

中能重离子碰撞中同位旋分馏的同位旋效应*

邢永忠^{1,3;1)} 刘建业^{1,2,3} 郭文军²

1(天水师范学院近代物理理论研究所 天水 741000)

2(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 基于改进的同位旋相关量子分子动力学模型,研究了中能重离子碰撞中同位旋分馏强度 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随着碰撞系统中子-质子比和碰撞参数的变化所呈现出的同位旋效应,得到了一些有兴趣的结果.如在碰撞系统质量、入射能量和碰撞参数固定的条件下, $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随碰撞系统中子-质子比的增加而增加.对于丰中子系统而言, $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 灵敏地依赖于对称势而较弱地依赖于核子-核子碰撞截面;而缺中子系统, $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 对于对称势和介质中核子-核子碰撞截面都不灵敏.对于造成这种现象的物理机制进行了分析和讨论.一般核反应中,碰撞参数是各种物理观测量的灵敏函数,但计算结果表明同位旋分馏强度对于碰撞参数并不灵敏,故对于丰中子系统而言,同位旋分馏强度是提取对称势知识的灵敏物理观测量.

关键词 中能重离子碰撞 同位旋分馏 同位旋效应

1 引言

放射性束的产生和应用为研究原子核反应动力学过程中的同位旋效应(同位旋物理)提供了良好的机遇^[1,2],因为可以通过对中能重离子碰撞中同位旋效应的研究来提取重离子碰撞过程中同位旋相关的状态方程和介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的知识,这些知识不仅对于了解原子核的性质非常重要,而且对于研究天体演化过程,如超新星爆炸,中子星冷却速率均至关重要.近年来人们从理论和实验两个方面都对同位旋效应进行了深入地研究^[1-10],我们小组也在这一方面做了一些工作^[11-13],但至今人们对于同位旋非对称状态方程和介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的知识知之非常有限,还需结合实验进行更系统的研究,特别是寻找能够提取以上知识的灵敏物理观测量.为此 Bao-An Li, M. DiToro 和 M. Colonna 等提出并研究了

中能重离子碰撞中的同位旋分馏现象^[9,10,14,15].同位旋分馏指的是在低密度区和高密度区不稳定同位旋非对称核物质中子-质子比的不等分配:丰中子碰撞系统的同位旋分馏过程产生了丰中子气相 $(N/Z)_{\text{气}}$ 和缺中子液相 $(N/Z)_{\text{液}}$.这种动力学过程对于对称势很灵敏,而对于两体碰撞截面不灵敏.然而 Bao-An Li^[16]所使用的是同位旋相关的 BUU 方程,不能描述重离子碰撞过程中的碎片形成,只能定性地将原子核密度小于 $\frac{1}{8}\rho_0$ 的区域视为气相,而将大于 $\frac{1}{8}\rho_0$ 的区域看作液相,这里 ρ_0 是正常核物质密度.尽管得到了一些非常有趣的结果,但不便于直接与实验数据进行比较.为了克服这一不足,我们基于改进的同位旋相关量子分子动力学(IQMD),选用时间依赖的相干态单粒子波函数来描述重离子碰撞过程中的动力学行为,分别计算气相中子-质子比 $(N/Z)_{\text{气}}$ 和液相中子-质子比 $(N/Z)_{\text{液}}$,从而得到同位旋分馏

2003-07-10 收稿

* 国家重大基础研究发展项目(G2000077400),中国科学院百人计划,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(KJXC2-SW-N02)资助

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

强度 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$. 文中着重计算和分析了 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随碰撞系统中子-质子比和碰撞参数演化的动力学行为和同位旋效应, 得到了一些有趣的结果, 并对其产生机制进行了分析和讨论.

2 IQMD 的简单介绍

描述中能重离子碰撞反应动力学的量子分子动力学 QMD 模型包含两个主要因素: 密度相关的平均场和介质中核子-核子碰撞截面. 为了合理地描述同位旋效应, QMD 模型应该做适当的修改: 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, 碰撞过程中的 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^[2,17-19]中, 反应核的初始密度分布由具有参数 SKM* 的 Skyrme-Hatree-Fock 计算得到. 通过计算结合能和核的均方半径, 并与实验值的比较, 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. 并确定相互作用和势参数为

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

式中 U^{Sky} 是密度相关的 Skyrme 势

$$U^{\text{Sky}} = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (2)$$

U^{Coul} 是库仑势; U^{Yuk} 表示 Yukawa 势

$$U^{\text{Yuk}} = t_3 \exp\left(\frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{m}\right) / \frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{m}, \quad (3)$$

U^{MDI} 是动量相关作用(MDI)

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2[t_5(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (4)$$

