

中能重离子碰撞中的同位旋分馏过程^{*}

郭文军^{1,2;1)} 刘建业^{1,2} 邢永忠^{2,3} 左维^{1,2} 李希国^{1,2}

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 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3 (天水师范学院近代物理理论研究所 天水 741000)

摘要 利用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中同位旋分馏过程. 研究表明自由粒子中质比与碎片中质比的比值即同位旋分馏强度灵敏地依赖于对称势, 而对同位旋相关核子-核子碰撞截面的依赖很弱. 同位旋分馏对对称势的灵敏主要来自于气相部分, 而液相部分对对称势不够灵敏. 气相部分灵敏地依赖于对称势是直接造成同位旋分馏强度对对称势灵敏的主要原因. 同时还讨论了各种液相部分的取法, 其结果表明不同取法对以上结论的影响不大. 因此理论结果与实验数据可以直接比较从而提取对称势的知识. 并对引发同位旋分馏的动力学的起因进行了分析和讨论.

关键词 同位旋分馏 对称势 化学势

1 引言

同位旋分馏就是在同位旋非对称体系中的核反应产物气相部分的中子-质子比和液相部分的中子-质子比在原子核碰撞系统膨胀过程中的不等分配^[1,2]. 因为同位旋分馏对核反应机制和天体演化过程有着重要的影响, 所以研究同位旋分馏对对称势和同位旋相关核子-核子截面等的依赖关系是一项很有意义的工作. Bao-An Li 等人提出了同位旋分馏强度是提取对称势的探针. 但是在研究中利用 IBUU 模型将密度小于 $1/8\rho_0$ 的反应产物定义为气相部分, 将密度大于 $1/8\rho_0$ 的产物定义为液相部分, 因为 IBUU 不能计算碎片形成, 这样做只能给出定性的划分, 在实验上很难将气相部分和液相部分进行直接比较. Bao-An Li 等人没有指出同位旋相关截面对同位旋分馏有什么影响. V. Baran 等近来对同位旋分馏动力学进行仔细研究, 得到了一些有趣的

结果. 但他们仍然没有提出可直接与实验比较的物理观测量^[3]. 徐珊瑚^[2]等在实验上证实了同位旋分馏的存在, 但他们在分析实验结果中为了与实验比较作了一些假定, 故带来一定的不确定性. 因此在理论上提出可直接与实验定量比较的物理观测量就显得重要了. 我们利用同位旋相关量子分子动力学 (IQMD) 定量计算了可直接与实验比较的同位旋分馏强度 $(N/Z)_{gas}/(N/Z)_{liq}$. 研究表明同位旋分馏强度灵敏地依赖于对称势, 而与同位旋相关的核子-核子碰撞截面的关系不大. 由于同位旋分馏的气相部分灵敏地依赖于对称势的形式, 而液相部分相对于气相部分对对称势的形式不够灵敏, 所以同位旋分馏对对称势的灵敏主要来自于其气相部分. 这样就可以通过直接与实验数据比较来提取对称势形式的知识. 最后讨论了各种液相部分的取法, 即选取不同的碎片当作液相, 结果表明对不同的碎片取法液相部分对对称势的依赖不明显.

2002-11-18 收稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 (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 (KJ951-SW-N02) 资助

1) E-mail: wjguo@ns.lzb.ac.cn

2 理论模型

描述中能重离子碰撞反应动力学的 QMD 模型^[4]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. 为了描述同位旋效应, QMD 模型应该进行修改: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. 参加反应的两个核的基态也应该包含同位旋效应. 在我们的 IQMD 模型^[5-10]中,相互作用势为

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

这里 U^{Sky} 是密度相关的 Skyrme 势, U^{Coul} 是库仑势; U^{Yuk} 表示有限核表面效应的 Yukawa 势, U^{Pauli} 是泡利势, U^{MDI} 是动量相关势, U^{sym} 是对称势. 本文中选取了两种对称势^[11]:

$$\begin{aligned} U_1^{\text{sym}} &= cF_1(u)\delta\tau_z, \\ U_2^{\text{sym}} &= cF_2(u)(\delta\tau_z - \delta^2/4), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\tau_z = 1$ (中子), $\tau_z = -1$ (质子), $c = 32\text{MeV}$ 是对称势的强度, $F_1(u) = u$, $F_2(u) = u^{1/2}$, $u \equiv \rho/\rho_0$ 是约化密度; δ 是相对中子过剩 $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$,

