

# 同位素分布的标度参量对于两体碰撞的同位旋 相关性和动量相关作用的依赖\*

郝焕锋<sup>1,4;1)</sup> 邢永忠<sup>2,3</sup> 刘建业<sup>1,2</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

3 (天水师范学院基础物理学研究所 甘肃天水 741000)

4 (中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 利用同位旋相关的量子分子动力学模型,对中能重离子反应产物中的同位素分布进行了研究,重点分析了平均场中的动量相关作用和两体碰撞的同位旋相关性对于产物中同位素标度现象的影响.结果表明:这两个因素均明显减小了同位素标度参量 $\alpha$ 的值,从而减弱了同位旋标度参量 $\alpha$ 对两个反应系统同位旋差的依赖性.

**关键词** 同位素分布 同位旋相关性碰撞截面 动量相关作用

## 1 引言

中能重离子碰撞中的同位旋效应是当前核物理中的热门研究课题.为了能够获得同位旋非对称核物质状态方程的知识和提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的有关信息,人们已经在实验和理论两个方面做了大量的研究并取得了可喜进展<sup>[1-3]</sup>.2000年,徐珊珊等人<sup>[4]</sup>在研究 $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 及其同位素的碰撞时发现,反应产物中的同位素分布具有明显的规律性:在完全相同的入射道条件下,对质子数相同而仅有中子数不同的两个碰撞系统,同一核素的产额之比满足如下指数关系:

$$R_{21} \equiv \frac{Y_2(N, Z)}{Y_1(N, Z)} = C \exp\{\alpha N + \beta Z\}, \quad (1)$$

其中,  $Y_2(Z, N)$  与  $Y_1(Z, N)$  分别表示第二个和第一个碰撞系统中具有  $Z$  个质子和  $N$  个中子的核素的产额(按照惯例取系统二的中质比大于碰撞系统一的中质比),  $C$  是归一化常数,这一现象被称为同位素标度(isoscaling),这里  $\alpha$  和  $\beta$  为标度参量,对于给定的两个碰撞系统中,  $\alpha$  和  $\beta$  为常数.之后,人们通过对其他碰

撞系统的研究,发现同位素标度是重离子碰撞中的一个普遍现象<sup>[5]</sup>.于是,人们以此为线索,通过实验和理论两方面的共同研究,获得了有关同位旋非对称核物质状态方程的新知识<sup>[6-8]</sup>.马余刚及其研究组<sup>[9]</sup>对同位素标度现象进行了深入地理论研究,不仅对于中能重离子碰撞中的标度参量与反应入射道条件的关系进行了细致研究,而且揭示出标度参量的大小直接反映着碰撞过程中的对称势的有关信息.同时,也利用不同的理论模型和方法,对原子核多重碎裂和裂变过程中的同位素标度进行了深入研究并得出重要结果.事实上,直到徐珊珊等从实验中发现同位素标度现象,人们在认识到这一规律的重要性的同时,才意识到同位素标度是重离子核反应统计模型的一个必然结果<sup>[10]</sup>.

从巨正则系综理论可以自然地给出(1)式所表示的同位素分布的指数规律性. A. Ono<sup>[8]</sup> 和 W. D. Tian<sup>[9]</sup> 等人的理论研究表明:描述中能重离子碰撞的动力学模型同样可以给出同位素标度规律,并且分别用反对称量子分子动力学模型(AMD)和同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)研究标度参量 $\alpha$ 和 $\beta$ 对于反应过程中的对称势的敏感性,通过理论与实验值的比

2006-10-16 收稿

\* 国家自然科学基金(10447006, 10575075)和甘肃省教育厅共同资助

1) E-mail: haohuanfeng@sina.com

较, 确定出对称势的部分性质. 那么, 同位素标度这一实验发现能否告诉我们除对称势之外的其他反应动力学信息呢? 我们知道, 核子-核子碰撞截面是重离子碰撞中的一个重要因素, 平均场中的动量相关作用同样对核反应动力学起着重要的作用. 这两个因素对于标度参量 $\alpha$ (或 $\beta$ )具有怎样的影响呢? 本文将利用IQMD, 通过对 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 及其同位素( $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{60}\text{Ca}$ )的碰撞系统在能量区40—60MeV/u的计算, 来研究中能重离子反应中两体碰撞的同位旋相关性和平均场中的动量相关作用对于标度参量的影响, 以其获得相关信息.

