

# 中能重离子碰撞中的气-液相变和同位旋分馏\*

邢永忠<sup>1,2,4;1)</sup> 刘建业<sup>1-4</sup> 郭文军<sup>3</sup>

1 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2 (天水师范学院近代物理理论研究所 天水 741000)

3 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

4 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

**摘要** 利用核物质理论研究气-液相变结果表明,气-液相变中临界温度  $T_c$  随系统质量的增加而增加,但随碰撞系统同位旋的增加而减小. 利用改进的同位旋相关的量子分子动力学模型,研究了中能重离子碰撞过程中同位旋分馏强度随碰撞系统的同位旋和系统质量的变化,结果表明,同位旋分馏强度与气-液相变临界温度  $T_c$  有对应的关系,特别是气-液相变和同位旋分馏都发生在正常核密度以下低密度的 spinodal 不稳定区. 这表明气-液相变和同位旋分馏具有相类似的动力学行为和内在联系,也预示着可以通过对同位旋分馏强度的研究和测量来揭示中能重离子碰撞过程中气-液相变的动力学特征.

**关键词** 同位旋分馏 气-液相变重离子碰撞

## 1 引言

到目前为止,人们虽然已经对重离子碰撞中的同位旋效应进行了研究,碰撞过程中表现出来的同位旋效应已被用来作为提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面和同位旋相关的平均场知识的有力工具. 但是对于碰撞过程中的两个基本动力学要素——同位旋相关的平均场和两体碰撞截面还没有确定. 近年 Bao-An Li, M. Di Toro, M. Colonna, V. Baran, Jian Ye Liu 等人研究的同位旋分馏现象就是中能重离子碰撞过程中的一种同位旋效应,也是提取同位旋相关的平均场知识的探针<sup>[1-6]</sup>.

众所周知,重离子碰撞中的气-液相变一直是实验和理论研究的重要课题. 通过对气-液相变的研究可以了解重离子核反应的动力学机制和核物质的性质. 因为气-液相变和同位旋分馏都发生在正常核密度以下低密度的 spinodal 不稳定区,所以,中

能重离子碰撞过程中的同位旋分馏和气-液相变之间的联系是一个很有兴趣的研究课题. 这里,我们基于改进的同位旋相关的量子分子动力学理论 (IQMD)<sup>[7-11]</sup>,研究了中能重离子碰撞过程中的同位旋分馏强度  $(N/Z)_q / (N/Z)_s$  随碰撞系统的同位旋和系统质量的变化关系. 研究结果显示:在碰撞系统的同位旋固定不变的条件下,同位旋分馏强度随碰撞系统质量的增大而减小,正好与气-液相变中  $T_c$  随系统质量的增加而增加的现象<sup>[12,13]</sup> 相对应;但在固定碰撞系统质量的条件下,同位旋分馏强度随碰撞系统同位旋的增加而增加,这正好又与气-液相变中  $T_c$  随系统中质比的增加而减小的现象<sup>[12,13]</sup> 相对应. 这表明在中能重离子碰撞中,同位旋分馏强度与气-液相变的临界温度具有相似的动力学特征. 这就预示我们可以通过对同位旋分馏强度的研究和测量来揭示中能重离子碰撞过程中气-液相变的特征.

2003-08-18 收稿

\* 国家重大基础研究发展规划项目(G2000077400),国家自然科学基金(10175080,10004012,10175082)和中国科学院知识创新工程重点方向项目(KJ951-A1-01-02)资助

1) E-mail: yzxing@tsnc.edu.cn

## 2 理论模型简介

描述中能重离子碰撞反应动力学的量子分子动力学模型(QMD)<sup>[9,10]</sup>包含两个主要因素:密度相关的平均场和介质中核子-核子碰撞截面.为了适当地描述同位旋效应,QMD模型应该做合理的修改:密度相关的平均场应该包含同位旋有关的对称势和库仑势,介质中核子-核子碰撞截面应该对中子-中子(质子-质子)碰撞和中子-质子碰撞加以区别,Pauli阻塞也要对中子和质子进行区别.另外反应最初的两个核的基态也应该包含同位旋的信息.在我们的IQMD模型中,反应核的初始密度分布由具有参数SKM\*<sup>[14]</sup>的Skyrme-Hartee-Fock计算得到.通过结合能和核的均方半径与实验值的比较由初始化的IQMD程序决定反应核中所有核子的初始坐标和动量.并确定相互作用势和参数如下所示:

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

$U^{\text{Sky}}$ 是密度相关的Skyrme势, $U^{\text{Coul}}$ 是库仑势; $U^{\text{Yuk}}$ 表示Yukawa势, $U^{\text{MDI}}$ 是动量相关作用(MDI), $U^{\text{Pauli}}$ 是泡里势, $U^{\text{sym}}$ 是对称势.在本文中,使用2种不同的对称势<sup>[15]</sup>:

$$U_1^{\text{asy}} = \pm 2e_a u \delta, \quad (2)$$

$$U_2^{\text{asy}} = \pm 2e_a u^{1/2} \delta + e_a u^{1/2} \delta^2, \quad (3)$$

所用各种势参数请见表1.

表1 相互作用势参数

| $C/\text{MeV}$   | $\alpha/\text{MeV}$   | $\beta/\text{MeV}$ | $\gamma/\text{MeV}$                    | $t_3/\text{MeV}$ |
|------------------|-----------------------|--------------------|--|------------------|
| 32               | 390.1                 | 320.3              | 1.1667                                 | 7.5              |
| $t_4/\text{MeV}$ | $t_5/\text{MeV}^{-2}$ | $V_p/\text{MeV}$   | $p_0/(\text{MeV} \cdot \text{c}^{-1})$ | $q_0/\text{fm}$  |
| 1.57             | $5 \times 10^{-4}$    | 30                 | 400                                    | 5.64             |

值得提到的是在对中能重离子碰撞中集体流的研究中发现介质中核子-核子碰撞截面是减小的.一个经验的密度相关的介质中核子-核子碰撞截面的公式如下<sup>[16]</sup>:

$$\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}} = \left(1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0}\right) \sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}, \quad (4)$$

这里参数取 $\alpha = -0.2$ 被发现与集体流的实验数据得到了很好的符合, $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$ 是实验核子-核子碰撞截面<sup>[17]</sup>.我们通过修正的并合模型来判断碎片的形成,取同一个碎片中的粒子具有小于 $300\text{MeV}/c$ 的相对动量和小于 $3.5\text{fm}$ 的相对距离,并使用重构模型去除一些非物理的碎片,直到没有非物理的碎片产

生.关于IQMD中主要的物理思想和程序实现可参考文献[7—11].

## 3 结果与讨论

介质中核子-核子碰撞截面对于物理观测量的同位旋效应定义为利用同位旋相关的核子-核子碰撞截面 $\sigma^{\text{iso}}$ 对该物理量的计算结果与利用同位旋无关的核子-核子碰撞截面 $\sigma^{\text{noiso}}$ 所计算结果之差. $\sigma^{\text{iso}}$ 表示 $\sigma_{\text{np}} \geq \sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$ ,而 $\sigma^{\text{noiso}}$ 表示 $\sigma_{\text{np}} = \sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$ ,这里 $\sigma_{\text{nn}}$ , $\sigma_{\text{pp}}$ , $\sigma_{\text{np}}$ 分别表示中子-中子、质子-质子、中子-质子间的碰撞截面. $(N/Z)_{\text{液}}$ 为电荷数在 $2 \leq Z \leq (Z_p + Z_t)/2$ 之间的碎片的中质比, $Z_t$ 与 $Z_p$ 分别为靶核与弹核的电荷数.由于 $(N/Z)_{\text{e}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 同时依赖于碰撞系统的质量 $M$ 和系统的中质比 $(N/Z)$ ,为了研究它们各自对于同位旋分馏强度的影响,首先固定其一变量观察另一变量对于 $(N/Z)_{\text{e}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 的影响.图1给出在不同对称势 $U_1^{\text{sym}}$ 和 $U_2^{\text{sym}}$ 以及不同核子-核子截面 $\sigma^{\text{iso}}$ 和 $\sigma^{\text{noiso}}$ 条件下, $(N/Z)_{\text{e}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随碰撞系统质量的演化规律.碰撞系统包括 $^{48}\text{Ca} + ^{48}\text{Ca}$ , $^{64}\text{Fe} + ^{64}\text{Fe}$ , $^{98}\text{Zr} + ^{98}\text{Zr}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ .这4个系统的中质比依次为:1.40, 1.46, 1.45和1.48,它们大致相同.从图1可以清楚地看到,属于不同对称势和同一性质的核子-核子碰撞截面的两条曲线之间的间隙较大,而属于同一对称势和不同性质核子-核子碰撞截面的两条曲线之间的间隙较小.这表明: $(N/Z)_{\text{e}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 灵敏地依赖于对称势而较弱地依赖于核子-核子碰撞截面.特别是在保持这一特性的条件下, $(N/Z)_{\text{e}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随碰撞系统质量的增加而减小,即随着碰撞系统质量的增加,同位旋分馏变慢.这正好与

