

# 中能重离子同位旋分馏对系统质量和能量的依赖性<sup>\*</sup>

郭文军<sup>1 2)</sup> 刘建业<sup>1 2 3)</sup> 邢永忠<sup>1 3)</sup>

<sup>1)</sup> (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 兰州 730000)

<sup>2)</sup> (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

<sup>3)</sup> (天水师范学院近代物理理论研究所, 天水 741000)

(2003 年 12 月 2 日收到, 2004 年 2 月 24 日收到修改稿)

利用同位旋相关的量子分子动力学理论, 研究了中能重离子碰撞中同位旋分馏强度  $(N/Z)_n$  ( $(N/Z)_{frag}$ ) 对于碰撞系统质量和能量的依赖关系. 这里  $(N/Z)_n$  和  $(N/Z)_{frag}$  分别是核子发射 (气相) 和碎片发射多重性 (液相) 的中子-质子比. 研究结果表明同位旋分馏强度是反应系统质量和能量的灵敏函数. 当系统同位旋 (中子-质子比) 入射能量和碰撞参数都固定时, 同位旋分馏强度随系统质量的增加而减少. 因为随系统质量的增加与较轻系统比较, 重系统具有大的压缩能, 小的热能和大的液-气相变的临界温度. 故核子输运过程和同位旋分馏过程减弱. 但在确定系统质量条件下, 同位旋分馏强度随系统同位旋的增加而增加. 即丰中子系统同位旋分馏比缺中子系统强得多. 故中能重离子碰撞系统丰中子系统的同位旋分馏强度是提取同位旋相关平均场的好的物理观测量.

关键词: 同位旋分馏, 对称势

PACC: 2570, 0270, 2410

## 1. 引言

原子核放射性束的产生和应用为研究原子核反应动力学中的各种同位旋效应提供了良好的机遇和条件<sup>[1-2]</sup>. 而中能重离子同位旋效应的研究能够用于得到介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面和同位旋相关平均场 (对称势) 的知识, 这些知识对于研究和了解原子核性质很重要, 同时对研究天体演化过程, 特别是中子星冷却速率很重要. 为了得到这些知识, 中能重离子碰撞中若干感兴趣的同位旋效应从实验上和理论上<sup>[1-19]</sup>进行了研究. 例如 Bao Coloma 和 Baran 等, 在近年来研究了同位旋分馏<sup>[15, 16, 20, 21]</sup>. 同位旋分馏是指在低密度和高密度两个区域内不稳定同位旋非对称核物质中子-质子比的不等分配. Li 提出了关于同位旋分馏的观点<sup>[14]</sup>. Baran 等人对同位旋分馏动力学进行了详细研究<sup>[21]</sup>. 这种现象在实验上也被 Xu 等人证实<sup>[9]</sup>.

然而介质中同位旋相关截面和对称势至今还未能够很好的确定. 还需要从理论上为实验研究提供能

够更好显示同位旋效应的物理观测量, 并通过理论与实验研究的紧密结合来提取重离子碰撞中介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面和对称势的知识. 为了与实验研究的比较, 挑选合适的反应系统和入射能量这是一个很重要的问题. 同位旋分馏过程对于碰撞系统质量和能量在特定条件下的依赖关系就成为一个有重要意义的研究课题. 基于同位旋相关量子分子动力学 (IQMD)<sup>[2, 17, 22-24]</sup>, 本文对以上问题进行了研究, 并得到了一些有意义的结果.

## 2. 同位旋相关量子分子动力学模型

已知量子分子动力学 (QMD)<sup>[23, 24]</sup> 主要包括两个动力学要素: 密度相关的平均场和介质中核子-核子碰撞截面. 为了恰当的描述重离子碰撞动力学过程中的同位旋效应, QMD 应当进行必要而合理的修改. 密度相关的平均场应当包括正确的同位旋相关项, 即对称势和库仑势. 而介质中核子-核子碰撞截面应当区分中子-质子, 中子-中子和质子-质子的碰撞过程. 在此过程中由于区分中子和质子而造成的

<sup>\*</sup> 国家重大基础研究发展项目 (批准号: G2000077400), 中国科学院百人计划, 国家自然科学基金 (批准号: 10175080, 10175082, 10004012, 19847002) 和中国科学院知识创新工程重点方向项目 (批准号: KJCX2-SW-N02) 资助的课题.

