  是余核自由能;  $T$  是

温度。

假设  $C_0 A^{-\tau}$ 、 $F(Z, N, T)$  和  $T$  在两个反应系统中相等, 根据公式 (1), 具有不同中质比 ( $N/Z$ ) 的两个相似系统之间同一核素的产额比  $R_{21}$  (1 和 2 表示反应系统, 2 通常表示丰中子反应系统) 可表示为<sup>[6-8]</sup>

$$R_{21}(N, Z) = Y_2(N, Z)/Y_1(N, Z) = C \exp(\alpha N + \beta Z), \quad (2)$$

对公式 (2) 两边取对数得:

$$\begin{aligned} \ln[R_{21}(N, Z)] &= \ln[Y_2(N, Z)/Y_1(N, Z)] \\ &= C'(\alpha N + \beta Z), \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $Y_1(N, Z)$  和  $Y_2(N, Z)$  分别是余核  $(N, Z)$  在 1, 2 两反应系统中的产额 (2 通常指);  $C$  和  $C'$  都是归一化常数; 同位旋标度参数  $\alpha = \Delta\mu_{n21}/T = (\Delta\mu_{n2} - \Delta\mu_{n1})/T$  和  $\beta = \Delta\mu_{p21}/T = (\Delta\mu_{p2} - \Delta\mu_{p1})/T$  分别表示系统 2 和 1 的中子、质子化学势之差与温度的比值。在同位素产额比中, 消除  $\beta$ , 通过拟合公式 (3) 得到  $\alpha$  的结果。在同中子素产额比中, 消除  $\alpha$ , 通过拟合公式 (3) 得到  $\beta$  的结果。同位旋标度参数  $\alpha$  与对称能 ( $C_{\text{sym}}$ ) 有关联<sup>[10,15-17]</sup>。

本文通过计算反对称化的分子动力学 (Antisymmetrized Molecular Dynamica, AMD) 模型<sup>[23]</sup> 模拟的 140 A MeV  $^{58,64}\text{Ni}+^9\text{Be}$  反应不同反应时刻的  $\Delta\mu_{n(p)}/T$ , 比较不同碰撞区域和不同反应系统的  $\Delta\mu_{n(p)}/T$  随时间演化的结果。

收稿日期: 2016-12-06; 修改日期: 2017-05-02

基金项目: 河南省教育厅高校科技创新人才计划基金资助项目 (13HASTIT046)

作者简介: 乔春源(1989-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 从事重离子核物理研究, E-mail: qiaochunyuanyuan919@126.com

† 通信作者: 马春旺, E-mail: machunwang@126.com。

## 2 结果及分析

利用 AMD 模拟 Gogny-g0 相互作用下 140 A MeV  $^{58,64}\text{Ni}+^9\text{Be}$  反应, 提取并和半径  $R_c = 2.5$  fm, 碰撞时间  $t = 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 250, 300, 500, 700, 1000$  fm/c 的余核。为研究中心反应和周边反应对同位旋标度演化的影响, 选取碰撞参数为  $b_1 = 0 \sim 2$  fm 为中心反应和  $b_2 = 6 \sim 8$  fm 为周边反应。

根据公式 (3), 由  $^{64}\text{Ni}$  系统与  $^{58}\text{Ni}$  系统的同位素产额比拟合得到同位旋标度参数  $\alpha$ 。在图 1 中给出质子数  $Z = 1, 3, 17, 25$  同位素的同位旋标度参数  $\alpha$  随时间演化结果。中心反应中,  $Z = 1, 3$  的  $\alpha$  随时间演化趋势相似, 而  $Z = 17, 25$  的  $\alpha$  结果随时间有明显的震荡现象存在。周边反应中, 当  $t < 80$  fm/c 时,  $Z = 1, 3$  的  $\alpha$  结果趋势相似且  $\alpha$  值在  $0 \sim 0.4$  之间。

