

# 中能重离子碰撞中的中子(质子) 发射的同位旋效应\*

郭文军<sup>1,2</sup> 刘建业<sup>1,2</sup> 左维<sup>1,2</sup> 邢永忠<sup>2,3</sup>  
李希国<sup>1,2</sup> 李增花<sup>2</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 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3 (天水师范学院物理系 甘肃天水 741000)

**摘要** 利用同位旋相关的量子分子动力学,对中能重离子碰撞过程中的中子和质子发射的同位旋效应进行了分析.计算结果表明在有动量相关作用条件下,在很宽的能量和碰撞参数范围内,缺中子碰撞系统的中子(质子)发射数强烈地依赖于同位旋相关的核子-核子碰撞截面,而较弱地依赖于对称势.在对丰中子碰撞系统的研究中,上述规律减弱.这样就可以通过实验上对缺中子碰撞系统的中子(质子)发射数的探测,来提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的知识.

**关键词** 中子(质子)发射 同位旋效应 对称势

## 1 引言

随着放射性束的产生和应用,同位旋非对称核物质状态方程一直是近年来国内、外研究的热点.因为同位旋非对称核物质状态方程的建立和核子-核子(NN)碰撞截面的知识不仅对于了解原子核的性质是重要的,同时对于研究宇宙和天体演化过程也是非常重要的<sup>[1,2]</sup>.这就要求从理论方面选择中能重离子碰撞过程中主要只对对称势  $U^{sym}$  或者主要只对介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面  $\sigma^{iso}$  灵敏的物理观测量作为探针来提取关于  $U^{sym}$  或者  $\sigma^{iso}$  的知识.

在我们以前的工作中<sup>[3-5]</sup>,发现在考虑动量相关作用和中、低能范围,小碰撞参数条件下,原子核阻止强烈地依赖于同位旋相关截面的影响,而较弱地依赖于对称势,而动量相关作用提高了原子核阻止对同位旋相关 NN 截面的灵敏性. Li Bao-An 等人利用微分流作为提取同位旋相关的 NN 碰撞截面的灵敏探针<sup>[6]</sup>. Li Bao-An 和我们的工作还

2001-12-13 收稿

\* 国家重大基础研究发展规划(G2000077400),中国科学院百人计划经费,国家自然科学基金(10175080,10004012)和中国科学院知识创新工程重大项目(KJ92-SW-N02)资助

表明,中能重离子碰撞前平衡发射中子-质子比灵敏地依赖于对称势,而对介质中同位旋相关 NN 截面很不灵敏,故前平衡发射中子-质子比是提取重离子碰撞过程中对称势的灵敏探针<sup>[7-9]</sup>. 近来我们研究发现,中能重离子碰撞过程中缺中子系统的中子(质子)发射数也强烈地依赖于同位旋相关 NN 截面,而较弱地依赖于对称势. 与前面工作不同的是它的适用范围更广,中子发射在 100—400MeV/u 的广大能区和从  $b = 0-8\text{fm}$  的大的碰撞范围内具有以上性质,动量相关作用在这里起到了提高粒子发射数对于 NN 碰撞截面同位旋效应的灵敏性的作用.

在这里重要的一点是在实验中中子、质子可以直接探测,这就为通过理论和实验比较来直接提取介质中同位旋相关 NN 截面提供了条件. 所以我们建议将中能重离子碰撞中的中子(质子)发射数作为提取同位旋相关 NN 截面的探针.

## 2 理论模型

在计算过程中使用了同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)<sup>[2,3]</sup>,该模型是将近年来用于研究重离子碰撞的量子分子动力学模型(QMD)<sup>[9,10]</sup>仔细考虑和包括了与同位旋有关的动力学因素后建立的,即(1)考虑了同位旋相关的平均场——对称势;(2)考虑了  $\sigma_{np}/\sigma_{nn}$  的不同比值;(3)考虑了 Pauli 原理中的同位旋效应. IQMD 模型选取的相互作用势如下:

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

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,  $U^{\text{Pauli}}$  是泡里势,  $U^{\text{MDI}}$  是动量相关势,  $U^{\text{sym}}$  是对称势,以上各种势具体表达形式见文献 [9—13].

