

中能重离子碰撞过程中同位旋分馏的特征和机制*

刘建业^{1,2,3}, 邢永忠^{1,2}, 郭文军³

(1 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

2 天水师范学院近代物理理论研究所, 甘肃 天水 741000;

3 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用同位旋依赖的 QMD 模型主要对中能重离子碰撞中同位旋分馏机制和主要特征进行了讨论和分析, 得到了一些有趣的结果, 并建议将同位旋分馏强度作为提取同位旋相关平均场和建立同位旋不对称核物质状态方程的探针.

关键词: 中能重离子碰撞; 同位旋分馏; 对称势; 同位旋效应

中图分类号: O571.6 **文献标识码:** A

1 引言

随着放射性束的产生和应用, 中能重离子碰撞的同位旋物理成为核物理研究中的前沿. 人们从实验和理论两方面进行了研究^[1-14]. 而同位旋分馏是同位旋物理研究中的热点课题. 同位旋分馏是指核反应产物中的气相和液相的中子-质子比的不等分配. 对丰中子碰撞系统会产生丰中子气相和缺中子液相, 而对缺中子碰撞系统产生缺中子气相和丰中子液相. Li Bao-an^[8]利用同位旋相关的 BUU 方程研究表明在中能重离子碰撞中存在着同位旋分馏现象. 计算结果表明, 气相($\rho < (1/8)\rho_0$)和液相($\rho > (1/8)\rho_0$)的中子质子比的比值为同位旋分馏强度. 它只对同位旋相关的平均场(对称势)灵敏而对核子-核子碰撞截面不灵敏. 同时 Colonna 等^[10]和 Baran 等^[11]研究了中能重离子碰撞中同位旋分馏动力学和产生同位旋分馏的机理.

但是我们所知, 同位旋相关的 BUU(IBUU)模型不能计算重离子碰撞过程中的碎片形成. 故 Li Bao-an 假定的气相($\rho < (1/8)\rho_0$)和液相($\rho > (1/8)\rho_0$)无法直接与实验数据进行比较. 我们将量子分子动力学(QMD)改造成为同位旋依赖的 QMD, 即 IQMD. 对中能重离子反应过程中的发射核子定义为气相, 而将一定电荷数区间的碎片定义为液相.

从而可以直接与实验数据进行比较. 我们定义的气相中子-质子比与液相中子-质子比的比值为同位旋分馏强度, 而研究结果表明气相中子-质子比(N/Z)_{gas}对于确定同位旋分馏强度的动力学行为中起着主导作用. 特别是同位旋分馏强度灵敏地依赖于对称势而较弱地依赖于同位旋相关核子-核子碰撞截面^[12]. 建议通过同位旋分馏强度的理论结果与实验数据比较可以得到有关同位旋相关平均场的知识和建立同位旋非对称核物质状态方程, 并对同位旋分馏机理和特征进行了分析和讨论.

2 理论模型

描述中能重离子碰撞反应动力学的 QMD 模型^[15-17]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. 为了适当的描述同位旋效应, 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^[1, 18]中, 反应核的初始密度分布由具有参数 SKM*^[19]的 Skyrme-Hartree-Fock 计算得到.

收稿日期: 2004 - 02 - 09

* 基金项目: 国家重大基础研究发展规划资助项目(G2000077400); 国家自然科学基金资助项目(10175080, 10004012, 10175082); 中国科学院知识创新工程重点方向资助项目(KJXC2-SW-No2)

作者简介: 刘建业(1937-), 男(汉族), 陕西淳化人, 研究员, 从事原子核结构理论和中能重离子碰撞理论研究.