泡里阻塞效应应当被考虑.对以上动力学要素进行改进后.就会得到 IQMD.在 IQMD 中碰撞核的初态密度分布是利用具有参数 SKM\* (见文献[25]的 Skyrme-Hatree-Fock 的计算).而没有两体碰撞项的 IQMD 被用于得到碰撞核的基态性质.例如,碰撞核的结合能和均方半径与实验结果一致,IQMD 中相互作用势的参数在初始化中被确定下来,并作为 IQMD 碰撞动力学计算的初始数据.我们计算中的相互作用势如下:

$$U(\rho) = U^{\text{Sky}} + U^c + U^{\text{Sym}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{MDI}} + U^{\text{Pauli}}, \quad (1)$$

这里  $U^{\text{Sky}}$ ,  $U^c$ ,  $U^{\text{Sym}}$ ,  $U^{\text{Yuk}}$ ,  $U^{\text{MDI}}$ ,  $U^{\text{Pauli}}$  分别是 Skyrme 势,库仑势,Yukawa 势,动量相关作用和 Pauli 势.关于 IQMD 计算中的详细情况请参阅文献[2,17,22—24].本文选用了两种形式的对称势<sup>[1,45]</sup>

$$U_1^{\text{sym}} = \pm c\delta F_1(u), \quad (2)$$

$$U_2^{\text{sym}} = \left( \pm c\delta - \frac{1}{4}c\delta^2 \right) F_2(u), \quad (3)$$

这里  $c$  是对称势的强度.据已有的经验取 32MeV,其中  $F_1(u) = u$ ,  $F_2(u) = u^{1/2}$ ,  $u = \rho/\rho_0$ .  $\delta$  是相对中子过剩  $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$ .  $\rho$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别是总的,基态的,中子的和质子的密度.而  $U_1^{\text{sym}}$  和  $U_2^{\text{sym}}$  的不可压缩系数分别是 -27MeV 和 -69MeV,

$$K_{\text{sym}} \equiv 9\rho_0^2 \frac{\partial^2 \mathcal{S}(\rho)}{\partial \rho^2}, \quad (4)$$

其中

$$\mathcal{S}(\rho) = (2^{2/3} - 1) \frac{3}{5} E_F^0 u^{2/3} + [ \mathcal{S}(\rho_0) - (2^{2/3} - 1) \frac{3}{5} E_F^0 ] F(u),$$

费米能  $E_F^0 = 38\text{MeV}$ ,  $\mathcal{S}(\rho) = 32.77\text{MeV}$ .

介质中经验的核子-核子碰撞截面表示式取为

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

从已有经验知识得到介质中的核子-核子碰撞截面小于自由核子-核子碰撞截面.从符合实验上的集体流得知  $\alpha \approx -0.2$ .这里  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$  是实验的核子-核子碰撞截面<sup>[26]</sup>.而实验的自由中子-质子碰撞截面在 400MeV/核子以下约为中子-中子碰撞截面或质子-质子碰撞截面的 2—3 倍.这里需要说明,介质中的  $\sigma_{\text{np}}/\sigma_{\text{pp}}$  是原子核密度分布和入射能量的灵敏函数.在本文研究能区内,中子-质子碰撞截面总是大于中子-中子和质子-质子碰撞截面(实验的中子-中子碰

撞截面与质子-质子碰撞截面相等).

### 3. 结果和讨论

本文定义关于物理观测量两体碰撞同位旋效应为从同位旋有关两体碰撞截面  $\sigma^{\text{iso}}$  和同位旋无关截面  $\sigma^{\text{noiso}}$  所算同一物理观测量之差.这里  $\sigma^{\text{iso}}$  定义为  $\sigma_{\text{np}} \geq \sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$  和  $\sigma^{\text{noiso}}$  为  $\sigma_{\text{np}} = \sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$ .  $\sigma_{\text{np}}$ ,  $\sigma_{\text{nn}}$  和  $\sigma_{\text{pp}}$  分别是介质中中子-质子,中子-中子和质子-质子碰撞截面.我们计算中取碎片发射多重性为包括所有电荷数在  $Z$  和  $(Z_p + Z_t)/2$  之间的碎片.这里  $Z_p$  和  $Z_t$  分别是弹核和靶核的电荷数.