U^{Pauli} 是泡利势

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left(\frac{\hbar}{q_0 p_0} \right)^3 \exp\left(-\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2}{2p_0^2}\right) \delta_{p_i p_j}, \quad (5)$$

式中 $\delta_{p_i p_j} = \begin{cases} 1 & \text{中子-中子(质子-质子)} \\ 0 & \text{中子-质子} \end{cases}$, 其中 $\tau_z = \begin{cases} 1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases}$, U^{sym} 是对称势. 在本文中, 使用两种不同的对称势:

$$U_1^{\text{asy}} = \pm 2e_a u \delta, \quad (6)$$

$$U_2^{\text{asy}} = \pm 2e_a u^{1/2} \delta + e_a u^{1/2} \delta^2, \quad (7)$$

其中单核子能量 $e_a = 16\text{MeV}$, 计算过程中, 所用各种势参数见表 1.

表 1 所选用的势参数

	α/MeV	β/MeV	γ	t_3/MeV	m/fm	t_4/MeV	t_5/MeV^{-2}	V_p/MeV	$q_0/(\text{MeV} \cdot \text{c}^{-1})$	q_0/fm
MDI	-390.1	320.3	1.14	7.5	0.8	1.57	5×10^{-4}	30	400	5.64

3 结果与讨论

3.1 重离子碰撞过程中同位旋分馏强度对系统同位旋的依赖关系

一般来说, 在中能重离子碰撞过程中所表现出来的物理观测量同时依赖系统的同位旋、系统质量、入射能量和碰撞参数, 为了突出同位旋分馏对系统同位旋的依赖关系, 计算中我们固定系统质量、入射能量和碰撞参数, 选取所有电荷数在 2 和 $\frac{Z_p + Z_t}{2}$ 之间的碎片数来确定碎片的多重性, 这里 Z_p 和 Z_t 分别为弹核和靶核的电荷数, 气相的中子-质子比 $(N/Z)_{\text{气}}$ 为所有发射核子的中子-质子比. 为了研究 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随碰撞系统中子-质子比演化

的动力学行为, 图 1 中给出了由 4 种碰撞系统 $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$, $^{94}\text{Zr} + ^{94}\text{Zr}$, $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$ 和 $^{94}\text{Ru} + ^{94}\text{Ru}$ 所确定出的 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随碰撞系统中子-质子比的变化. 很明显这 4 个碰撞系统具有完全相同的质量, 碰撞参数和入射能量固定为 $b = 2.0\text{fm}$ 和 $E = 50\text{MeV/u}$. 图 1 是对不同的对称势 U_1^{Sym} 和 U_2^{Sym} 以及不同的核子-核子碰撞截面 σ^{iso} 和 σ^{noiso} 的 4 种组合条件下的计算结果, 其曲线的标识符在图中给出. $(N/Z)_{\text{气}}$ 和 $(N/Z)_{\text{液}}$ 数据取自 300fm/c 时的结果. 尽管这 4 类碰撞系统的质量完全相同, 但它们的中子-质子比不同, 如表 2 所示.

表 2 4 类碰撞系统的中子-质子比

System	$^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$	$^{94}\text{Zr} + ^{94}\text{Zr}$	$^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$	$^{94}\text{Ru} + ^{94}\text{Ru}$
N/Z	1.61	1.35	1.24	1.14

图 1 表明在碰撞系统质量、碰撞参数和入射能

量相同的条件下, $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 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 $^{94}\text{Zr} + ^{94}\text{Zr}$ 的数值都大于 1, 即相对于碰撞系统的中子-质子比意味着丰中子的气相和缺中子的液相. 同样发现 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随着对称势强度的增加而增加. 很明显对于丰中子碰撞系统和低于正常核密度的低密度区, $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 的幅度从大到小的次序与对称势强度的次序相同, 即从 U_2^{Sym} 到 U_1^{Sym} (在低密度区 U_2^{Sym} 强而 U_1^{Sym} 弱, 请参看文献[1]中的图 4.1).

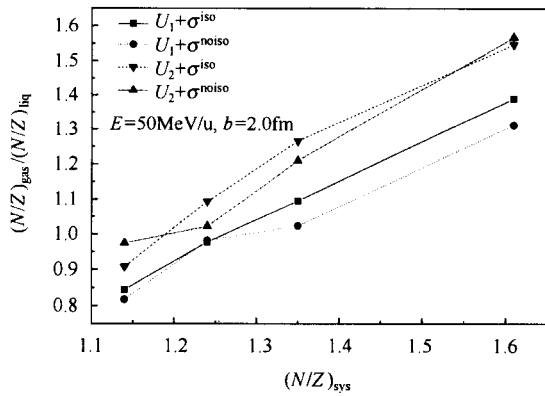


图 1 由 4 种碰撞系统所确定出的 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随碰撞系统中子-质子比的变化