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. 确定的相互作用势和参数如下所示:

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

U^{Sky} 是密度相关的 Skyrme 势, U^{Coul} 是库仑势, U^{Yuk} 表示 Yukawa 势, U^{MDI} 是动量相关作用, U^{Pauli} 是泡里势, U^{sym} 是对称势. 在本文中, 使用两种不同的对称势^[2]:

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

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

$e_a = 16 \text{ MeV}$. 值得提到的是, 在最近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^[20]:

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

这里参数取 $\alpha \approx -0.2$ 时, 与集体流的实验数据得到很好的符合, $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$ 是实验核子-核子碰撞截面. IQMD 中, 主要的物理思想和程序实现可参考文献 [15—18].

3 主要结果和讨论

3.1 中能重离子碰撞过程中同位旋分馏的动力学行为和主要特征

我们利用 IQMD 模拟计算过程中, 定义冻结时间 (300 fm/c) 内反应产物中发射的核子为气相, 而将电荷数在 $2 \leq Z \leq (Z_p + Z_t)/2$ 之间的所有碎片定义为液相. 这里 Z_p 和 Z_t 分别是弹核和靶核的电荷数. 图 1 是冻结时同位旋分馏强度 $(N/Z)_{\text{gas}} / (N/Z)_{\text{liq}}$ 随碰撞系统中子-质子比的演化过程. 束流能量 $E = 50 \text{ MeV/u}$ 和碰撞参数 $b = 2.0 \text{ fm}$. 这里包括相同系统质量 $A_1 + A_p = 188$, 而中子-质子比不同的 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 $^{94}\text{Ru} + ^{94}\text{Ru}$. 这 4 个碰撞系统的中子-质子比依次分别为 1.6, 1.35, 1.24 和 1.14. 因为同位旋分馏强度同时依赖于碰撞系统的质量和和中子-质子比, 为了研究和突出同位旋分馏强度随碰撞系统中子-

质子比的演化, 必须固定不同碰撞系统的质量.

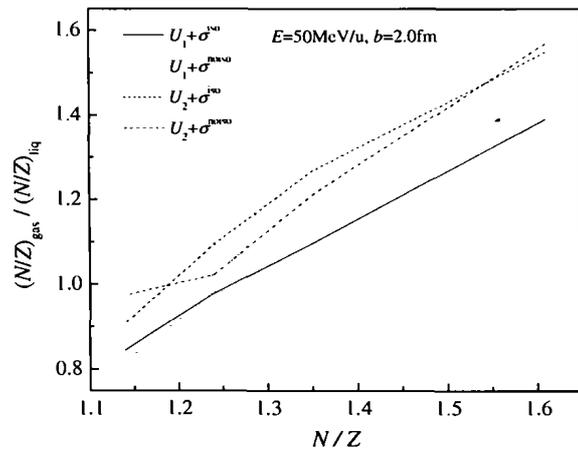


图 1 $(N/Z)_{\text{gas}} / (N/Z)_{\text{liq}}$ 随碰撞系统中子-质子比的变化

从图 1 可以看出, 在碰撞系统质量、碰撞参数和入射能量都固定的情况下, 同位旋分馏强度随碰撞系统中子-质子比的增加而增加. 特别是对于丰中子系统 $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ 和 $^{94}\text{Zr} + ^{94}\text{Zr}$ 而言, 同位旋分馏强度都大于 1. 即相对于系统中子-质子比而言, 同位旋分馏得到了丰中子气相和缺中子液相. 同时同位旋分馏强度的幅度随着对称势强度的增加而增加. 因为在低密度区, 对称势 $U_2^{\text{sym}} > U_1^{\text{sym}}$. 从图 1 可以看出, 用 U_2 计算得到的同位旋分馏强度都大于 U_1 计算的值. 我们同时计算了其它反应系统, 得到了相同的结论.

