

多重碎裂的同位旋效应和动量相关作用的影响*

邢永忠^{1,2,3} 刘建业^{1,2} 郭文军² 左维^{1,2} 邱玉芳⁴
李希国^{1,2} 李增花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 (天水师范学院物理系 甘肃天水 741000)

4 (中国科学院兰州分院 兰州 730000)

摘要 利用同位旋相关的量子分子动力学模型,对中能重离子碰撞过程中多重碎裂对于同位旋自由度和动量相关作用的依赖性进行了研究.结果表明:在相对较高能区,碎片的平均多重性敏感地依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋效应,但很弱地依赖于对称势;动量相关作用增强了中等质量碎片多重性对于核子-核子碰撞截面的同位旋依赖的敏感性.中等质量碎片的平均多重性可用作提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的探针.

关键词 多重碎裂 同位旋效应 动量相关作用

1 引言

随着放射性束流的产生和应用,人们通过重离子碰撞对核物质的同位旋效应进行了广泛地研究,形成了同位旋相关的物理学——同位旋物理^[1,2],建立起了各种同位旋相关的重离子反应动力学模型^[2].然而,由于我们对在这一动力学过程中起着重要作用的同位旋相关的平均场和介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的机理和确切形式并不完全清楚.因此,物理学家们正在寻找可以用来提取这方面信息的实验观察量,即所谓的探针^[3].前不久, Li Bao-an^[4]等研究指出,中能重离子碰撞中的质子-中子微分流可作为一个探针来研究同位旋相关的核物质状态方程;刘建业等人系统地研究指出:原子核阻止灵敏地依赖于同位旋相关的核子-核子碰撞截面,而对于对称势很不灵敏.原子核阻止可以作为提取同位旋相关的核子-核子碰撞截面的一个探针^[5,6]. Li Bao-an 和刘建业等人研究还发现,中能

重离子碰撞前平衡发射的中子-质子比在直到 150MeV/u 的能区,是提取同位旋相关的平均场-对称势的一个探针^[1,7].本文中,我们利用同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)系统地研究中高能重离子碰撞过程中多重碎裂的同位旋效应和动量相关作用对于多重碎裂的影响.

2 模型简介

IQMD 模型^[2]是在近年来用于研究重离子碰撞的量子分子动力学 QMD 模型的基础上,仔细地考虑了同位旋有关的动力学因素后建立的.模型的相互作用势为^[2,8,9]:

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

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^[9]; U^{Pauli} 是泡里势. U^{MDI} 和 U^{sym} 分别为动量相关作用和对称势.

2002-03-06 收稿

* 国家重点基础研究发展规划(G2000077407),中国科学院百人计划,国家自然科学基金(10175080,10004012)和中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJXC2-SW-N02)资助

其具体形式分别如下:

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

$$U^{\text{Coul}} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{|r_1 - r_2|}; \quad (3)$$

$$U^{\text{Yuk}} = t_3 \exp\left(\frac{|r_1 - r_2|}{m}\right) / \frac{|r_1 - r_2|}{m}; \quad (4)$$

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \frac{\rho}{\rho_0}; \quad (5)$$

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left(\frac{\hbar}{q_0 \rho_0} \right)^3 \exp\left(-\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2}{2\rho_0^2}\right) \delta_{p_i p_j}, \quad (6)$$

$\delta_{p_i p_j} = 1$, 对中子-中子(或质子-质子); $\delta_{p_i p_j} = 0$, 对中子-质子(或质子-中子), 对称势 U^{sym} 采用以下形式:

$$U_1 = cF_1(u)\delta\tau_z, \quad (7)$$

$$U_2 = cF_2(u)\left(\delta\tau_z + \frac{1}{2}\delta^2\right), \quad (8)$$

这里 $F_1(u) = u$, $F_2(u) = u^2$, $u \equiv \rho/\rho_0$; τ_z 是核子同位旋的第三分量, 其值对于质子为 -1 , 对中子为 $+1$. 我们取对称势的强度为 $c = 32\text{MeV}$ 或 0 , 后者

表示不考虑对称势(在图中用 U_0 标志). $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$ 为相对中子过剩, 其中的 ρ, ρ_0, ρ_n 和 ρ_p 分别表示核密度、饱和核密度、中子和质子分布的密度.