## 2 同位旋相关的量子分子动量学模型

IQMD是在描述中能重离子碰撞的量子分子动力学(QMD)模型的基础上, 同时考虑平均场的同位旋相关性和介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性改进而成. 在该模型中描述重离子碰撞过程中的相互作用势为:

$$U(\rho) = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{Pauli}} + U^{\text{MDI}} + U^{\text{sym}}, \quad (2)$$

其中,  $U^{\text{Sky}}$  是Skyrme势,  $U^{\text{Yuk}}$  表示Yukawa势,  $U^{\text{MDI}}$  表示动量相关作用,  $U^{\text{Pauli}}$  表示Pauli势,  $U^{\text{Coul}}$  为Coulomb势,  $U^{\text{sym}}$  表示对称势, 对于IQMD模型的详细描述请参见文献[11], 这里列出与本文计算有关的几种势的表达式:

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (p_1 - p_2)^2 + 1] \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (3)$$

对称势的形式有多种, 在这里选取了如下形式的对称势:

$$U^{\text{sym}} = e_a \mu \delta \tau_z, \quad (4)$$

$\tau_z = \begin{cases} 1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases}$ , 其中  $e_a = 32\text{MeV}$  是对称势强度,

$\mu \equiv \rho / \rho_0$ ,  $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p}$  为同位旋非对称性, 其中  $\rho$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别表示总的密度、基态密度、中子和质子密度.

在IQMD模型中, 介质中核子-核子碰撞截面是用如下的经验公式来描述:

$$\sigma_{\text{NN}}^{\text{iso}} = \left(1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0}\right) \sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}, \quad (5)$$

其中参数取  $\alpha \approx -0.2$ ,  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$  为实验核子-核子碰撞截面<sup>[12]</sup>. 本文中用记号  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{iso}}$  表示考虑同位旋相关性的核子-核子碰撞截面, 而用  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{noiso}}$  表示不考虑同位旋相关

性的核子-核子碰撞截面, 即取  $\sigma_{\text{np}} = \sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$ , 其中  $\sigma_{\text{np}}$ ,  $\sigma_{\text{nn}}$  和  $\sigma_{\text{pp}}$  分别表示介质中中子-质子、中子-中子、质子-质子之间的碰撞截面, 可通过公式(5)进行计算.

## 3 结果与讨论

图1是在动量相关作用和同位旋相关碰撞截面的条件下, 由碰撞系统 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 和 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 所求出的同位素标度图. 计算时所选的入射能量  $E=50\text{MeV/u}$ , 碰撞参数  $b=0.0\text{fm}$ . 图中纵坐标表示两个碰撞系统中相同同位素的产额比. 图1(a)中同一条线上的各点表示同一元素的各个同位素在两个系统中的产额比, 图1(b)中同一条线上的各点表示具有相同中子数的不同元素在两个系统中的产额比, 由此确定出的标度参量 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别标在图1(a)和(b)中. 图1的意义不仅在于证实碰撞系统 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 和 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 在上述条件下的产物分布符合同位素标度规律, 而且说明量子分子动力学模型能够成功地用于研究重离子碰撞中多重碎裂产物的同位素分布, 同时, 本文所有其他计算都基于此计算的基础之上.

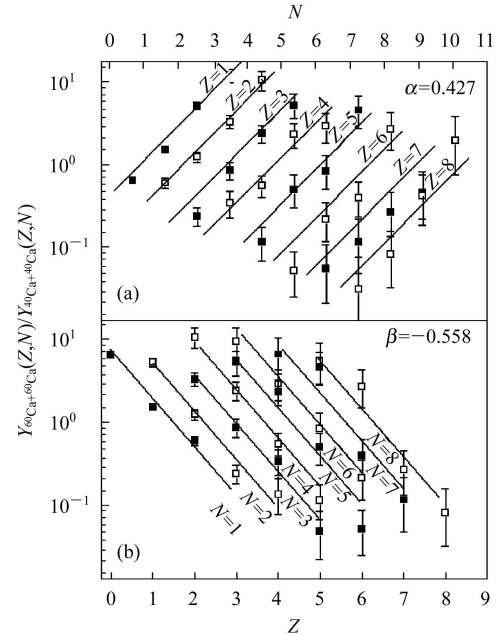


图1 由碰撞系统 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ 和 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 所得到的同位素分布  
图中误差棒为统计误差.

为了研究同位素标度所揭示的除对称势之外的其他描述反应动力学状态参数的信息, 我们将研究动量相关作用和核子-核子碰撞截面的同位旋相关性对同位素标度参量 $\alpha$ 的影响. 为此, 我们在不同情形下, 对上述反应系统在  $E=40\text{MeV/u}$  到  $60\text{MeV/u}$  的入射能

量区间内的同位素标度参量 $\alpha$ 做了计算, 结果在图2中给出. 其中曲线a表示在动量相关作用和同位旋相关截面的条件下标度参量 $\alpha$ 随能量的变化, 曲线b表示在动量相关作用和同位旋无关截面的条件下标度参量 $\alpha$ 随能量的变化, 曲线c表示在动量无关作用和同位旋相关截面的条件下标度参量 $\alpha$ 随能量的变化, 曲线d表示在动量无关作用和同位旋无关截面的条件下标度参量 $\alpha$ 随能量的变化. 由图2可以得出下面几条结论:

(1) 在所考察的能区内, 不论是上述哪种情形, 同位素标度参量 $\alpha$ 的值总是随入射能量 $E_{lab}$ 的增加而减小, 表明两碰撞系统同位素产额比随 $E_{lab}$ 的增加而减小, 这就意味着随 $E_{lab}$ 的增加同位素产额比对两系统同位旋差的依赖性减弱, 这一结论和文献[9]的结果一致.