在目前的计算中,选用了两种不同的对称势<sup>[14]</sup>.

$$U_1^{\text{sym}} = 32 F_1(u) \delta\tau_z, \quad (2)$$

$$U_2^{\text{sym}} = 32 F_2(u) (\delta\tau_z + \delta^2/2), \quad (3)$$

其中  $F_1(u) = u$ ,  $F_2(u) = u^2$ ,  $u \equiv \rho/\rho_0$ ; 对中子  $\tau_z = 1$ , 对质子  $\tau_z = -1$ ; 对称势的强度为 0 时即不考虑对称势  $U_0^{\text{sym}}$ . 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. 在计算中,核的密度分布由参数化的 Skyrme-Hartree-Fock 模型给出<sup>[14]</sup>. 介质中核子-核子碰撞截面使用经验公式(4). 这是近年来通过对中能重离子碰撞集体流研究的结果<sup>[15]</sup>:

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

这里  $\sigma^{\text{free}}$  是实验上自由核子-核子碰撞截面,  $\gamma = -0.2$ . 可以看出介质效应使核子-核子碰撞截面变小<sup>[16,17]</sup>.

## 3 计算结果与讨论

考虑到问题的普遍性,在计算过程中选取了对称系统和非对称系统、缺中子系统和丰

中子系统. 对能量和碰撞参数的选取也尽可能达到最大的范围, 这样有利于同实验进行比较, 从理论和实验的比较来验证结论. 我们在各种碰撞过程中系统地研究了中子(质子)发射数对于对称势, 同位旋相关截面, 动量相关势的依赖关系及其机理进行了详细的分析.

图 1 是在动量相关条件下 4 个碰撞系统( $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ ,  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ , 这 4 个碰撞系统的中质比分别为 1.07, 1.11, 1.42 和 1.53, 所以前两者为缺中子系统, 后两种为丰中子系统)在  $E = 150\text{MeV/u}$ ,  $b = 4\text{fm}$  和 5 种情况下中子(质子)发射数随时间的演化. 图中  $\sigma^{\text{iso}}$  和  $\sigma^{\text{noiso}}$  分别表示考虑和不考虑同位旋相关的 NN 截面. 其中每幅图中上面的 3 条线是考虑同位旋相关 NN 截面和不同对称势( $U_0^{\text{sym}}$ ,  $U_1^{\text{sym}}$  和  $U_2^{\text{sym}}$ )的中子(质子)发射数, 下面的两条线是不考虑同位旋相关 NN 截面和选取不同对称势( $U_1^{\text{sym}}$  和  $U_2^{\text{sym}}$ )的中子(质子)发射数. 可以明显看出在缺中子系统( $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ ,  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ )碰撞过程中, 两组曲线之间有大的间隙, 而每组曲线中不同曲线之间相距较近, 这表明中子(质子)发射数强烈地依赖于同位旋相关截面的同位旋效应, 而较弱地依赖于对称势的作用, 可以看到, 对于丰中子碰撞系统( $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ )上述现象减弱. 这是因为在碰撞系统质量相同的情况下, 缺中子碰撞系统的中子数和质子数比较接近, 这就造成了碰撞过程中具有更多的中子-质子碰撞数, 而在  $500\text{MeV/u}$  条件下中子-质子碰撞截面是中子-中子(质子-质子)碰撞截面的 3 倍<sup>[18]</sup>, 所以造成相同质量情况时缺中子系统碰撞具有更大的平均核子-核子碰撞截面, 换句话说就是同位旋相关的 NN 碰撞截面对缺中子碰撞系统具有更大的影响, 这就造成缺中子碰撞系统相对于丰中子碰撞系统对同位旋相关的 NN 碰撞截面的同位旋效应更为灵敏.