在本文计算中, 我们选用文献[10]所给出的自由核子的碰撞截面公式 σ^{free} , 大约在 $400\text{MeV}/u$ 以下的能区, n-p 碰撞截面一般约为 p-p 或 n-n 的碰撞截面的 3 倍. 考虑介质对于核子-核子碰撞截面的影响, 其截面表达式为^[11]

$$\sigma = \sigma^{\text{free}} \left(1 - 0.2 \frac{\rho}{\rho_0} \right). \quad (9)$$

因此, 介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面为 $\sigma_{np} \neq \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$, 文中以符号 σ^{iso} 表示; 同位旋无关的核子-核子碰撞截面为 $\sigma_{np} = \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$, 以符号 σ^{noiso} 表示.

在 IQMD 的初始化中, 利用具有参数 SKM* 的 Skyme-Hartree-Fock^[12] 计算方法, 分别得到靶核和弹核基态中子与质子的密度分布, 然后通过蒙特卡洛方法随机抽样得到与实验相符合的靶核和弹核的基态性质, 例如结合能、均方半径等, 并确定出各种势参数(如表 1 所示).

表 1 所选用的相互作用势参数

	α/MeV	β/MeV	γ	t_3/MeV	m/fm	t_4/MeV	t_5/MeV^{-2}	V_p/MeV	$\rho_0/(\text{MeV} \cdot \text{c}^{-3})$	q_0/fm
MDI	-390.1	320.3	1.14	7.5	0.8	1.57	5×10^{-4}	30	400	5.64
NOMDI	-356	303	1.16667	7.5	0.8	0	5×10^{-4}	30	400	5.64

MDI 和 NOMDI 分别表示考虑和不考虑动量相关作用的情形.

3 计算结果与讨论

计算中对于重系统和重碰撞系统中的中等质量碎片的电荷数分别选为 $3 \leq Z \leq 13$ 和 $3 \leq Z \leq 8$. 图 1 给出了 4 个碰撞系统在 5 种情况下多重碎裂 N_{mid} 随时间的演化. 从图中可以看到: 大约在时间大于 $150\text{fm}/c$ 之后, 5 条曲线明显地分成了两组, 两组曲线之间大的间隙是由于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋效应引起的, 每一组内的各条曲线之间相距很近, 表明了 N_{mid} 对于对称势并不敏感. 这一特征对于缺中子碰撞系统表现得尤为明显.

图 2 是对称系统 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ 和非对称碰撞系统 $^{112}\text{Sn} + ^{40}\text{Ca}$ 中 N_{mid} 对于碰撞参数 b 的平均值 $\langle N_{\text{mid}} \rangle_b$ 随入射能量 E 的变化. 图中, 每一条曲线代表不同

的对称势与碰撞截面的不同组合, 带有实心符号的一组曲线对应于同位旋有关的核子-核子碰撞截面的计算结果, 而下面一组带有空心符号的曲线是同位旋无关的核子-核子碰撞截面的计算结果. 这两组曲线之间大的间隙是由于核子-核子碰撞截面的同位旋效应所造成的. 每一组内不同曲线之间的间隙很小, 这表明 $\langle N_{\text{mid}} \rangle_b$ 对于不同的对称势很不灵敏.

