

# 库仑作用对同位旋分馏过程的影响<sup>\*</sup>

郭文军<sup>1,2,3;1)</sup> 刘建业<sup>1,3,4</sup> 邢永忠<sup>1,4</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(中国科学院研究生院 北京 100039)

3(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

4(天水师范学院近代物理理论研究所 甘肃天水 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库仑作用对同位旋分馏过程的影响. 研究表明, 在所研究的能区, 无论是丰(缺)中子碰撞系统或者轻(重)反应系统, 库仑作用都使同位旋分馏过程减弱, 而这种影响主要来自于库仑作用对质子的排斥作用, 使更多的质子发射, 从而降低了气相中子-质子比所导致.

**关键词** 库仑作用 同位旋分馏 对称势

## 1 引言

库仑作用在中能重离子碰撞中会产生重要的同位旋效应, 因为它只对质子起作用. 库仑作用对质子起排斥作用, 在库仑作用影响下, 更多的束缚态质子变为自由的质子, 而对于自由质子则获得更大的动能. 这样在考虑了库仑作用后, 中能重离子碰撞中应该有更多的自由质子发射. 故它对实验上可以观测的一些同位旋相关的物理量, 如同位旋分馏强度、原子核阻止和中能重离子碰撞中的核子发射数等起到重要的作用, 然而这些是我们至今还不清楚的. 这些同位旋相关的物理量, 对于深入了解核反应中的同位旋效应, 提取同位旋相关的核物质状态方程, 以及对天体演化, 中子星的形成等都有极其重要的影响. 所以研究库仑作用对他们的影响是一项很有意义的工作.

在我们以前的工作中, 研究了对称势和同位旋相关的核子-核子碰撞截面分别对同位旋分馏强度的影响, 及其分馏机制等<sup>[1,2]</sup>. 本文主要利用同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)对同位旋分馏

中的库仑作用做一些讨论. 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<sup>[3,4]</sup>. 而库仑作用会产生重要的同位旋效应, 必然会对同位旋分馏过程产生明显的影响. 研究表明库仑使用对于同位旋分馏强度随系统质量、中质比和能量的演化都起到了极其重要的影响, 在库仑作用的影响下, 同位旋分馏强度明显降低, 也就是说库仑作用使同位旋分馏效应减弱. 在以前的文章中, 指出同位旋分馏强度对对称势灵敏, 对同位旋相关的核子-核子碰撞不灵敏, 而对对称势的灵敏主要来自于同位旋分馏的气相部分. 这里研究结果同样表明库仑作用对同位旋分馏的减弱主要来自于同位旋分馏中的气相部分.

## 2 理论模型

描述中能重离子碰撞反应动力学的 QMD 模型<sup>[5]</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. 为了描述同位旋效应, QMD

2003-11-29 收稿

\* 国家重大基础研究发展项目(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(KJCX2-SW-N02)资助

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

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<sup>[6-11]</sup>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  $U^{\text{Sky}}$  是密度相关的 Skyrme 势,  $U^{\text{Coul}}$  是库仑势;  $U^{\text{Yuk}}$  表示有限核表面效应的 Yukawa 势,  $U^{\text{Pauli}}$  是泡利势,  $U^{\text{MDI}}$  是动量相关势,  $U^{\text{sym}}$  是对称势,本文中选取了两种对称势<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned} U_1^{\text{sym}} &= 32u\delta\tau_z, \\ U_2^{\text{sym}} &= 32u^{1/2}(\delta\tau_z - \delta^2/4), \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\tau_z = 1$  (中子),  $\tau_z = -1$  (质子),  $u \equiv \rho/\rho_0$  是约化密度;  $\delta$  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  $\rho_p$  分别是核密度、饱和密度、中子密度和质子密度.密度相关的介质中核子-核子碰撞截面的公式取如下形式:

$$\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}} = \left(1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0}\right) \sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}, \quad (3)$$

这里参数取  $\alpha \approx -0.2$  时被发现与集体流的实验数据符合得很好,  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$  是实验核子-核子碰撞截面<sup>[13]</sup>. IQMD 中主要的物理思想和程序实现可参考文献<sup>[5, 6, 12]</sup>.