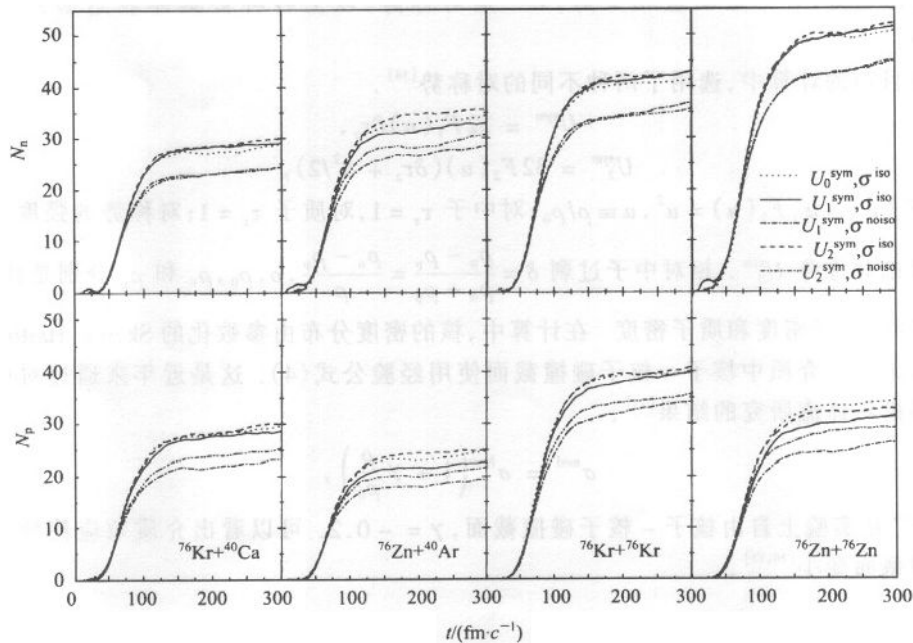


图 1  $E = 150\text{ MeV/u}$ ,  $b = 4\text{ fm}$  和 MDI 条件下 4 个碰撞系统在 5 种情况下中子(质子)发射数随时间的演化

图 2 是碰撞系统  $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ , 在  $150\text{MeV/u}$  和不同碰撞参数 ( $b = 0, 2, 4, 6, 8\text{fm}$ ) 时, 中子(质子)发射数随时间的演化, 从图中可以看出对于中子发射(图 2 上图)在  $b = 0, 2, 4, 6\text{fm}$  时, 中子发射数随时间的演化具有和图 1 相同的特征, 即在中小碰撞参数条件下中子发射强烈地依赖于 NN 碰撞截面的同位旋效应, 而较弱地依赖于对称势的变化. 在较大碰撞参数情况下这种现象逐渐消失. 这是因为随着碰撞参数继续增大, 反应的激烈程度也随之减小, 这时碰撞过程中的中子-质子, 中子-中子和质子-质子之间的碰撞也大幅度减少, 使同位旋相关截面对总的中子(质子)发射影响减弱. 在图中还可以看到对于所有碰撞参数中,  $b = 4\text{fm}$  时同位旋相关截面造成的影响最大, 这是因为在中等碰撞参数时反应过程中的多重碎裂最大<sup>[19]</sup>. 因为这个原因, 在其他图中选取碰撞参数  $b = 4\text{fm}$  作为事例. 图 2 下图是不同碰撞参数时质子的发射数随时间的演化, 与中子发射不同, 在碰撞参数较小时同位旋相关 NN 截面和对称势都对质子的发射起很大的作用. 因为对称势对质子为吸引, 对中子为排斥, 而质子发射在小碰撞参数时库仑排斥作用很强, 这样库仑作用与对称势的竞争导致不同对称势对质子发射的影响增强, 而在中等碰撞参数时, 对称势的影响逐渐减弱, 表现出对同位旋相关截面灵敏的特性.