(2) 图中曲线a低于曲线c, 曲线b低于曲线d, 说明无论我们采用何种碰撞截面, 平均场中的动量相关作用总使标度参量 $\alpha$ 的值减小. 由蒸发模型可以解析得到<sup>[10]</sup>:

$$\alpha = \frac{4C_{sym}}{T} [(Z_1/A_1)^2 - (Z_2/A_2)^2], \quad (6)$$

其中,  $C_{sym}$ 可以认为是系统的对称势,  $T$ 为系统的温度,  $Z_i$ 和 $A_i$  ( $i=1,2$ )分别为与两个系统所对应的平衡发射源的质子数与质量数. 虽然在反应动力学模型中很难确定平衡发射源, 但对于所有的碎片, 我们可以用(6)式计算. 正如文献[8,9]已经分别利用反对称的量子分子动力学模型和量子分子动力学的计算证实了(6)式的正确性, 同时我们的计算也显示无论在上述4种条件中的任何一种条件下(6)式都能被正确再现, 如图3给出了在动量相关作用和同位旋相关截面的条件下(实心方块), 以及在动量无关作用和同位旋相关截面(空心方块)的条件下标度参量 $\alpha$ 与 $(Z/A)^2$ 之间的关系(其中从左向右分别为 $^{60}\text{Ca}+^{60}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$ ,  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 系统). 正如我们以前的研究结果<sup>[13]</sup>表明与动量无关作用相比, 动量相关作用明显地增加了两体碰撞过程中动量耗散和由相对动量到热能的转换, 从而动量相关作用增加了碰撞系统的温度, 同时从图3可以看出虽然动量相关作用使不同碰撞系统的 $(Z/A)^2$ 均减, 但减小的幅度大体相等(实线和虚线平行), 这表明动量相关作用对 $(Z_1/A_1)^2 - (Z_2/A_2)^2$ 的影响不大, 我们以前的研究也表明了这一点<sup>[14]</sup>, 从而与动量无关作用相比, 动量相关作用增加了碰撞系统的温度, 减小了 $\alpha$ 的值, 这就意味着动量相关作用减弱了两个碰撞系统中同位素产额比对两个碰撞系统同位旋

差的依赖性.

(3) 图中曲线a低于曲线b, 曲线c低于曲线d, 说明无论我们是否在平均场中计及动量相关作用, 介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性总使标度参量 $\alpha$ 的值减小. 据我们所知 $\sigma_{np}$ 与 $\sigma_{pp}$ (这里 $\sigma_{pp}=\sigma_{nn}$ )的相对大小是随核子能量的增加而变化<sup>[12]</sup>, 特别是在 $E_{lab} \leq 200\text{MeV}$ 能区,  $\sigma_{np}$ 明显大于 $\sigma_{pp}$ , 而根据我们所定义的同位旋无关核子-核子碰撞截面 $\sigma_{NN}^{noiso}$ 为 $\sigma_{np} = \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$ , 在所考察能区, 显然同位旋相关核子-核子碰撞总截面 $\sigma_{np} + \sigma_{pp} + \sigma_{nn}$ 远大于同位旋无关核子-核子碰撞截面 $\sigma_{np} + \sigma_{pp} + \sigma_{nn}$ , 因为 $\sigma_{np} > \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$ . 由于同位旋相关核子-核子碰撞截面大, 两体碰撞激烈, 从而与同位旋无关截面相比, 同位旋相关截面使更多的相对运动动能耗散和转换为热能, 增加了碰撞系统的温度. 然而如我们以前的研究结果表明, 核子-核子碰撞截面的同位旋相关性对同位旋分馏影响很小<sup>[14]</sup>, 即对 $(Z_1/A_1)^2 - (Z_2/A_2)^2$ 影响不大, 因此, 与同位旋无关截面相比同位旋相关截面增加了温度, 从而减小了标度参量 $\alpha$ 的值, 这就意味着两个碰撞系统的同位素产额比对两个碰撞系统同位旋差的依赖性减弱.