为什么在中能重离子碰撞过程中会发生同位旋分馏现象? 如我们所知, 重离子碰撞中的化学势包括对称势, 而对称势对于中子是斥力, 对于质子是吸引力. 在对称势的作用下, 自由中子会比自由质子获得更多的动能. 对于处于束缚态的核子, 则多于质子数的中子脱离束缚而获得自由. 故从图 2 中子和质子的化学势 μ_n, μ_p 对核密度 ρ 的依赖关系中, 看到在非平衡过程中质量流由化学势区域值的差所决定, 即从高化学势区域向低化学势区域流动, 直到系统达到平衡. 犹如在温度梯度下热的流动. 从图 2 可以看到, 在正常核密度 (0.16 fm^{-3}) 以下附近区域 (图中两条点线之间的区域), 中子和质子的化学势 μ_n, μ_p 随密度的变化完全相反. 中子化学势 μ_n 随密度 ρ 的减小而下降, 即在化学势的作用下由高密度向低密度区流动. 然而质子的情况完全相反, 随着化学势的下降由低密度区向高密度区流

动, 从而形成气相丰中子和液相缺中子.

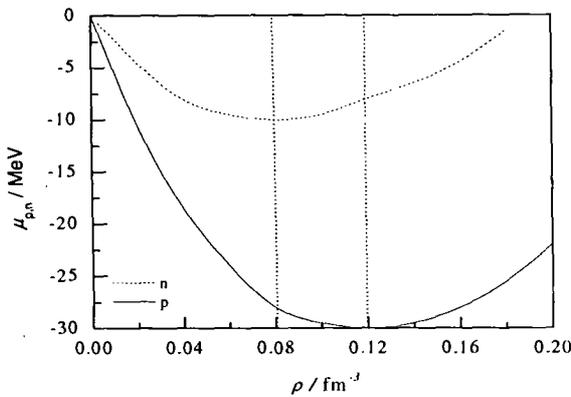


图 2 中子和质子的化学势 μ_n, μ_p 对核密度 ρ 的依赖关系

从图 1 还可以看到, 对于缺中子碰撞系统而言, 同位旋分馏强度随系统中中子-质子比的下降而小于 1. 即相对于缺中子碰撞系统而言, 产生了缺中子的气相和丰中子的液相. 这里有两个原因. 其一是缺中子碰撞系统在碎裂中产生处于激发态的缺中子碎片, 将向 β 稳定线方向退激. 即相对于碰撞

系统的中子-质子比而言, 生成丰中子碎片. 其二在确定系统质量条件下, 缺中子系统比丰中子系统具有更强的库仑作用. 而库仑势对质子是斥力, 相对而言使较多的质子发射, 就导致气相中子-质子比的减小, 故相对于碰撞系统中子-质子比而言生成缺中子气相.

3.2 丰中子系统同位旋分馏强度是提取对称势知识的灵敏探针

从图 1 还清楚地看到, 对于丰中子碰撞系统而言, 具有相同的同位旋相关核子-核子碰撞截面 σ^{iso} 或同位旋无关核子-核子碰撞截面 σ^{noiso} , 而不同对称势 U_1^{sym} 和 U_2^{sym} 的同位旋分馏强度之差是大的. 但相反, 具有相同对称势 U_1^{sym} 或 U_2^{sym} , 不同核子-核子碰撞截面 σ^{iso} 和 σ^{noiso} 的同位旋分馏强度之差是小的. 也就是说, 同位旋分馏强度灵敏的依赖对称势, 而很弱的依赖于核子-核子碰撞截面. 故建议对丰中子碰撞系统, 通过理论上的同位旋分馏强度与实验观测值进行直接比较, 可提取有关对称势的知识和建立同位旋非对称核物质状态方程.