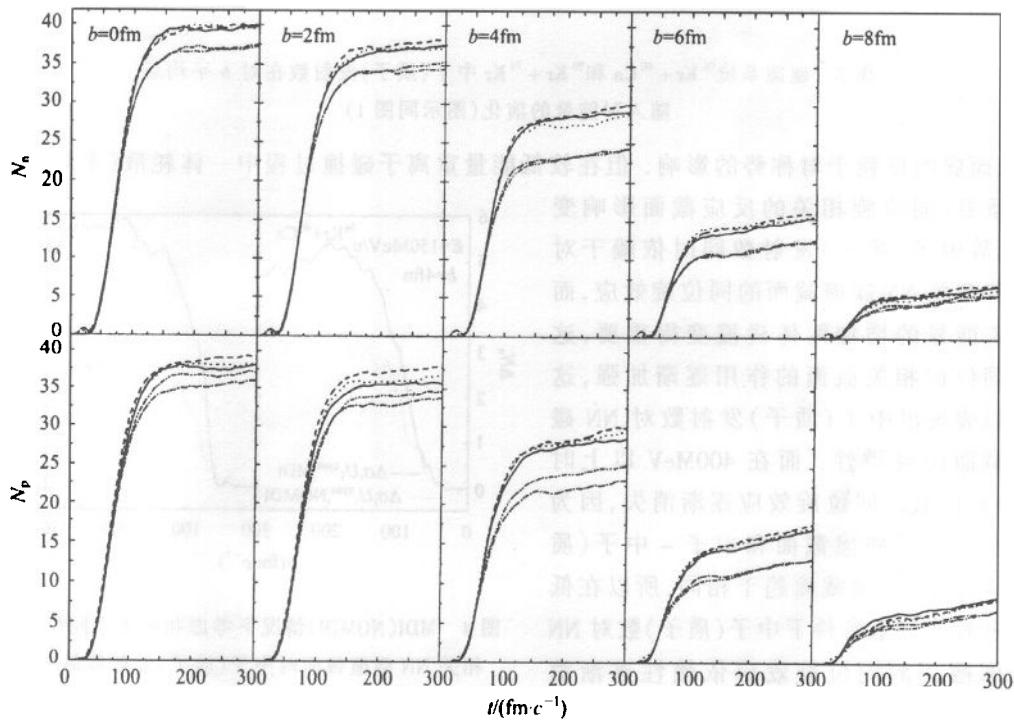


图 2 碰撞系统  $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$  在  $150\text{MeV/u}$  和  $b = 0, 2, 4, 6, 8\text{fm}$  时, 中子(质子)发射数随时间的演化(图示同图 1)

图 3 是两个碰撞系统  $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  中子(质子)发射数对碰撞参数  $b$  的平均值, 随入射能量的演化(每点发射数取平衡后即  $t = 200\text{fm}/c$  的值), 可以看到在  $100\text{--}400\text{MeV}$  的宽广能区内, 中子(质子)发射数都表现出强烈的依赖于 NN 碰撞截面同位旋效

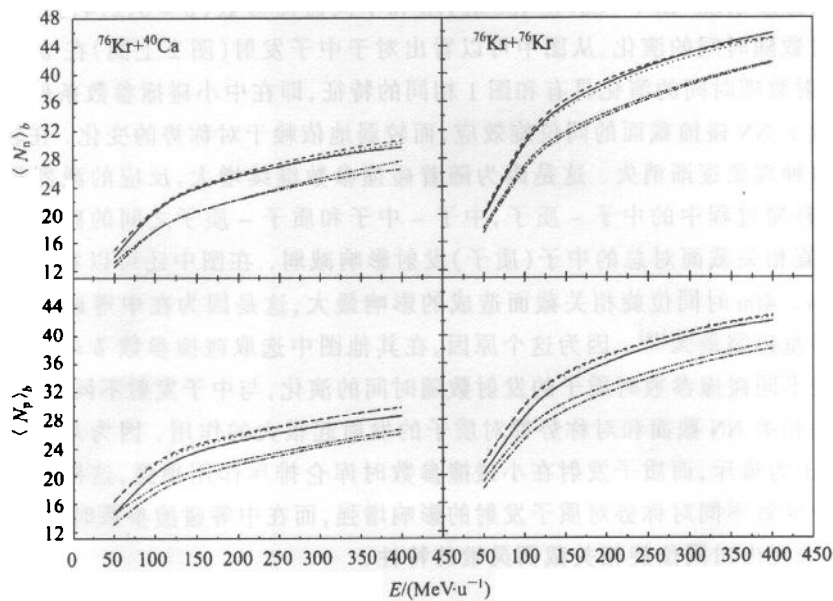


图 3 碰撞系统  $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  中子(质子)发射数在对  $b$  平均后随入射能量的演化(图示同图 1)