为了明确 N_{mid} 对于碰撞参数的依赖关系, 图 3 绘出了 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ 和 $^{112}\text{Sn} + ^{40}\text{Ca}$ 两个碰撞系统在确定的入射能量 E 下, N_{mid} 达到稳定之后(图中取 $t = 200\text{fm}/c$ 时的值), N_{mid} 随碰撞参数 b 的变化关系. 从图中可以看出: 对称系统在 $b = 4\text{fm}$ 左右, 而非对称系统在 $b = 0.0$ 附近, 由核子-核子碰撞截面的同位旋效应所引起的间隙达到最大. 但对碰撞参数平均

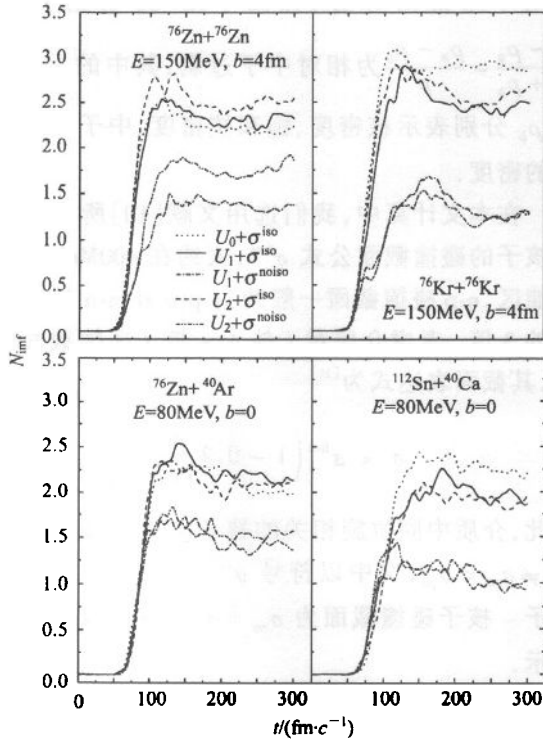


图 1 不同碰撞系统中 N_{inf} 随时间的演化

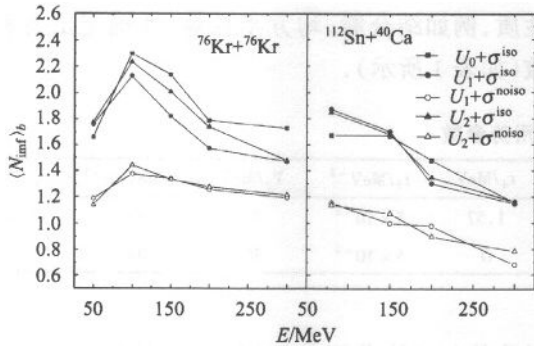


图 2 中等质量碎片的多重性对于碰撞参数的平均值 $\langle N_{inf} \rangle_b$ 随入射能量的变化

后的 $\langle N_{inf} \rangle_b$ 仍然明显地具有图 2 所表现出的特征. 为了检验这一特征的普遍性, 我们对于其他对称和非对称的碰撞系统进行了类似的研究, 同样得到 $\langle N_{inf} \rangle_b$ 强烈地依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋效应, 而对于不同的对称势很不灵敏的结论, 因此我们建议在中能重离子碰撞中可将中等质量碎片的多重性作为提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的探针. 这里需要指出, 具有以上特征的能量区间对于不同的碰撞系统(不同的质量、不同的中子-质子比和不同的质量非对称性)有所不同, 在与具体系统的实验结果进行比较之前, 应先从理论上确定出具有这一特征的能区.