参 考 文 献:

- [1] Li B A, Udo Schröder W. Isospin Physics in Heavy-ion Collisions at Intermediate Energies. New York: Nova Science Publishers, 2001, 1—477.
- [2] Li B A, Ko C M, Bauer W. Int J Mod Phys, 1998, E7: 147.
- [3] Liu Jianye, Guo Wenjun, Wang Shunjin, et al. Phys Rev Lett, 2001, 86(6): 975; Yang Yanfang, Liu Jianye, Zuo Wei, et al. Chinese Physics Letters, 2001, 18(8): 1 014.
- [4] Liu Jianye, Yang Yanfang, Zuo Wei, et al. Phys Rev, 2001, C63: 05461.
- [5] Liu Jianye, Zhao Qiang, Wang Shunjin, et al. Nucl Phys, 2001, A687: 475.
- [6] Liu Jianye, Guo Wenjun, Xing Yongzhong, et al. Physics Letters, 2002, B540: 213.
- [7] Liu Jianye, Guo Wenjun, Xing Yongzhong, et al. Phys Rev, 2003, C67: 024608.
- [8] Li Bao'an. Phys Rev Lett, 2000, 85(20): 4 221.
- [9] Li Bao'an, Ko Cheming, Ren Z Z, et al. Phys Rev Lett, 1997, 78: 1 644.
- [10] Colonna M, Di Toro M, Baran V, et al. Phys Rev, 1998, C57: 1 410.
- [11] Baran V, Colonna M, Di Toro M, et al. Nucl Phys, 2002, A703: 603.
- [12] Liu Jianye, Guo Wenjun, Xing Yongzhong, et al. Nucl Phys, 2003, A726: 123.
- [13] Li Bao'an. Chmical Versus Mwchanical Instability and Isospin Fractionation in Asymmetric Nuclear Matter. Isospin Physics in Heavy-ion Collisions at Intermediate Energy. New York: Nova Science Publishers, 2001, 163—183.
- [14] 刘建业, 赵 强, 左 维等. 原子核物理评论, 2001, 18(1): 21; 刘建业, 刘 航, 陈 波. 原子核物理评论, 1998, 15(2): 65; 刘建业, 刘 航, 王顺金等. 原子核物理评论, 1998, 15(4): 249; 刘建业, 陈 波, 赵 强等. 原子核物理评论, 1999, 16(3): 165.
- [15] Bertsch G F, Gupta S D. Phys Rep, 1988, 160: 1 991.
- [16] Aichelin J, Rosenhauer A, Peilert G, et al. Phys Rev Lett, 1987, 58: 1 926.
- [17] Aichelin J, Rosenhauer A, Peilert G, et al. Phys Rev, 1988, C37: 2 451.
- [18] Zhang Fengshou, Chen Liewen, Jin Genming, et al. Isospin Physics in Heavy-ion Collisions at Intermediate Energies. New York: Nova Science Publishers, Inc 2001, 257—282.
- [19] Reinhard P G, et al. Computational Nuclear Physics. Berlin: Springer-Verlag, 1991, 1: 28—50.
- [20] Klakow D, Welke G, Bauer W. Phys Rev, 1993, C48: 1 982.

Properties and Mechanism of Isospin Fractionation in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions*

LIU Jian-ye^{1, 2, 3}, XING Yong-zhong^{1, 2}, GUO Wen-jun³

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

2 *Institute for the Theory of Modern Physics, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, Gansu, China;*

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

Abstract: The degree of isospin fractionation is measured by $(N/Z)_{\text{gas}} / (N/Z)_{\text{liq}}$, where $(N/Z)_{\text{gas}}$ and $(N/Z)_{\text{liq}}$ are the saturated neutron-proton ratio of nucleon emissions (gas phase) and that of fragment emitted (liquid phase) in heavy ion collision at intermediate energy. The calculated results by using the isospin-dependent quantum molecular dynamics model show that the degree of isospin fractionation is sensitive to the neutron-proton ratio of colliding system. In particular, the degree of isospin fractionation sensitively depends on the symmetry potential and weakly on the in-medium nucleon-nucleon cross section for the neutron-rich system. In this case, we propose that the degree of isospin fractionation can be directly compared with the experimental data so that the information about symmetry potential can be obtained.

Key words: intermediate energy heavy ion collision; isospin fractionation; symmetry potential; isospin effect

* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program(G2000077400); National Natural Science Foundation of China (10175080,10004012,10175082); Knowledge Inovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-No4)