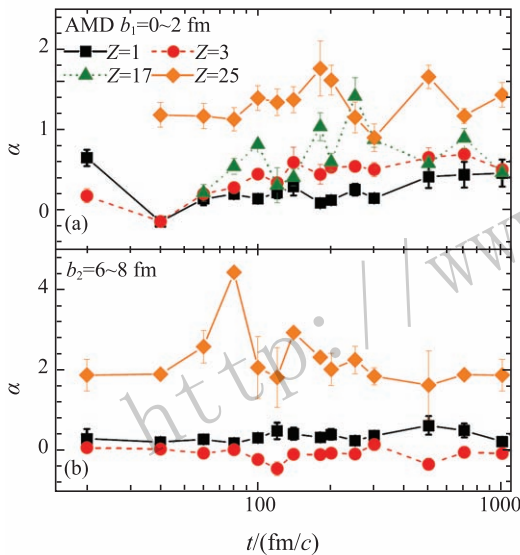


图 1 (在线彩图) 同位旋标度参数  $\alpha$  随时间演化结果 (a) 和 (b) 分别表示碰撞参数为  $b_1$  (中心反应) 和  $b_2$  (周边反应) 的结果。

中子数  $N = 2, 3, 4, 17, 21, 26, 30$  的同位旋标度参数  $\beta$  随时间演化结果在图 2 中标绘。中心反应中,  $\beta$  值大致在  $-0.3 \sim -0.8$  之间, 随着时间有明显的涨落现象。周边反应中, 当  $t > 40$  fm/c 时,  $N \leq 4$  的结果比较接近。

在图 3 中给出了中心反应和周边反应的  $\alpha$  和  $\beta$  比较结果, 发现中心反应和周边反应的同位旋标度参数之间存在差异。在 (a) 和 (b) 两幅图中可以看出, 对于轻粒子的  $\alpha(\beta)$  差异比较小, 反而对于重粒子的  $\alpha(\beta)$  差异比较大。结果表明, 同位旋标度参数受碰撞参数的影响。由于同位旋标度参数与对称能系数的关系, 反映出碰撞

参数影响对称能, 对重核的对称能影响较大。

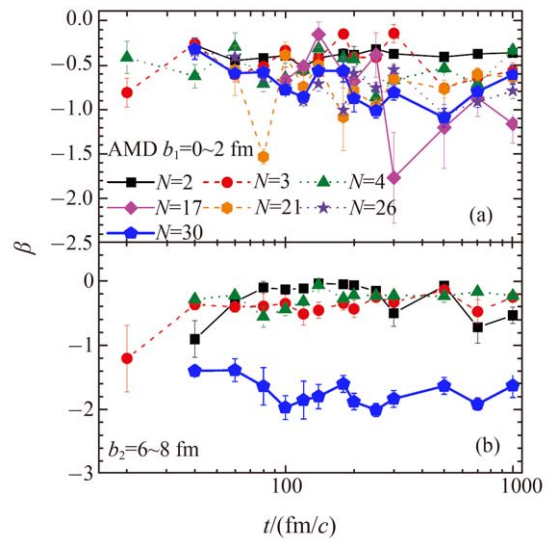


图 2 (在线彩图) 同位旋标度参数  $\beta$  随时间的演化结果 (a) 和 (b) 分别是碰撞参数为  $b_1$  (中心反应) 和  $b_2$  (周边反应) 的结果。