#### 3.1. 同位旋分馏强度对于碰撞系统质量的关系

由于重离子碰撞动力学过程中的同位旋分馏强度  $(N/Z)_n$ ,  $(N/Z)_{\text{frag}}$  同时依赖于系统的入射道条件及其交织.故必须分别固定系统的入射能量,碰撞参数和同位旋而研究  $(N/Z)_n$ ,  $(N/Z)_{\text{frag}}$  对系统质量的依赖关系.要么固定系统的质量,碰撞参数和同位旋而研究  $(N/Z)_n$ ,  $(N/Z)_{\text{frag}}$  对碰撞系统入射能量的灵敏程度.这样以来分别突出  $(N/Z)_n$ ,  $(N/Z)_{\text{frag}}$  对系统质量的关系或者它对于系统入射能量的依赖关系.

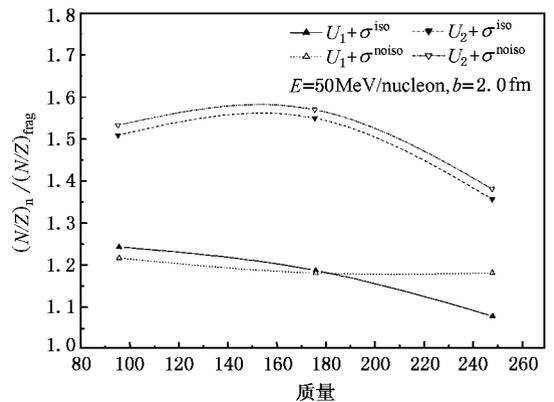


图1 同位旋分馏强度  $(N/Z)_n$ ,  $(N/Z)_{\text{frag}}$  随系统质量的演化

图1表示出  $(N/Z)_n$ ,  $(N/Z)_{\text{frag}}$  对于碰撞系统质量的依赖关系.其计算结果分别来自不同的对称势  $U_1^{\text{sym}}$  和  $U_2^{\text{sym}}$  和不同的两体碰撞截面  $\sigma^{\text{iso}}$  和  $\sigma^{\text{noiso}}$ .故总共有四种情况.即  $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ ,  $U_2^{\text{sym}} + \sigma^{\text{iso}}$ ,  $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}}$ ,  $U_2^{\text{sym}} + \sigma^{\text{noiso}}$ .碰撞参数  $b = 2.0\text{fm}$  和入射束流能量  $E = 50\text{MeV/核子}$ .碰撞系统包括  $^{48}\text{Ca} + ^{48}\text{Ca}$ ,  $^{88}\text{Kr} + ^{88}\text{Kr}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ .三个碰撞系统的中子-质子比分别是 1.4, 1.44 和 1.48.也就是说三种碰撞系统的

中子-质子比(同位旋)近乎相同.图1中四种情况都有相应的曲线标明.可以清楚的看到来自不同对称势,但具有相同的核子-核子碰撞截面 $\sigma^{iso}$ 或者 $\sigma^{noiso}$ 的 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 值之间的间隙是大的.然而来自不同的核子-核子碰撞截面 $\sigma^{iso}$ 和 $\sigma^{noiso}$ ,但具有相同的对称势 $U_1^{sym}$ 或者 $U_2^{sym}$ ,其 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 值之差是小的.以上行为就表明对于丰中子系统而言,同位旋分馏强度灵敏的依赖于对称势而对于两体碰撞的同位旋效应是不灵敏的.特别是 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 值随着碰撞系统质量的增加而减小.这是由于相对于轻碰撞系统比较而言,在碰撞系统同位旋和入射能量相同情况下,重的碰撞系统具有比较大的压缩能和小的热能,因而减弱了核子输运过程和同位旋分馏.这种性质正好与液-气相变动力学过程中相同条件下的行为相似,即为文献[27-28]中所述.液-气相中的临界温度随系统质量的增加而增加,也就是说,重碰撞系统的液-气相变临界温度比较轻系统的液-气相变临界温度大,而临界温度越大意味着发生液-气相变过程越难,而重离子碰撞过程中的同位旋分馏正好发生在液-气相变过程中,故随着碰撞系统的加重同位旋分馏过程在相同碰撞参数和相同入射能量以及相同中子-质子比条件下与轻系统比较会变弱.

### 3.2. 重离子碰撞中同位旋分馏对于束流能量的依赖性

一般情况下原子核反应中的物理观测量对于碰撞参数是很灵敏的,特别是多数实验物理观测量是来自不同碰撞参数的贡献,为了考虑这些不同碰撞参数对物理观测量的贡献,定义对碰撞参数平均值为

$$\varphi_b = 2\pi \int_0^{b_{max}} \varphi(b) db / 2\pi \int_0^{b_{max}} db, \quad (6)$$

其中 $b_{max}$ 是最大的碰撞参数.