然而对于缺中子碰撞系统 $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$ 和 $^{94}\text{Ru} + ^{94}\text{Ru}$ 而言, $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随着碰撞系统中子-质子比的减小逐渐减小到 1.0 以下. 这就意味着相对于碰撞系统中子-质子比产生了缺中子气相和丰中子液相, 即在缺中子碰撞系统的同位旋分馏过程中, 一方面气相的 $(N/Z)_{\text{气}}$ 由于碰撞系统的缺中子而减少, 另一方面液相的 $(N/Z)_{\text{液}}$ 与碰撞系统初始的中子-质子比相比有所增加, 其原因可以从以下事实得到解释: 激发的初始缺中子碎片会向稳定的丰中子碎片衰变, 并向 β 稳定线接近.

3.2 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 对碰撞参数的依赖关系

一般情况下, 核反应动力学中各种物理观测量对于碰撞参数是很灵敏的. 这里我们来考查同位旋分馏强度 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 对于碰撞参数依赖的灵敏性. 图 2 为丰中子反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 在入射能量 $E = 50\text{MeV/u}$ 时对于不同对称势以及不同两体碰撞截面的条件下 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随碰撞参数 b 的演化. 很明显同位旋分馏强度 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 灵敏地依赖于对称势, 而较弱地依赖于两体碰撞截面

的特征对所有碰撞参数都一直保持, 但对于碰撞参数 b 的变化并不灵敏.

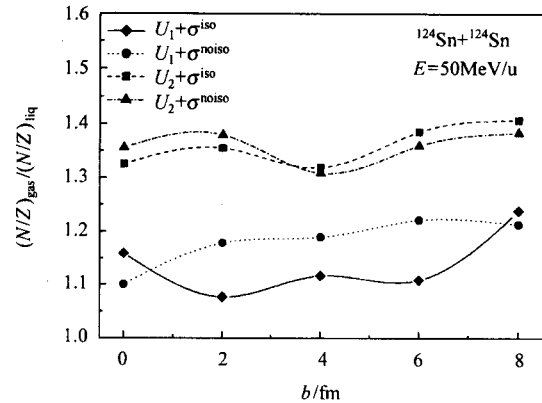


图 2 反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 在不同对称势和碰撞截面的条件下, $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随碰撞参数 b 的演化

为了对这种行为进行解释, 图 3(a) 和 (b) 分别给出了核子发射数 N_N 和中等质量碎片多重性 N_{inf} 随碰撞参数 b 的演化, 很明显 N_N 和 N_{inf} 都是 b 的灵敏函数. 图 4(a) 和 (b) 分别给出气相(发射粒子)的中子-质子比和液相(碎片)的中子-质子比随 b 的演化, 从图 4 中可以清楚地看出, 虽然 $(N/Z)_{\text{气}}$ 和 $(N/Z)_{\text{液}}$ 都随 b 的增加略有上升, 但它们的比值对 b 的依赖性并不明显, 这表明不同碰撞参数时发射中子和发射质子的几率几乎相同, 而同位旋分馏强度正是发射中子数和发射质子数之比.

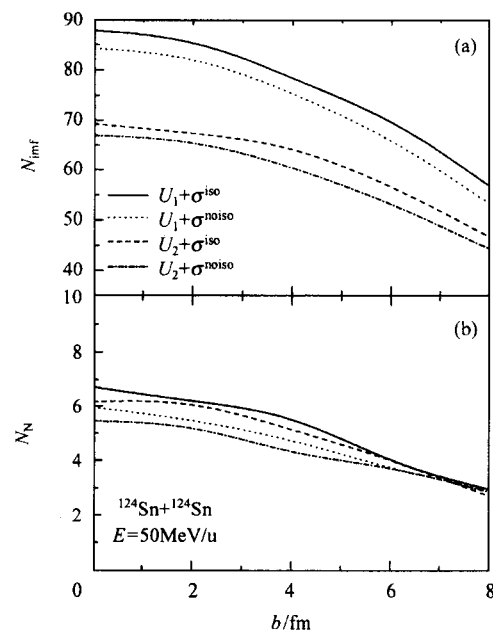


图 3 反应系统 $50\text{MeV/u } ^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 中, 核子发射数 N_N (a) 和中等质量碎片多重性 N_{inf} (b) 随碰撞参数 b 的演化