### 3 结果与讨论

本文选取反应产物中的中子和质子作为气相部分,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 为固定碰撞参数  $b = 2.0\text{fm}$ , 入射能量  $E = 50\text{MeV/u}$  情况下,同位旋分馏强度随系统质量的演化.3 个反应系统从轻到重分别为  $^{48}\text{Ca} + ^{48}\text{Ca}$ ,  $^{88}\text{Ke} + ^{88}\text{Ke}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ , 其系统中质比分别为 1.4, 1.44 和 1.48, 几乎相等.这样就可以去除系统中质比对同位旋分馏强度的影响,而主要表现为质量变化对同位旋分馏强度的影响.图中下面 4 条细的曲线分别对应考虑库仑作用下,不同对称势  $U_1, U_2$

和同位旋相关与无关的核子-核子碰撞截面  $\sigma^{\text{iso}}$ ,  $\sigma^{\text{noiso}}$  (其中  $\sigma^{\text{iso}}$  表示  $\sigma_{\text{np}} > \sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$ ,  $\sigma^{\text{noiso}}$  表示  $\sigma_{\text{np}} = \sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}}$ ) 引起的差异.图中上面 4 条粗的曲线是不考虑库仑作用时对应与下面 4 条曲线的情况.可以明显看出在不考虑库仑作用时,同位旋分馏强度仍强烈地依赖与对称势的形式,而对于同位旋相关的核子-核子碰撞截面较不灵敏,这与以前的结论相同<sup>[1,2]</sup>.而考虑库仑作用时同位旋分馏强度相对于不考虑库仑作用情况时,同位旋分馏强度整体下移,也就是说库仑作用削弱了同位旋分馏效应.

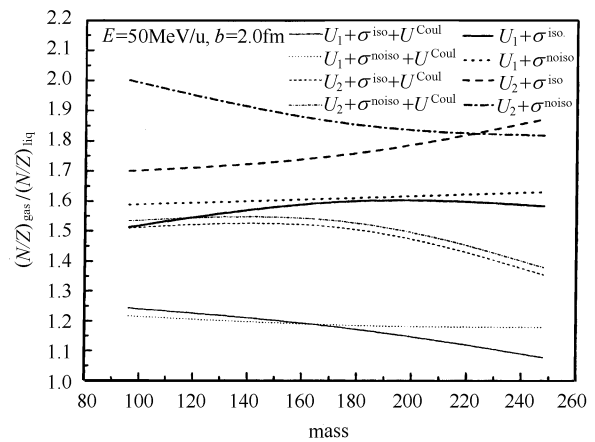


图 1 考虑(细线)与不考虑(粗线)库仑作用情况下同位旋分馏强度随质量的演化

图 2 和图 3 分别是与图 1 相同情况下同位旋分馏强度随系统中质比和系统能量的演化,图 2 中 4 个质量相同的反应系统分别为  $^{94}\text{Kr} + ^{94}\text{Kr}$ ,  $^{94}\text{Zr} + ^{94}\text{Zr}$ ,  $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$  和  $^{94}\text{Ru} + ^{94}\text{Ru}$ , 其系统中质比分别为 1.61, 1.35, 1.24 和 1.14, 包括缺中子反应系统和丰中子反应系统.这里选取系统质量相同也是为了去除质量对同位旋分馏强度的影响,突出系统中质比对同位旋分馏强度的影响.图 3 是反应系统  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  在能量区间 20MeV 到 100MeV 时的情况.由图都可以看出在考虑库仑作用下,对于不同中质比的反应系统和不同入射能量情况下库仑作用都削弱了同位旋分馏的效应.由于在低能时库仑效应比高能时强,故考虑库仑作用后的低能部分发射质子比高能时多,从而在低能时曲线更多地地下移.