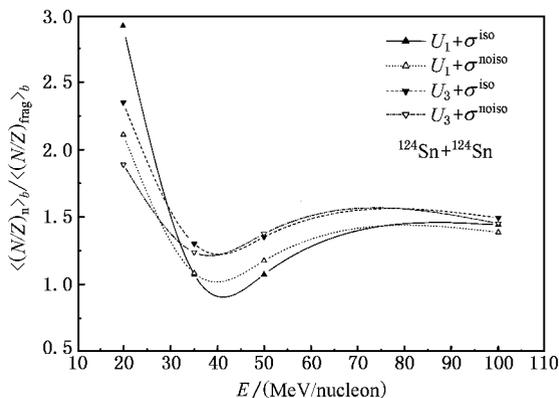


图2 同位旋分馏强度 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 对碰撞参数平均后随入射能量和系统质量的演化

图2为同位旋分馏强度 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 对碰撞参数的平均值随入射能量的演化.反应系统为丰中子的 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ .计算对于不同的对称势 $U_1^{sym}$ 和 $U_2^{sym}$ ,以及不同的核子-核子碰撞截面 $\sigma^{iso}$ 和 $\sigma^{noiso}$ 进行.图2中4种曲线的标识与图1完全一致.从图2清楚的看到在 $E = 40\text{MeV/核子}$ 以上能区 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 随束流能量的增加而缓慢上升.这主要是由于碰撞系统内部激发能随着束流能量的增加而增加.这就导致碰撞中核子输运过程增加,从而加速了同位旋液相和气相的分馏过程,特别是在束流能量从 $40\text{MeV/核子}$ 到大约 $90\text{MeV/核子}$ 的能量区间.来自于不同对称势 $U_1^{sym}$ 和 $U_2^{sym}$ ,而相同 $\sigma^{iso}$ 或者 $\sigma^{noiso}$ 的不同 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 之间差别很明显.然而来自于不同两体碰撞截面 $\sigma^{iso}$ 和 $\sigma^{noiso}$ ,但具有相同对称势 $U_1^{sym}$ 或者 $U_2^{sym}$ 的 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 值之间差别很小.也就是说 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 灵敏的依赖于对称势而弱的依赖于介质中核子-核子碰撞截面.然而以上特征只是发生在一定的能区 $40-85\text{MeV/核子}$ .但在低于 $40\text{MeV/核子}$ 和高于 $85\text{MeV/核子}$ 能区上述特征消失,即同位旋分馏过程消失.这就表明发生同位旋分馏过程的能区正好与产生液-气相变的能区一致.同样表明同位旋分馏正好发生在重离子碰撞中的液-气相变过程中.两者反应了同一动力学过程的不同侧面.

这里需要说明在 $40\text{MeV/核子}$ 以下能区 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 随入射能量的下降而快速上升.这主要是因为在该低能区主要碎片产物是电荷数大于50的碎片.根据我们关于碎片的定义 $(N/Z)_{frag}$ 不包括电荷数大于50的碎片.然而在该低能区电荷数小于50的碎片 $(N/Z)_{frag}$ 迅速减小,所以导致 $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 的迅速上升.

## 4. 结 论

从以上计算和分析可以得到以下结论:

1. 在碰撞系统中子-质子比,碰撞参数和入射能量相同条件下, $(N/Z)_n/(N/Z)_{frag}$ 的幅度随碰撞系统质量的增加而减小,主要由于与轻碰撞系统相比较,重系统有较大的压缩能,小的热能和大的液-气相变的临界温度所致.

2. 在碰撞系统质量,碰撞参数,系统的同位旋相

同条件下,  $(N/Z)_n / (N/Z)_{\text{inf}}$  在一定的能区 40—85 MeV/核子之间有明显的同位旋分馏现象, 而这一

能区正好与产生液-气相变的能区一致, 说明同位旋分馏与液-气相变过程紧密相连.