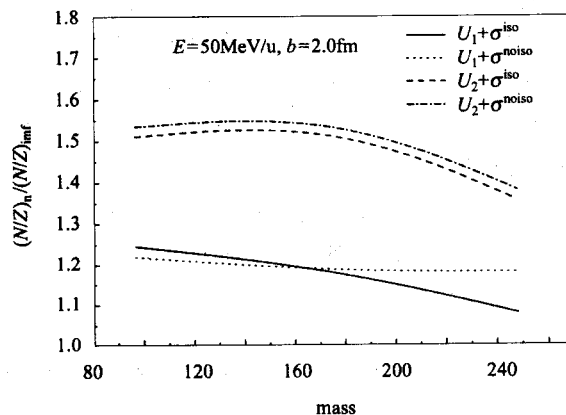


图1 同位旋分馏强度随碰撞系统质量的变化

气-液相变中临界温度随系统质量演化的动力学行为相类似,即气-液相变的临界温度  $T_c$  随系统质量的增加而增加<sup>[12,13]</sup>. 由于  $T_c$  的增加标志着气-液相变现象变慢,因而会导致同位旋分馏过程的减缓,从而使同位旋分馏强度  $(N/Z)_{eq}/(N/Z)_{liq}$  减小.

图 2 中给出的是在碰撞系统的质量固定的条件下,同位旋分馏强度  $(N/Z)_{eq}/(N/Z)_{liq}$  随碰撞系统中子-质子比的演化. 图中数据来自于对系统质量为 188 的 4 个碰撞系统  $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ ,  $^{94}\text{Zr} + ^{94}\text{Zr}$ ,  $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$  和  $^{94}\text{Ru} + ^{94}\text{Ru}$  的计算结果. 它们的中质比依次为:1.61,1.35,1.24 和 1.14. 很明显,同位旋分馏强度  $(N/Z)_{eq}/(N/Z)_{liq}$  随碰撞系统的中子-质子比的增加而增加. 这正好与气-液相变中  $T_c$  随系统的中质比的增加而减小<sup>[12,13]</sup> 相对应,由于  $T_c$  的减小有利于气-液相变的发生,从而加快了同位旋分馏过程,导致分馏强度  $(N/Z)_{eq}/(N/Z)_{liq}$  的增加,也就是说,丰中子的碰撞系统同位旋分馏现象明显发生于气-液相变的  $T_c$  较低的区域.