ρ, ρ_0, ρ_n 和 ρ_p 分别是核密度、饱和密度、中子密度和质子密度. U_1^{sym} 和 U_2^{sym} 对应的不可压缩系数 K_{sym} 分别为 -27MeV 和 -69MeV ,

$$K_{\text{sym}} \equiv 9\rho_0^2 \frac{\partial^2 e_{\text{sym}}}{\partial \rho^2} \Big|_{\rho=\rho_0}, \quad (3)$$

其中 $e_{\text{sym}}(\rho) = (2^{2/3} - 1) \frac{3}{5} E_F^0 [u^{2/3} - F(u)] + e_{\text{sym}}(\rho_{\text{NM}}) F(u)$, E_F^0 是正常核密度时的费米能, $e_{\text{sym}}(\rho_{\text{NM}})$ 是正常核密度时的对称能.

值得指出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-核子碰撞截面随着核密度的增加而减小. 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:

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

这里参数取 $\alpha \approx -0.2$ 时发现与集体流的实验数据符合很好, $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$ 是实验核子-核子碰撞截面^[12]. 通过修正的并合模型,将相对动量小于 $300\text{MeV}/c$ 和相对距离小于 3.5fm 的粒子判定为在同一个碎片中. 我

们使用重构模型去除了所有非物理碎片. IQMD 中主要物理思想和程序实现可参考文献[4,5,11]

3 结果与讨论

在本文的计算中,选取反应产物中的中子和质子作为气相部分,液相部分的取法有很多种,本文选取产物中电荷数在 $1 < Z < (Z_p + Z_T)/2$ 之间的碎片为液相部分,其中 Z_p 和 Z_T 分别为炮弹和靶核的带电粒子数,上限取为 $(Z_p + Z_T)/2$ 主要是为了考虑类弹和类靶的影响. 根据以上对反应产物气相和液相的划分,定义了同位旋分馏强度为反应产物中气相中质比与液相中质比的比值 $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$.

图 1 显示了反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 在 $50\text{MeV}/u$, $b = 1.0\text{fm}$ 时同位旋分馏强度随时间的演化. 图中 σ^{iso} 和 σ^{noiso} 分别是同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面,其中 σ^{iso} 表示 $\sigma_{np} > \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$, σ^{noiso} 表示 $\sigma_{np} = \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$. 可明显看出图中 4 条曲线被分成两组,两组间的间距主要是由不同的对称势引起的;而每组中的两条曲线比较接近,其差别来自于同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面. 以上说明同位旋分馏强度灵敏地依赖于对称势的形式,而弱地依赖于同位旋相关核子-核子碰撞截面影响,故可将同位旋分馏作为提取对称势的物理观测量.

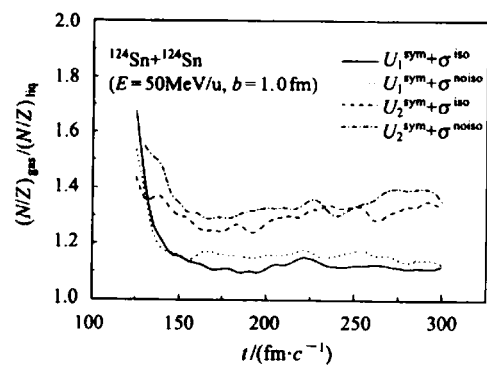


图 1 反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 在 $50\text{MeV}/u$, $b = 1.0\text{fm}$ 时同位旋分馏强度随时间的演化

同位旋分馏的起因从化学势上可以得到解释^[3],因为在化学势中对称势对中子是斥力而对质子是吸引力. 故对于自由中子和质子而言,中子会得到比自由质子更多的动能,对束缚态中子和质子而言,多于质子数的中子脱离束缚. 所以中子和质子在碰撞系统膨胀和碎裂过程中,随原子核密度的演化对不同的对称势中子和质子的迁移速率变化很

大. 从化学势梯度而言,中子和质子都是从高化学势向低化学势迁移. 同位旋分馏过程主要发生在碰撞系统膨胀过程中密度低于正常密度的区域,在低密度区中子和质子起初都向相对高密度区迁移,但到正常密度以下附近区域时,中子向低密度区(气相)迁移,而质子正好向反向高密度区(液相)迁移. 结果对于丰中子系统而言造成气相丰中子,液相缺中子,引发同位旋的分馏. 化学势中的对称势的形式有所改变就会造成同位旋分馏的很大差别,所以同位旋分馏灵敏地依赖对称势的形式.