- [ 1 ] Li B A , Ko C M and Bauer W 1998 *Int. J. Mod. Phys. E* **7** 147
- [ 2 ] Li B A and Udo Schröder W 2001 *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies* ( New York : Nova Science Publishers )
- [ 3 ] Wada R *et al* 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1829
- [ 4 ] Yennello S J *et al* 1994 *Phys. Lett. B* **321** 14  
Yennello S J *et al* 2001 *Nucl. Phys. A* **681** 317c
- [ 5 ] Pak R *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1022 ;1026
- [ 6 ] Westfall G D 1998 *Nucl. Phys. A* **630** 27c  
Westfall G D 2001 *Nucl. Phys. A* **681** 343c
- [ 7 ] Kunde G L *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 2897
- [ 8 ] Miller M L *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1399
- [ 9 ] Xu H *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 716  
Tsang M B *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5023
- [ 10 ] Udo Schröder W *et al* 2001 *Nucl. Phys. A* **681** 418c
- [ 11 ] Sobotka L G *et al* 1994 *Phys. Rev. C* **55** R1272  
Sobotka L G *et al* 2000 *Phys. Rev.* **62** 031603
- [ 12 ] Rami F *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1120
- [ 13 ] Liu J Y , Xing Y Z and Guo W J 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 832
- [ 14 ] Li B A 2001 *Phys. Rev. C* **64** 054604
- [ 15 ] Li B A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4221
- [ 16 ] Li B A *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1644
- [ 17 ] Liu J Y , Guo W J , Wang S J , Zuo W , Zhao Q and Yang Y F 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 975  
Yang Y F , Liu J Y , Zuo W , Guo W J and Zhao Q 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1040
- [ 18 ] Liu J Y , Zhao Q , Wang S J , Zuo W and Guo W J 2001 *Phys. Rev. C* **63** 054612
- [ 19 ] Liu J Y , Guo W J , Wang S J , Zuo W , Zhao Q and Yang Y F 2001 *Nucl. Phys. A* **687** 475
- [ 20 ] Colonna M *et al* 1998 *Phys. Rev. C* **57** 1410  
Di Toro M *et al* 2001 *Nucl. Phys. A* **681** 426C
- [ 21 ] Baran V *et al* 2002 *Nucl. Phys. A* **703** 603
- [ 22 ] Bertsch G F and Gupta S D 1988 *Phys. Rep.* **160** 1991
- [ 23 ] Aichelin J *et al* 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1926
- [ 24 ] Aichelin J *et al* 1988 *Phys. Rev. C* **37** 2451
- [ 25 ] Reinhard P G *et al* 1991 *Computational Nuclear Physics* Vol. 1 ( Berlin Springer-Verlag ) pp.28—50  
Danielewicz 2000 *Nucl. Phys. A* **673** 375
- [ 26 ] Alkahlzov G *et al* 1977 *Nucl. Phys. A* **280** 365
- [ 27 ] Song H Q *et al* 1990 *J. Phys. G* **16** 1861
- [ 28 ] Song H Q *et al* 1989 *Chin. Phys. Lett.* **7** 117

# Dependences of isospin fractionation degree on the mass and beam energy of a colliding system<sup>\*</sup>

Guo Wen-Jun<sup>1 2)</sup> Liu Jian-Ye<sup>1 2 3)</sup> Xing Yong-Zhong<sup>1 3)</sup>

<sup>1)</sup> Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

<sup>2)</sup> Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

<sup>3)</sup> Institute for the Theory of Modern Physics, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)

(Received 2 December 2003; revised manuscript received 24 February 2004)

## Abstract

Based on the isospin-dependent quantum molecular dynamics model, we have investigated the dependences of isospin fractionation degree  $(N/Z)_n$  and  $(N/Z)_{frag}$  on the mass and the beam energy of colliding system. The  $(N/Z)_n$  and  $(N/Z)_{frag}$  are the neutron proton ratio of the nucleon emission (gas phase) and that of the fragment emission (liquid phase) respectively. The isospin fractionation degree is a sensitive function to the mass and beam energy of the colliding system. The  $(N/Z)_n$  and  $(N/Z)_{frag}$  reduces with increasing mass of the colliding system when the beam energy and neutron proton ratio of the colliding system are fixed. This is due to the larger compression, small heating energy and larger critical temperature of the gas-liquid phase transition for the heavy colliding system, compared to those of the light colliding system. We also found that  $(N/Z)_n$  and  $(N/Z)_{frag}$  enhances with increasing beam energy due to the increase of excitation energy of the colliding system which leads to larger nucleon transport and isospin fractionation. But the isospin fractionation only occurs in the energy region for producing the liquid-gas phase transition. In this case, we propose that  $(N/Z)_n$  and  $(N/Z)_{frag}$  can be directly compared with the experimental data to get the information about symmetry potential.

**Keywords:** isospin fractionation, symmetry potential

**PACC:** 2570, 0270, 2410

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G2000077400), the "100 Talent project" of the Chinese Academy of Sciences, the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 10175080, 10175082, 10004012, 19847002) and The CAS Knowledge Innovation Project (Grant No. KJCX2-SW-N02).