应,而弱的依赖于对称势的影响.但在较低能量重离子碰撞过程中,一体耗散(平均场)变得重要,同位旋相关的反应截面影响变小,故中子(质子)发射数同时依赖于对称势和核 NN 碰撞截面的同位旋效应,而随着能量的增加两体碰撞变得重要,这时同位旋相关截面的作用逐渐加强,这可以表现出中子(质子)发射数对 NN 碰撞截面的灵敏性.而在 400MeV 以上时 NN 碰撞截面同位旋效应逐渐消失,因为中子-质子碰撞截面和中子-中子(质子-质子)碰撞截面趋于相同,所以在低能和较高能量条件下中子(质子)数对 NN 碰撞截面的同位旋效应依赖性逐渐消失.

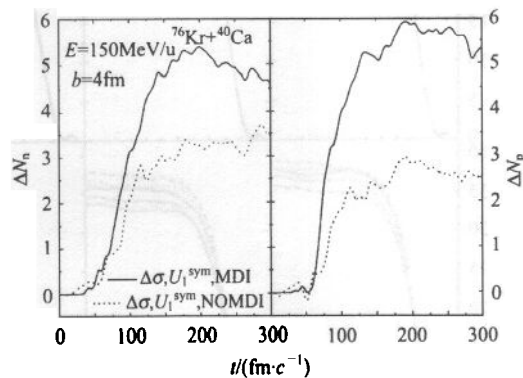


图 4 MDI(NOMDI)情况下考虑和不考虑同位旋相关 NN 碰撞截面时中子(质子)发射数的差值随时间的演化

研究还发现动量相关作用对于质子和中子发射产生重要影响,故分别对有动量相关作用(MDI)和无动量相关作用(NOMDI)两种条件的中子和质子结果进行了对比分析.图 4 是 MDI(NOMDI)情况下考虑和不考虑同位旋相关 NN 碰撞截面时中子(质子)发射数的差值随时间的演化.左图是中子发射数之差,右图是质子发射数之差,其中

$$\Delta N_n(\Delta\sigma, U_1^{\text{sym}}, \text{MDI}) = N_n(\sigma^{160}, U_1^{\text{sym}}, \text{MDI}) - N_n(\sigma^{\text{noiso}}, U_1^{\text{sym}}, \text{MDI}),$$

$$\Delta N_p(\Delta\sigma, U_1^{\text{sym}}, \text{NOMDI}) = N_p(\sigma^{160}, U_1^{\text{sym}}, \text{NOMDI}) - N_p(\sigma^{\text{noiso}}, U_1^{\text{sym}}, \text{NOMDI}),$$

$$\Delta N_p(\Delta\sigma, U_1^{sym}, MDI) = N_p(\sigma^{iso}, U_1^{sym}, MDI) - N_p(\sigma^{noiso}, U_1^{sym}, MDI),$$

$$\Delta N_p(\Delta\sigma, U_1^{sym}, NOMDI) = N_p(\sigma^{iso}, U_1^{sym}, NOMDI) - N_p(\sigma^{noiso}, U_1^{sym}, NOMDI),$$

可以明显地看出在考虑了 MDI 以后中子(质子)发射数对同位旋相关截面的差值都显著提高,也就是说 MDI 提高了中子(质子)发射数对 NN 碰撞截面同位旋效应的灵敏性. 这是由于在中能重离子碰撞动力学过程中 MDI 增大了纵向动量向其他方向的耗散过程,而在所研究的能区 n-p 碰撞截面远大于 n-n(p-p)碰撞截面(NN 碰撞的同位旋效应),从而加速了 NN 碰撞中的动量转移,促进了中子和质子的发射,提高了中子(质子)发射数对 NN 碰撞截面同位旋效应的灵敏性.

## 4 小结

本文利用 IQMD 理论系统研究了中能重离子碰撞过程中的中子(质子)的发射. 结果发现在很宽的能区和很大的碰撞范围内,缺中子碰撞系统中子(质子)发射强烈地依赖于同位旋相关 NN 碰撞截面,而较弱地依赖于对称势的强度和形式. 这里 MDI 起到了加强同位旋相关碰撞截面对中子(质子)发射的灵敏性的作用. 对于丰中子碰撞系统,上述规律减弱. 这样就可以将考虑了 MDI 的缺中子碰撞系统中子(质子)发射数做为提取核物质状态方程中核子-核子碰撞截面.