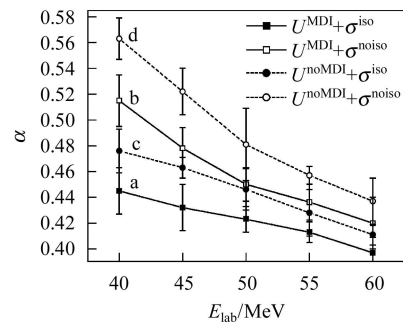


图2 4种不同条件下, 同位素分布的标度参量 $\alpha$ 随入射能量的变化

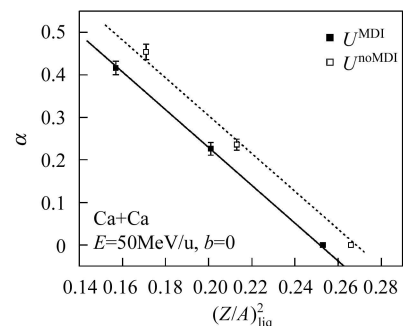


图3  $\alpha$ 与 $(Z/A)^2$ 之间的关系

总之本文计算结果说明: 介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性和平均场中的动量相关作用均对

同位素标度参量具明显的影响, 因而通过系统的理论计算与实验数据的比较, 可以提取重离子碰撞中的动

量相关作用和介质中同位旋相关性的核子-核子碰撞截面的知识.

### 参考文献(References)

- 1 LI B A. Phys. Rev. Lett., 2000, **58**(20): 4221; LI B A, Schroder W Udo. Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies. New York: Nova Sciences Publishers, 2001
- 2 Colonna M, DiToro M et al. Phys. Rev., 1998, **C57**: 1410—1415; Toro M Di et al. Nucl. Phys., 2001, **A681**: 426C
- 3 LIU J Y, GUO W J, WANG S J et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 975
- 4 XU H S, Tsang M B, LIU T X et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 716
- 5 Souliotis G A et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 24605; Veselsky M, Souliotis G A, Jandel M. Phys. Rev., 2004, **69**: 44607
- 6 Gupta S Das, Mekjian A Z, Tsang M B. Adv. Nucl. Phys., 2001, **26**: 91
- 7 Tsang M B, Gelbke C K, LIU X D et al. Phys. Rev., 2002, **C64**: 054615
- 8 Danielewicz A Ono, Danielewicz P, Friedman W A. Phys. Rev., 2003, **C68**: 051601; LI B A, CHEN L W. arXiv., nucl-th:0605002
- 9 MA Y G, WANG K, CAI X Z et al. Phys. Rev., 2005, **C72**: 064603; ZHONG C, MA Y G, FANG D Q. Chin. Phys. Lett., 2006, **15**: 1481; TIAN W D, MA Y G et al. Chin. Phys. Lett., 2005, **22**: 306
- 10 Tsang M B, Friedman W A, Gelbke C K et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 5023—5026
- 11 LIU J Y, XING Y Z, GUO W J et al. Chin. Phys. Lett., 2002, **19**: 1078; LIU J Y, GUO W J, XING Y Z et al. Phys. Lett., 2002, **B540**: 213; LIU J Y, ZHAO Q, WANG S J et al. Nucl. Phys., 2001, **A687**: 475; LIU J Y, GUO W J, XING Y Z et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 024608; XING Y Z, LIU J Y, GUO W J. Nucl. Phys., 2003, **A723**: 483
- 12 Alkazzov G et al. Nucl. Phys., 1977, **A280**: 365
- 13 LIU J Y, GUO W J, XING Y Z et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 024608
- 14 XING Y Z et al. Acta Phys. Sin., 2004, **53**: 1000 (in Chinese) (邢永忠等. 物理学报, 2004, **53**: 1000)

## Influence of Isospin Dependence of Nucleon-Nucleon Cross Section and Momentum Dependent Interaction on the Isoscaling in Intermediate Energy Collisions<sup>\*</sup>

HAO Huan-Feng<sup>1,4,1)</sup> XING Yong-Zhong<sup>2,3</sup> LIU Jian-Ye<sup>1,2</sup>

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

2 (The Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

3 (Institute of Fundamental Physics, Tianshui Normal College, Gansu Tianshui 741000, China)

4 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The influences of the isospin dependent in-medium nucleon-nucleon cross section and the Momentum-Dependent Interaction(MDI) on the isotope scaling have been investigated within the Isospin dependent Quantum Molecular Dynamics Model(IQMD). The results show that both the isospin dependent in-medium nucleon-nucleon cross section and the momentum interaction reduce the isoscaling parameter  $\alpha$  appreciably, which means they decrease the dependence of yield ratios of two systems on the isospin difference between two systems.

**Key words** isotope distribution, isospin dependent cross section, momentum dependent interaction

Received 16 October 2006

<sup>\*</sup> Supported by National Natural Science Foundation of China (10447006, 10575075) and Educational Commission of Gansu Province of China

1) E-mail: haohuanfeng@sina.com