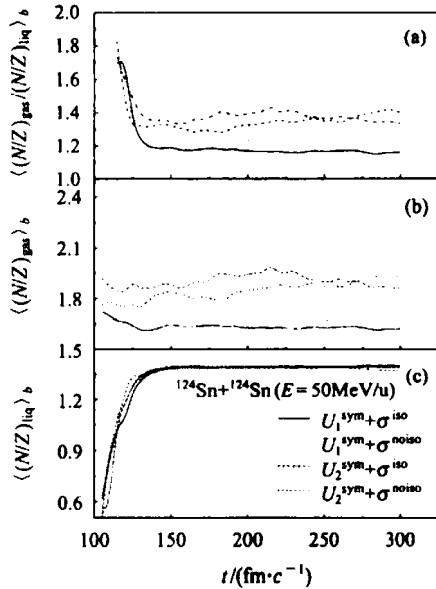


图 2 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 在 50MeV/u 在对碰撞参数平均后的同位旋分馏强度(a),气相部分(b)和液相部分(c)分别对时间的演化

实验上反应产物来自不同碰撞参数 b 的贡献. 为了与实验结果比较,图 2(a)给出与图 1 相同情况下对 b 平均后的同位旋分馏强度随时间的演化. 这里 $\langle(N/Z)_{gas}\rangle_b / \langle(N/Z)_{liq}\rangle_b$ 的值大于 1,表现出同位旋分馏过程,而且与图 1 具有相同的结论,这样可以与实验进行比较. 图 2(b,c)分别是在对 b 平均后同位旋分馏的气相部分 $\langle(N/Z)_{gas}\rangle_b$ 和液相部分 $\langle(N/Z)_{liq}\rangle_b$ 分别对时间的演化. 可以明显看出 $\langle(N/Z)_{gas}\rangle_b$ 大于系统的中子-质子比值 1.48,而 $\langle(N/Z)_{liq}\rangle_b$ 小于 1.48,表现出明显的同位旋分馏现象. 特别是同位旋分馏的气相部分灵敏地依赖于对称势的形式,而对同位旋相关的核子-核子碰撞截面的依赖不大. 液相部分相对于气相部分对对称势和同位旋相关核子-核子碰撞截面都不够灵敏,也就是说同位旋分馏强度对对称势的灵敏主要来自其气相部分.

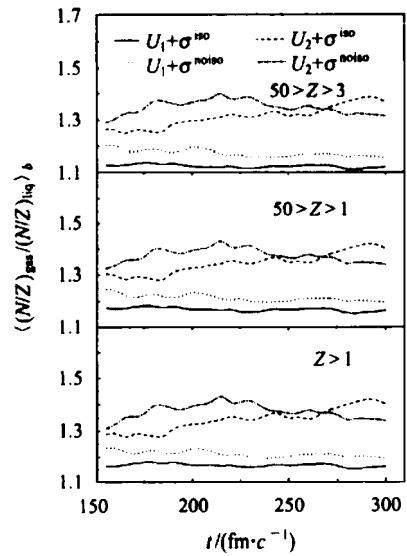


图 3 3 种不同碎片取法时同位旋分馏强度分别随时间的演化

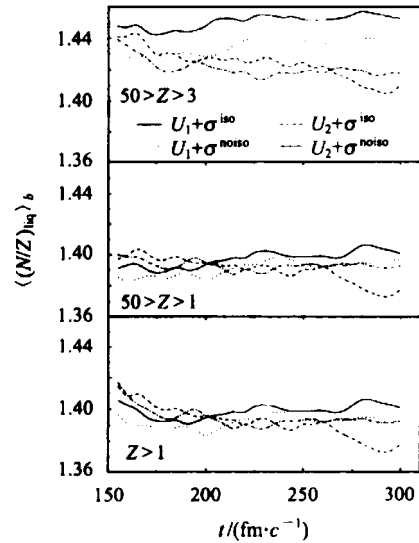


图 4 3 种不同碎片取法时同位旋分馏强度的液相部分分别随时间的演化

图 3 是与图 1 相同情况下 3 种不同碎片取法时同位旋分馏强度分别随时间的演化. 3 种液相分别为 (1) $1 < Z$:所有的碎片;(2) $1 < Z < 50$:碎片只取到类弹和类靶,以便考虑类弹和类靶的影响;(3) $3 < Z < 50$:去除轻碎片,上限仍取到类弹和类靶. 在这里按照当前气相一般定义,我们取气相都为反应产物中的中子和质子. 可以看出 3 种取法对对称势都非常灵敏,而对同位旋相关核子-核子碰撞截面不够灵敏,其原因可从图 4 得到解释. 图 4 是与图 3 相同情况下同位旋分馏的液相部分随时间的演化,可看出后两种取法的液相对对称势不灵敏,具有电荷数 $3 < Z < 50$