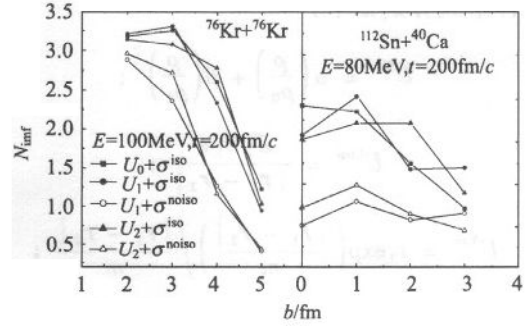


图 3 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ 和 $^{112}\text{Sn} + ^{40}\text{Ca}$ 碰撞系统在 $t = 200\text{fm}/c$ 时, N_{inf} 随碰撞参数 b 的变化

众所周知, 原子核系统中核子之间的非定域性相互作用导致了具有排斥性的动量相关作用. 它对于中能重离子碰撞过程中的各种可观测量所表现出的影响是目前人们正在研究的热门课题之一^[13]. 显然, 在考虑了系统的同位旋自由度之后, 动量相关作用对于中能重离子碰撞的影响如何, 是一个更值得研究的问题. 我们利用 IQMD 模型, 就上述所计算的几个碰撞系统中, 对中等质量碎片的平均多重性 N_{inf} 对于动量相关作用的依赖性进行了研究. 图 4 给出了 $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ 和 $^{112}\text{Sn} + ^{40}\text{Ca}$ 两个碰撞系统在选取对称势 U_1 , 分别在有动量相关作用和无动量相关作用的条件下, 考虑和不考虑核子-核子碰撞截面的同位旋效应时, 平均多重性之差随时间的演化, 即 $\Delta N_{inf}^{\text{MDI}}(U_1, \Delta\sigma) = N_{inf}^{\text{MDI}}(U_1, \sigma^{\text{iso}}) - N_{inf}^{\text{MDI}}(U_1, \sigma^{\text{noiso}})$ 和 $\Delta N_{inf}^{\text{NOMDI}}(U_1, \Delta\sigma) = N_{inf}^{\text{NOMDI}}(U_1, \sigma^{\text{iso}}) - N_{inf}^{\text{NOMDI}}(U_1, \sigma^{\text{noiso}})$ 随时间的变化.

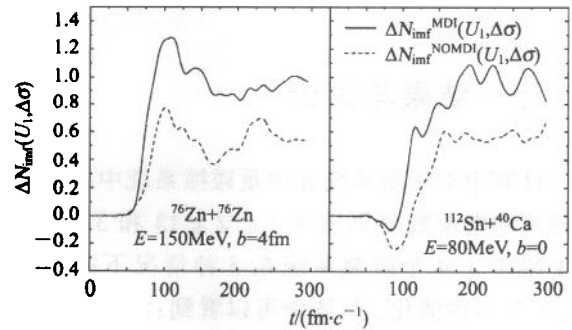


图 4 在考虑和不考虑动量相关作用的情况下, $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ 和 $^{112}\text{Sn} + ^{40}\text{Ca}$ 两个碰撞系统中两体碰撞的同位旋效应所引起的中等质量碎片的平均多重性之差随时间的变化

从图中可以看出, 在反应达到平衡之后, $\Delta N_{inf}^{\text{MDI}}(U_1, \Delta\sigma)$ 明显大于 $\Delta N_{inf}^{\text{NOMDI}}(U_1, \Delta\sigma)$. 这表明动量相关作用增强了 N_{inf} 对于两体碰撞的同位旋效应的

灵敏性. 其原因是在中能重离子碰撞的过程中, 具有排斥性质的动量相关作用加大了将纵向动量向其他方向的耗散, 促进了核子间的动量转移. 因而与不考虑动量相关作用的情形相比, 动量相关作用更容易使碰撞系统发生碎裂.

总结上述计算结果, 可以看出: (1) 中等质量碎片的多重性 N_{inv} 对于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋效应具有敏感的依赖性; (2) N_{inv} 对于对称势

的形式和强度并不敏感; (3) 在对动量相关作用的研究中发现, 动量相关作用增强了碰撞过程中核子动量由纵向向其他方向的耗散, 提高了 N_{inv} 对于两体碰撞的同位旋效应的灵敏性. 综合这些特征可以看出, 在中能重离子碰撞过程中, 中等质量碎片的平均多重性可以作为提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的探针.