以上的结论可以从图中得到解释.图 4 分别是反应系统  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  在  $E = 50\text{MeV/u}$  和  $b = 2.0\text{fm}$  情况下,同位旋分馏强度的气相  $(N/Z)_{\text{gas}}$  和液相部分  $(N/Z)_{\text{liq}}$  随时间的演化.可以看出考虑库仑作用的结果使气相的中质比降低((a)图中短线到实线之

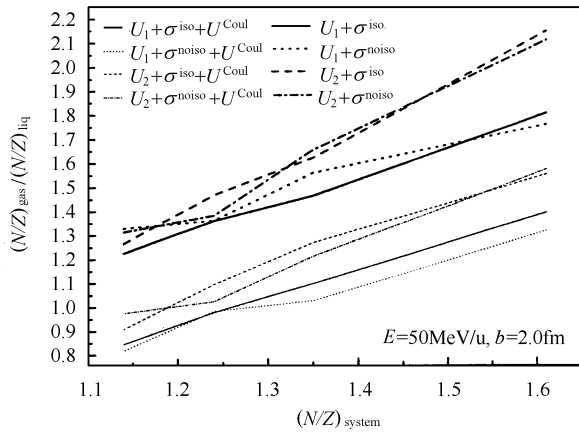


图 2 考虑(细线)与不考虑(粗线)库仑作用情况下同位旋分馏强度随系统中质比的演化

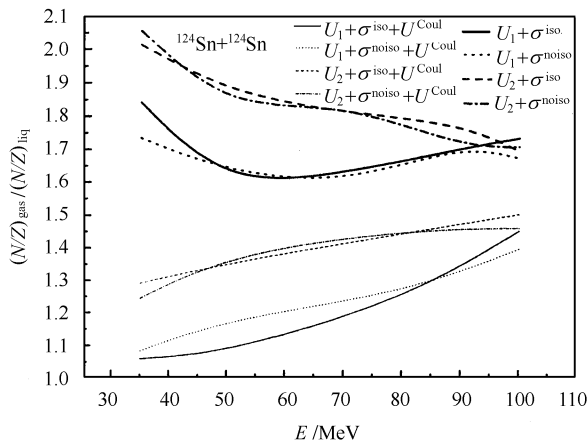


图 3 考虑(细线)与不考虑(粗线)库仑作用情况下同位旋分馏强度随系统能量的演化

间箭头所指),考虑对称势的结果使气相的中质比提高((a)图中点线到实线之间箭头所指).这主要是,因为库仑作用对质子是斥力,在库仑斥力的作用下,更多的束缚态质子变为自由质子,从而使更多的质子发射,造成气相中质比的减小.而丰中子情况下对称势对中子是斥力,对质子是引力,在对称势的作用下更多的束缚态中子变为自由中子,造成气相中质

比的增加.所以同位旋分馏的气相部分就是库仑作用与对称势的竞争结果.库仑作用与对称势作用于束缚态的碎片(即液相部分)与气相部分正好相反.由于反应过程的电荷守恒所以同位旋分馏强度中对称势降低液相部分的中质比((b)图中点线到实线之间箭头所指),而库仑作用提高了液相部分的中质比((b)图中短线到实线之间箭头所指).所以总的结果,库仑作用削弱了同位旋分馏的效应,而对称势加强了同位旋分馏效应.