## 参考文献 (References)

- 1 LI B A, Ko C M et al. *Inter. Jour. Mod. Phys.*, 1998, **E7**(2):147
- 2 LI B A, Schroder W U. *Isospin Physics in Heavy-ion Collision at Intermediate Energies*, New York: Nova Science Publishers, Inc., 2001
- 3 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**:975
- 4 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, XING Yong-Zhong et al. *Phys. Rev. C.*, (to be submit)
- 5 LIU Jian-Ye, CHEN Bo, ZHAO Qiang et al. *Nuclear Physics Review*, 1999, **16**(3):165 (in Chinese)  
(刘建业, 陈波, 赵强. 原子核物理评论, 1999, **16**(3):165)
- 6 LI B A. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**:4221
- 7 LIU Jian-Ye, YANG Yan-Fang, ZUO Wei et al. *Phys. Rev.*, 2001, **C63**:0546123
- 8 LIU Jian-Ye, ZHAO Qiang, WANG Shun-Jin et al. *Nucl. Phys.*, 2001, **A687**:475
- 9 Aichelin J, Peilert G, Bohnet A et al. *Phys. Rev.*, 1988, **C37**:2451
- 10 Peilert G, Stocher H, Greiner W. *Phys. Rev.*, 1989, **C39**:1402
- 11 LIU Hang, LIU Jian-Ye. *Z. Phys.*, 1996, **A345**:311
- 12 Dorso C, Duarte S, Randrup J. *Phys. Lett.*, 1987, **B188**:287
- 13 Aichelin J, Rosenhauer A, Peilert G et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**:1926
- 14 Reinhard P G. In: *Computational Nuclear Physics I*, edited by Langanke K, Maruhn J A, Koonin S E. Germany: Springer-Verlag, 1991, 28—50
- 15 Klakow D, Welke G, Bauer W. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**:1982
- 16 HUANG M J et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**:3739
- 17 Westfall G D et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**:1986
- 18 Alkhozov G et al. *Nucl. Phys.*, 1977, **A280**:365
- 19 CHEN L W, GE L X, ZHANG F S. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1997, **21**:1018 (in Chinese)  
(陈列文, 葛凌霄, 张丰收. 高能物理与核物理, 1997, **21**:1018)

## Isospin Effect of Neutron (Proton) Emission Number in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions \*

GUO Wen-Jun<sup>1,2</sup> LIU Jian-Ye<sup>1,2</sup> ZUO Wei<sup>1,2</sup> XING Yong-Zhong<sup>2,3</sup>  
LI Xi-Guo<sup>1,2</sup> LI Zeng-Hua<sup>2</sup>

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

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

3 (Department of Physics, Tianshui Normal College, Gansu Tianshui 741000, China)

**Abstract** Effects of the symmetry potential  $U^{sym}$  and the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section  $N_n(N_p)$  on the number of neutron (proton) emitted as well as their dependence on the momentum dependent interaction (MDI) are studied within an isospin dependent Quantum Molecular Dynamics (IQMD) model. The isospin dependence nucleon-nucleon cross section is found to have a much stronger influence on the  $N_n(N_p)$  especially for the neutron-deficient collision system with MDI in the energy region from about 100 to 400 MeV/nucleon. The calculation results are clear to show that the number of neutron (proton) emitted during reaction in the neutron-deficient system, depends sensitively on the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section and weakly on the symmetry potential with MDI. In this case one can make use of the number of neutron (proton) emitted as a probe to extract simultaneously both the magnitude and the in-medium nucleon-nucleon cross section.

**Key words** neutron (proton) emission, isospin effect, symmetry potential

---

Received 13 December 2001

\* Supported by Major State Research Development Project in China under Contract (G2000077400), 100 Talents Programme of The Chinese Academy of Sciences, National Natural Foundation of China (10175080, 10004012) and Knowledge Innovation Project of CAS (KJ92-SW-N02)