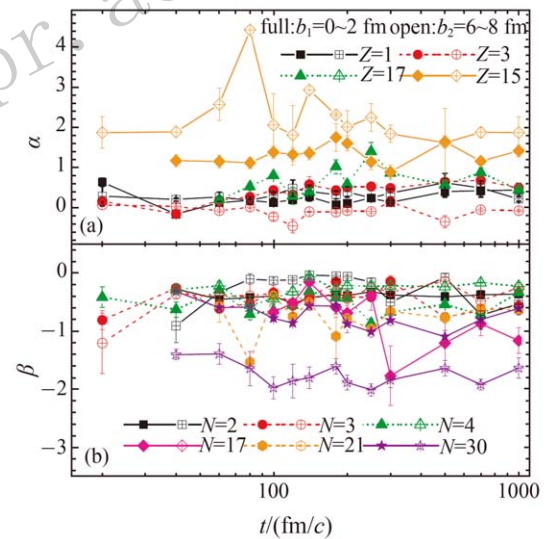


图 3 (在线彩图) 不同碰撞区域  $\alpha$  和  $\beta$  的比较结果 实心点和空心点分别表示中心反应和周边反应。

同时, 我们类比两个系统的产额比, 在同一个反应系统里利用周边反应与中心反应同位素的产额比, 对同一反应系统的同位旋标度也进行了分析比较。在图 4 给出了  $^{58}\text{Ni}$  和  $^{64}\text{Ni}$  反应系统  $Z = 1, 3, 25$  同位素的同位旋标度参数  $\alpha$  随时间演化结果。两个系统的  $\alpha$  趋势相似, 但在分布上有明显的差异。对于  $Z = 3, 25$ , 当  $t \geq 80$  fm/c 时,  $^{64}\text{Ni}$  系统之间的差异比较小, 而  $^{58}\text{Ni}$  反应系统的结果相反。结果表明, 同位旋标度参数也受系统的对称度影响。根据同位旋标度参数与对称能系数的关系, 也表明对称能受系统对称度的影响, 系统的不对称

度越大, 对称能受的影响越大。

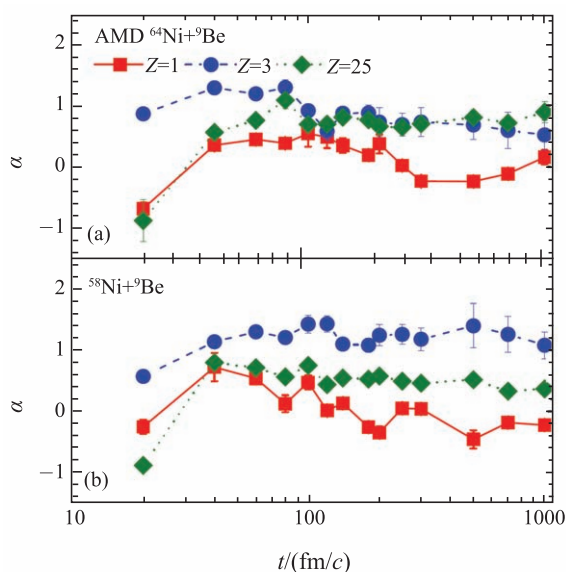


图4 (在线彩图) 不同反应系统的同位旋标度参数 $\alpha$ 随时间演化结果  
(a) 和 (b) 分别  $^{64}\text{Ni}$  和  $^{58}\text{Ni}$  的结果。

### 3 结论

利用AMD模拟Gogny-g0相互作用下的140 A MeV  $^{58,64}\text{Ni} + ^9\text{Be}$  反应, 提取反应时间从20 fm/c到1000 fm/c, 并和半径  $R_c = 2.5$  fm, 碰撞参数为  $b_1 = 0 \sim 2$  fm 和  $b_2 = 6 \sim 8$  fm 的余核。利用同位旋标度法计算不同反应时刻的同位旋标度参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 随时间演化。结果表明, 碰撞参数和系统的对称度影响核物质的密度。核对称能依赖核物质密度, 因此碰撞参数和反应系统的对称度也影响核对称能。

#### 参考文献:

- [1] MARINI P, BONASERA A, MCINTOSH A, *et al.* Phys Rev C, 2012, **85**: 034617.
- [2] MALLIK S, CHAUDHURI G. Phys Rev C, 2013, **87**: 011602.
- [3] LI B A, CHEN L W, KO C M, *et al.* Phys Rep, 2008, **464**: 113.