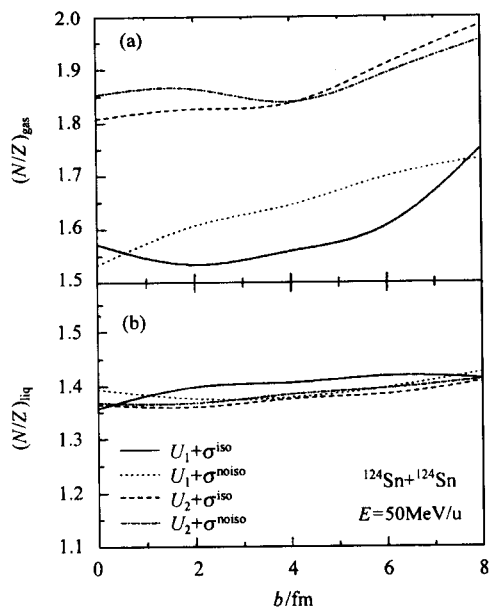


图 4 反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 中, 气相(发射粒子)和液相(碎片)的中子-质子比随碰撞参数 b 的演化

4 小结

通过以上的分析和讨论, 我们得到以下结论: 1) 在碰撞系统质量、入射能量和碰撞参数都固定的条件下, 同位旋分馏强度 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 随碰撞系统中子-质子比和对称势强度的增加而增加, 然而缺中子系统的 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 对于对称势和介质中核子-核子碰撞截面都不灵敏. 2) 丰中子系统的 $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 灵敏地依赖于对称势, 而弱的依赖于介质中核子-核子碰撞截面且对所有碰撞参数都一直保持. 3) $(N/Z)_{\text{气}}/(N/Z)_{\text{液}}$ 对于碰撞参数的依赖性并不灵敏.

参考文献 (References)

- LI B A, KO C M, Bauer W. *Int. J. Mod. Phys.*, 1998, **E7**:147
- LI B A, Udo Schroder W. *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies* (book), Nova Science Publishers, Inc (2001, New York)
- Kunde G J et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**:2897
- Miller M L et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**:1399
- XU H et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **85**:716; Tsang M B et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**:5023; Yennello S J et al. *Nucl. Phys. A* (to be published)
- Udo Schroder W et al. *Nucl. Phys.*, 2001, **A681**:418c
- Sobotka L G et al. *Phys. Rev.*, 1994, **C55**:R1272; 2000, **C62**:031603
- Rami F et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**:1120
- LI B A, *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(20):4221
- LI B A, KO C M, REN Z Z et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**:1644
- 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, GUO Wen-Jun et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(8):1040
- LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. *Nucl. Phys.*, 2001, **A687**:475
- LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, XING Yong-Zhong et al. *Phys. Lett.*, 2002, **B540**:213; LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, XING Yong-Zhong et al. *Phys. Rev.*, 2003, **C67**:024608
- Colonna M, Di Toro M et al. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:1410—1415; Di Toro M et al. *Nucl. Phys.*, 2001, **A681**:426c
- Baran V, Colonna M, Di Toro M et al. *Nucl. Phys.*, 2002, **A703**:603
- LI B A. *Phys. Rev.*, 2001, **C64**:054640
- Bertsch G F, Gupta S D. *Phys. Rep.*, 1988, **160**:1991
- Aichelin J et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**:1926
- Aichelin J et al. *Phys. Rev.*, 1988, **C37**:2451
- SONG H Q et al. *J. Phys.*, 1990, **G16**:1861; SONG H Q et al. *Chin. Phys. Lett.*, 1989, **7**:117

Isospin Effects in the Isospin Fractionation Process in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions*

XING Yong-Zhong^{1,3,1)} LIU Jian-Ye^{1,2,3} GUO Wen-Jun²

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

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

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

Abstract Based on the isospin dependent quantum molecular dynamics model we investigated the isospin effects of isospin fractionation $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$ from the neutron-proton ratio of colliding system and impact parameter. Here $(N/Z)_{\text{gas}}$ and $(N/Z)_{\text{liq}}$ is the neutron-proton ratio of nucleon emission for gas phase and that of fragment emission for liquid phase, respectively. Our results show that the $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$ increases with the neutron-proton ratio of colliding systems when the system mass, incident energy and impact parameters are fixed. For the neutron-rich systems, the $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$ depends sensitively to the form of symmetry potential and weakly on the isospin effect of the in-medium nucleon-nucleon cross section; For the neutron-poor colliding system, however, the $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$ is not sensitive to both the form of symmetry potential and the isospin effect of the in-medium nucleon-nucleon cross section. We also found that the dependence of $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$ on the impact parameter is not obvious. Detailed discussion and explanation for leading to these results are presented in the paper. According to these results, we propose that $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$ can be directly compared with the experimental data to get the information about symmetry potential.

Key words intermediate energy heavy ion collision, isospin fractionation, isospin effect

Received 10 July 2003

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077400), 100-Person Project of the Chinese Academy of Sciences, Natural Science Foundation of China (10175080, 10004012, 10175082) and The CAS Knowledge Innovation Project (KJCX2-SW-N02)

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