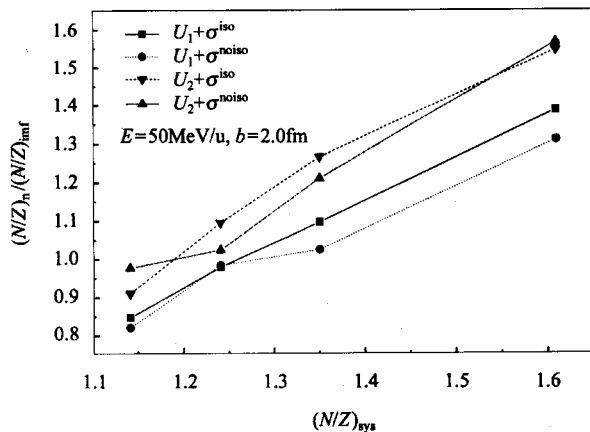


图 2 同位旋分馏强度随系统中质比的变化

另一个有趣的问题是:  $(N/Z)_{eq}/(N/Z)_{liq}$  和  $T_c$  随入射能量的变化有无对应关系呢? 如我们所知,在中能重离子碰撞实验中,气-液相变一般发生在大约 40MeV/u 与 90MeV/u 之间的能区. 图 3 表示同位旋分馏强度对于碰撞参数的平均值  $\langle(N/Z)_{eq}\rangle_b/\langle(N/Z)_{liq}\rangle_b$  随束流能量的演化,反应系统为  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ . 很显然,同位旋分馏强度在 40MeV/u 以上随入射能量的增加而增加,这是由于随着入射能量的

增加,系统激发能增加的结果. 然而,  $\langle(N/Z)_{eq}\rangle_b/\langle(N/Z)_{liq}\rangle_b$  灵敏地依赖于对称势而较弱地依赖于核子-核子碰撞截面,这个特征仅发生在束流能量为 40MeV/u 到 90MeV/u 之间的能区,在束流能量小于 40MeV/u 和大于 90MeV/u 时,上述特征逐渐消失. 这表明同位旋分馏现象主要发生在产生气-液相变的能区.

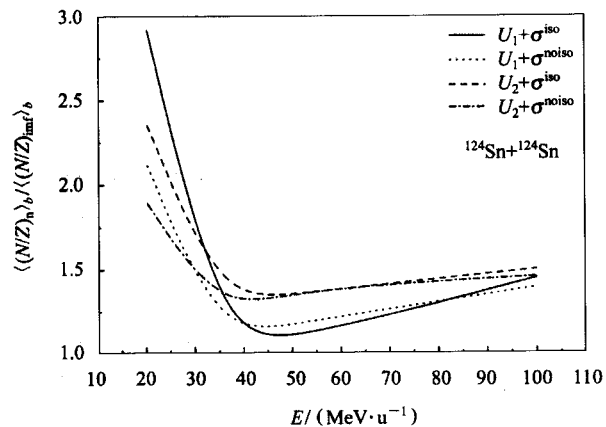


图 3 同位旋分馏强度对于碰撞参数的平均值随入射能量的演化

## 4 小结

通过以上分析可以看出:(1) 同位旋分馏强度  $(N/Z)_{eq}/(N/Z)_{liq}$  随系统质量的增加而减小,正好与气-液相变中临界温度  $T_c$  随系统质量的增加而增加相一致. 即  $T_c$  的增加减慢了气-液相变和同位旋分馏现象.(2) 同位旋分馏强度  $(N/Z)_{eq}/(N/Z)_{liq}$  随系统的中子-质子比的增加而增加,正好与气-液相变中临界温度  $T_c$  随系统中质比的增加而减小的现象相对应.  $T_c$  的减小有利于了解气-液相变和同位旋分馏现象,从而增强了  $(N/Z)_{eq}/(N/Z)_{liq}$ . (3) 同位旋分馏现象主要发生在产生气-液相变的能区. 因此,同位旋分馏和气-液相变随系统质量、中子-质子比以及入射能量的演化规律有相似的动力学行为. 这就预示可以通过对同位旋分馏强度的研究和测量来揭示中能重离子碰撞过程中气-液相变的动力学特征.