范围内的碎片由于丢掉了轻质量碎片而引起一些涨落,但可看到其对对称势灵敏程度远小于气相对称势的灵敏. 所以总的来说同位旋分馏强度对对称势的灵敏主要来自于其气相部分.

4 小结

综上所述,同位旋分馏强度灵敏地依赖于对称

势,而对同位旋相关核子-核子碰撞截面不灵敏,所以可将同位旋分馏强度的理论计算结果直接与实验比较作为提取对称势的灵敏探针. 研究结果还表明同位旋分馏强度的气相部分灵敏地依赖于对称势的形式,但液相部分对对称势的依赖较小. 故气相部分对对称势的灵敏直接造成同位旋分馏强度对对称势的灵敏. 研究并讨论了各种液相的取法,结果表明各种液相对对称势的依赖都较小.

参考文献 (References)

- 1 LI B A. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**:4221
- 2 V Baran, M Colonna, M Di Toro. Nucl. Phys., 2002, **A703**:603—632
- 3 Xu H S, M B Tsang, T X Liu, Phys. Rev. Lett., 2000, **85**:716
- 4 Bertsch G F, Gupta S D. Phys. Rep., 1988, **160**:1991
- 5 LIU Hang, LIU Jian-Ye. Z. Phys., 1996, **A345**:311
- 6 LIU Jian-Ye et al. Phys. Rev., Lett., 2001, **86**(6):975—978
- 7 YANG Yan-Fang et al. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**(8):1040
- 8 LIU Jian-Ye et al. Chin. Phys., Lett., 2002, **19**(8):1078
- 9 LIU Jian-Ye et al. Phys. Lett., 2002, **B540**:213
- 10 LIU Jian-Ye et al. Nucl. Phys., 2001, **A687**:475
- 11 LI B A, KO C M, W Bauer. Int. J. Mod. Phys., 1998, **E7**:147
- 12 G Alkazzov et al. Nucl. Phys., 1977, **A280**:365

Isospin Fractionation Process in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions*

GUO Wen-Jun^{1,2;1)} LIU Jian-Ye^{1,2} XING Yong-Zhong^{2,3} ZUO Wei^{1,2} LI Xi-Guo^{1,2}

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

2 (Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

3 (Institute for the Theory of Modern Physics, Tianshui Normal College, Tianshui 741000, China)

Abstract The isospin fractionation in intermediate energy heavy ion collisions is studied by using isospin dependence quantum molecular dynamics model. At first, the reaction productions in isospin fractionation process is separated into a gas phase and a liquid phase. The gas phase includes free neutrons and protons. But there are many choices for the liquid phase, we select the fragments from the region of $1 < Z < (Z_p + Z_T)/2$ as the liquid phase, here Z , Z_p and Z_T are charge of the fragment, projectile and target, respectively. For considering the influence of projectile-like and target-like, we choose the upper limit of charges to $(Z_p + Z_T)/2$. We define the degree of isospin fractionation as a ratio of gas phase neutron-proton ratio $(N/Z)_{gas}$ to liquid phase neutron-proton ratio $(N/Z)_{liq}$. The calculated results show that the degree of isospin fractionation is sensitive to the symmetry potential and insensitive to isospin dependent nucleon-nucleon cross section. This sensitivity mainly comes from the gas part of the isospin fractionation. The liquid part is insensitive to the symmetry potential. So we may compare the theory calculation results with the experimental data directly to get the knowledge of symmetry potential. The calculated results also show that the $(N/Z)_{gas}$ is larger than the $(N/Z)_{sys}$ of the colliding system but the $(N/Z)_{liq}$ is less than the $(N/Z)_{sys}$ for the neutron-rich system. Finally, the isospin fractionation process is not sensitive to the choices for the fragments of liquid phase.

Key words isospin fractionation, chemical potential, symmetry potential

References 18 November 2002

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

1) E-mail: wjguo@ns.lzb.ac.cn