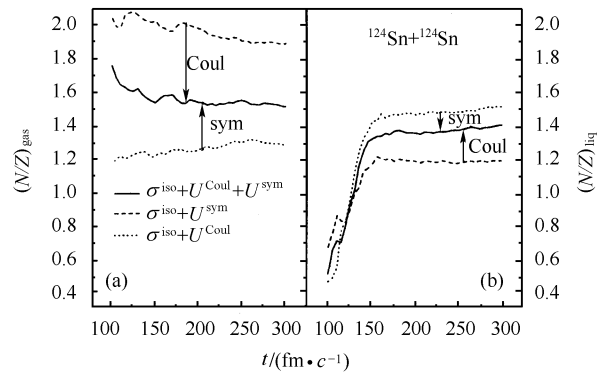


图 4 同位旋分馏强度中气相部分  $(N/Z)_{\text{gas}}$  和液相部分  $(N/Z)_{\text{liq}}$  分别对时间的演化

### 4 小结

综上所述,库仑作用对同位旋分馏强度起着明显的作用,在中低能区对于不同质量的反应系统和不同中质比的反应系统,库仑作用都削弱了同位旋分馏效应.这主要是在库仑斥力的作用下,更多的束缚态质子变为非束缚态,从而造成气相的相对缺中子和液相的相对丰中子.总的结果就是减小了同位旋分馏强度,削弱了同位旋分馏的效应.由于丰中子情况下对称势对中子是斥力,对质子是引力,在对称势的作用下造成丰中子气相和缺中子液相,所以对对称势加强了同位旋分馏的效应.总的同位旋分馏强度就是对称势和库仑作用共同竞争的结果.

## 参考文献 (References)

- 1 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, XING Yong-Zhong et al. Nucl. Phys. , 2003, **A726**:123
- 2 LIU Jian-Ye, XING Yong-Zhong, GUO Wen-Jun et al. Chin. Phys. Lett. , 2003, **20**(5):643
- 3 LI B A. Phys. Rev. Lett. , 2000, **85**:4221
- 4 Baran V, Colonna M, Toro M Di. Nucl. Phys. , 2002, **A 703**:603—632
- 5 Bertsch G F, Gupta S D. Phys. Rep. , 1988, **160**:1991—233
- 6 LIU Hang, LIU Jian-Ye. Z. Phys. , 1996. **A345**:311
- 7 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. Phys. Rev. Lett. , 2001, **86**(6):975—978
- 8 YANG Yan-Fang, LIU Jian-Ye, ZUO Wei et al. Chin. Phys. Lett. , 2001, **18**(8):1040—1043
- 9 LIU Jian-Ye, XING Yong-Zhong, GUO Wen-Jun et al. Chin. Phys. Lett. , 2002, **19**(8):1078
- 10 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, XING Yong-Zhong et al. Phys. Lett. , 2002, **B540**:213
- 11 LIU Jian-Ye et al. Nucl. Phys. , 2001, **A687**:475
- 12 LI B A, KO C M, Bauer W. Int. J. Mod. Phys. , 1998, **E7**:147
- 13 Alkazzov G et al. Nucl. Phys. , 1977, **A280**:365

Effect of Coulomb Interaction on Isospin Fractionation Process<sup>\*</sup>

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

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

2(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

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

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

**Abstract** We studied the effect of Coulomb interaction on the isospin fractionation in intermediate energy heavy ion collisions by using isospin dependence quantum molecular dynamics model (IQMD). The results show that Coulomb interaction reduces the isospin fractionation process whatever the system mass, beam energy and system neutron-proton ratio are, because Coulomb interaction is repulsive for proton. The more bound protons became free under Coulomb interaction, which produces neutron-poor gas phase and neutron-rich liquid phase, thus isospin fractionation degree is weaken. On the contrary, the symmetry potential is repulsive for neutrons and attractive for protons in neutron-rich systems. The bound neutrons more than protons became free, which produces neutron-rich gas phase and neutron-poor liquid phase, so the isospin fractionation degree increases. Total effects of the Coulomb interaction and symmetry potential make the isospin fractionation degree to be in between those induced by themselves individually.

**Key words** Coulomb interaction, isospin fractionation, symmetry potential

Received 29 November 2003

<sup>\*</sup> Supported by Major State Basic Research Development Program(G2000077400), NSFC(10175080, 10004012, 10175082) and Knowledge Innovation Project of CAS(KJCX2-SW-N02)

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