- [4] CHEN L W. Nuclear Physics Review, 2014, **31**(3): 273. doi: 10.11804/NuclPhysRev.31.03.273. (in Chinese)  
(陈列文. 原子核物理评论, 2014, **31**(3): 273.)
- [5] XU H S, TSANG M B, LIU T X, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, **85**(4): 716.
- [6] HUANG M, CHEN Z, KOWALSKI I, *et al.* Phys Rev C, 2010, **81**: 044620.
- [7] MA Y G, WANG K, CAI X Z, *et al.* Phys Rev C, 2005, **72**: 064603.
- [8] MA Y G, WANG K, WEI Y B, *et al.* Phys Rev C, 2004, **69**: 064610.
- [9] BOTVINA A S, LOZHKIN O V, TRAUTMANN W. Phys Rev C, 2002, **65**: 044610.
- [10] COLOMMA M. Phys Rev Lett, 2013, **110**: 042701.
- [11] MA C W, WANG S S, ZHANG Y L, *et al.* Phys Rev C, 2013, **87**: 034618.
- [12] HUANG M, CHEN Z, KOWALSKI S, *et al.* Nuclear Physics A, 2011, **847**: 233.
- [13] TSANG M B, FRIEDMAN W A, CELBKE C K, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**: 5023.
- [14] SOULIOTIS G A, SHETTY D V, KEKSIS A, *et al.* Phys Rev C, 2006, **73**: 024606.
- [15] ONO A, DANIELEWICZ P, FRIEDMAN W A, *et al.* Phys Rev C, 2003, **68**: 051601(R).
- [16] CHEN Z, KOWALSKI S, HUANG M, *et al.* Phys Rev C, 2010, **81**: 064613.
- [17] SOUZA S R, TSANG M B, CARLSON B V, *et al.* Phys Rev C, 2009, **80**: 044606.
- [18] FU Yao, FANG Deqing, MA Yugang, *et al.* Chin Phys Lett, 2009, **26**(8): 082503. (in Chinese)  
(付瑶, 方德清, 马余刚, 等. 中国物理快报, 2009, **26**(8): 082503.)
- [19] ZHOU P, TIAN W D, MA Y G, *et al.* Phys Rev C, 2011, **84**: 037605.
- [20] TSANG M B, GELBKE C K, LIU X D, *et al.* Phys Rev C, 2001, **64**: 054615.
- [21] COLONNA M, TSANG M B. The European Physical Journal A, 2006, **30**(1): 165.
- [22] LIU T X, VAN GOETHEM M J, LIU X D, *et al.* Phys Rev C, 2004, **69**: 014603.
- [23] AKIRA O. Phys Rev C, 1996, **53**: 2958.
- [24] DAS C B, DAS S, LIU X D, *et al.* Phys Rev C, 2001, **64**: 044608.
- [25] TSANG M B, LYNCH W G, FRIEDMAN W A, *et al.* Phys Rev C, 2007, **76**: 041302(R).

# Study of the Nuclear Matter Symmetry Energy in the Simulated 140 AMeV $^{58,64}\text{Ni}+^9\text{Be}$ Reactions by Isoscaling Method

QIAO Chunyuan<sup>1,1)</sup>, MA Chunwang<sup>1,†</sup>, NIU Fei<sup>1,2</sup>, XU Jingli<sup>1</sup>, DING Tiantian<sup>1</sup>, SONG Yidan<sup>1</sup>

(1. College of Physics and Materials Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, Henan, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;)

**Abstract:** We have simulated the reactions 140 AMeV  $^{58,64}\text{Ni}+^9\text{Be}$  by antisymmetric molecular dynamics model (AMD) and studied the evolution of  $\Delta\mu_{n(p)}/T$  with collision time from 20 fm/c to 1000 fm/c. To study nuclear symmetry energy influencing factors, a comparative analysis has been proceed among theses results with different impact parameters and the difference reactions system. The results show that the impact parameters have a great influence on the symmetry energy of the heavy nucleus, and the greater the asymmetry degree of the system, the greater the influence on the symmetry energy. These results are helpful for the indirect study of the energy dependence of the symmetry energy coefficient of the excited nuclear system.

**Key words:** Isoscaling; symmetry energy; density; antisymmetric molecular dynamics model

<http://www.npr.ac.cn>

**Received date:** 6 Dec. 2016; **Revised date:** 2 May 2017

**Foundation item:** Science and Technology Innovation Talents Program in Universities of Henan Province(13HASTIT046)

† **Corresponding author:** MA Chunwang, E-mail: [machunwang@126.com](mailto:machunwang@126.com).