## 参考文献 (References)

- 1 LI Bao-An. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**(20):4221
- 2 LI Bao-An, KO Che-Ming, REN Z Z et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:1644
- 3 Colonna M, Di Toro M et al. Phys. Rev., 1998, **C57**:1410-1415;

- Di Toro M et al. Nucl. Phys., 2001, **A681**:426C
- 4 Baran V, Colonna M, Di Toro M et al. Nucl. Phys., 2002, **A703**:603
- 5 XU H et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**:716; Tsang M B et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**:5023
- 6 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, XING Zhong-Zhong. Nucl. Phys., 2003, **A723**:483—495
- 7 LI B A, Udo Schroder W. Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies (book), Nova Science Publishers, New York, Inc. 2001
- 8 Bertsch G F, Gupta S D. Phys. Rep., 1988, **160**:1991
- 9 Aichelin J et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**:1926
- 10 Aichelin J et al. Phys. Rev., 1988, **C37**:2451
- 11 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**(6):975—978; YANG Yan-Fang, LIU Jian-Ye, ZUO Wei et al. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**(8):1040
- 12 SONG H Q et al. J. Phys., 1990, **G16**:1861
- 13 SONG H Q et al. Chin. Phys. Lett., 1989, **7**:117
- 14 Reinhard P G et al. Computational Nuclear Physics, Vol.1, Edited by K. Longanke et al. Springer-Verlag, Berlin; 1991, 28—50; Danielewicz. Nucl. Phys., 2000, **A673**:375
- 15 LI B A, KO C M, Bauer W. Int. J. Mod. Phys., 1998, **E7**:147
- 16 Klakow D, Welke G, Bauer W. Phys. Rev., 1993, **C48**:1982
- 17 Alkazzov G et al. Nucl. Phys., 1977, **A280**:365

## Liquid-Gas Phase Transition and Isospin Fractionation in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions\*

XING Yong-Zhong<sup>1,2,4;1)</sup> LIU Jian-Ye<sup>1-4</sup> GUO Wen-Jun<sup>3</sup>

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

2 (Institute for the Theory of Modern Physics, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)

3 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

4 (CCAST (Word Lab.), Beijing 100080, China)

**Abstract** The liquid-gas phase transition in the heavy ion collisions and nuclear matter has been an important topic and got achievements, such as, based on the studies by H. Q. Song et al the critical temperature of liquid-gas phase transition enhances with increasing the mass of system and reduces as the increase of the neutron proton ratio of system. As we know that both the liquid-gas phase transition and the isospin fractionation occur in the spinodal instability region at the nuclear density below the normal nuclear density. In particular, these two dynamical processes lead to the separation of nuclear matter into the liquid phase and gas phase. In this case to compare their dynamical behaviors is interested. We investigate the dependence of isospin fractionation degree on the mass and neutron proton ratio of system by using the isospin dependent quantum molecular dynamics model. We found that the degree of isospin fractionation  $(N/Z)_n/(N/Z)_{inf}$  decreases with increasing the mass of the system. This is just similar to the enhance of the critical temperature of liquid-gas phase transition  $T_c$  as the increase of system mass. Because the enhance of  $T_c$  is not favorable for the liquid-gas transition taking place, which reduces the isospin fractionation process and leads to decrease of  $(N/Z)_n/(N/Z)_{inf}$ . However the degree of isospin fractionation enhances with increasing the neutron proton ratio of the system. It is just corresponding to the reduce of  $T_c$  of the liquid-gas phase transition as the increase of the isospin fractionation of the system. Because the reduce of  $T_c$  enhances the liquid-gas phase transition process and also prompts the isospin fractionation process leading the increase of the isospin fractionation degree. To sum up, there are very similar dynamical behaviors for the degree of isospin fractionation and the critical temperature of the liquid-gas phase transition. So dynamical properties of the liquid-gas phase transition can be measured and studied through the studies of isospin fractionation experimentally.

**Key words** isospin fractionation, liquid-gas phase transition, heavy ion collision

Received 18 August 2003

\* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077400), National Natural Science Foundation of China (10175080, 10004012, 10175082) and Knowledge Innovation Project of CAS (KJCX2-SW-N02)

1) E-mail: yzxing@tscn.edu.cn