参考文献 (References)

- 1 LI Bao-An, KO C M, Bauer W. *Int. J. Mod. Phys.*, 1998, **E7**:147
- 2 LI Bao-An, Schroder W U. *Isospin Physics in Heavy-ion Colliaion at Intermediate Energies*, Nova Science Publishers, Inc. New York: 2001
- 3 LI B A et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**:4492; Pak R et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**:1022; ZHAO Qiang et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2001, **25**(3):244(in Chinese); YANG Yan-Fang, LIU Jian-Ye, ZUO Wei et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2001, **25**(8):765(in Chinese); LIU Jian-Ye, ZHAO Qiang, ZUO Wei et al. *Nucl. Phys. Rev.*, 2001, **18**(1):21(in Chinese)
(赵强等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(3):244; 杨艳芳, 刘建业, 左维等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(8):765; 刘建业, 赵强, 左维等. 原子核物理评论, 2001, **18**(1):21)
- 4 LI Bao-An. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**:4221
- 5 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**:975; YANG Yan-Fang, LIU Jian-Ye et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**:1040
- 6 LIU Jian-Ye, YANG Yan-Fang, ZUO Wei et al. *Phys. Rev.*, 2001, **C63**:0546123; LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, ZHAO Qiang et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2001, **25**(4):336(in Chinese); LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, YANG Yan-Fang et al. *Nucl. Phys. Rev.*, 2001, **18**(4):276(in Chinese)
(刘建业, 郭文军, 赵强等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(4):336; 刘建业, 郭文军, 杨艳芳等. 原子核物理评论, 2001, **18**(4):276)
- 7 LIU Jian-Ye, ZHAO Qiang, WANG Shun-Jin et al. *Nucl. Phys.*, 2001, **A687** 475
- 8 Aichelin J, Peilert G, Bohnet A et al. *Phys. Rev.*, 1988, **C37**:2451
- 9 Bertsch G F, Gupta S D. *Phys. Rep.*, 1988, **160**(4):189
- 10 CHEN K, Fraenkel Z, Friedlander G et al. *Phys. Rev.*, 1968, **166**:949
- 11 Klakow D, Welke G, Bauer W. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**:1982
- 12 Reinhard P G. In: Langanke K, Maruhn J A, Koonin S E, *Computational Nuclear Physics*, Vol. 1, Springer-Verlag, Berlin, 1991, **99**:28—50
- 13 Singh J, Kumer S, Puri K. *Phys. Rev.*, 2001, **C63**:054603

Isospin Effects on Fragmentation Process and Role of Momentum Dependent Interaction in Heavy Ion Collisions at Intermediate Energy *

XING Yong-Zhong^{1,2,3} LIU Jian-Ye^{1,2} GUO Wen-Jun^{1,2} ZUO Wei^{1,2}
DI Yu-Fang⁴ LI Xi-Guo^{1,2} LI Zeng-Hua²

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)

4 (Lanzhou Branch of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract The isospin effects on the fragmentation process and the role of momentum dependent interaction in heavy ion collisions at intermediate energy are studied systematically by using isospin dependent Quantum Molecular Dynamical model (IQMD). The results show that multiplicity of intermediate mass fragments $\langle N_{inf} \rangle_b$ averaged over all impact parameters depends on the isospin effects of in-medium nucleon-nucleon cross section strongly but on the symmetry potential weakly. The momentum dependent interaction enhances the sensitivity of N_{inf} to the isospin effects of in-medium nucleon-nucleon cross section. Therefore, $\langle N_{inf} \rangle_b$ can be used as a probe to extract the information of in-medium isospin-dependent nucleon-nucleon cross section in heavy ion collisions at intermediate energy.

Key words fragmentation, isospin effect, momentum-dependent interaction

Received 6 March 2002

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077407), One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences, National Natural Science Foundation of China (10175080, 10004012) and Knowledge Innovation Project of CAS (KJCX2 - SW - N02)