

中能重离子碰撞中多重碎裂的同位旋效应^{*}

赵强² 刘建业^{1,2} 张丰收^{1,2} 王顺金^{1,3} 左维² 陈列文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(西南交通大学现代物理研究所 成都 610031)

摘要 利用同位旋相关的量子分子动力学,研究了逆反应系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$, $^{120}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$ 和 $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$, $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ 中多重碎裂的同位旋效应. 对于在中能区缺中子碰撞系统的中等质量碎片多重性大于丰中子碰撞系统的现象进行了分析和讨论.

关键词 同位旋效应 中等质量碎片多重性 核子-核子碰撞截面

1 引言

由于放射性次极束装置的建成,人们在重离子碰撞实验中可以使用大量不稳定核,这就极大地扩展了重离子碰撞研究的同位旋自由度范围,因此核反应中同位旋效应引起了人们的重视^[1-4]. 近年来,人们在实验上和理论上对中能重离子碰撞中同位旋效应进行了研究. 李保安、M. Ditoro 等人利用同位旋相关输运理论,研究了中能重离子碰撞中集体流和平衡能的同位旋效应,指出丰中子反应系统比稳定核反应系统有更强的集体流和更高的平衡能.

本文讨论了中能重离子碰撞中多重碎裂的同位旋效应. 多重碎裂过程是中能重离子碰撞的重要反应机制^[5-7],本工作主要研究多重碎裂过程中的同位旋效应. 采用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)进行计算,结果表明在所研究能区内,缺中子碰撞系统的中等质量碎片多重性大于丰中子碰撞系统. 我们分析和解释了这种多重碎裂的同位旋效应. 选择重质量弹核打轻质量靶核的逆反应系统,它具有大量产物向前角发射的优点,因此便于在有限探测器下理论与实验结合进行系统研究.

2 理论模型

描述多重碎裂过程的有效理论是量子分子动力学(QMD)^[8,9]. 在本文中使用的

1999-09-07 收稿

* 国家自然科学基金(19775057, 19847002, 19775020)和中国科学院基金资助

IQMD, 它从平均场、两体碰撞和泡利阻塞三方面对 QMD 模型进行了修正. 在平均场中引入对称势:

$$V^{\text{sym}} = C \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_z, \quad \tau_z = \begin{cases} 1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases} \quad (1)$$

其中 ρ_n, ρ_p 分别是中子、质子密度. ρ_0 是正常核物质密度 (0.16fm^{-3}). $C = 32 \text{MeV}$ 是对称势强度. IQMD 中密度相关的平均场为:

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

上式中前两项是 Skymre 势, $\alpha = -356 \text{MeV}$, $\beta = 303 \text{MeV}$ 和 $\gamma = 1.6667$ 为软势参数. V^{Coul} 和 V^{yuk} 是库仑势和表面势. 在两体碰撞过程中, 采用实验提取的参数化截面. 考虑介质效应后, 核子 - 核子碰撞截面为^[10]:

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

其中参数 $\alpha = -0.2$. $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$ 是实验的核子 - 核子碰撞截面. 在 500MeV 以下能区中, 中子 - 质子碰撞截面是质子 - 质子或中子 - 中子碰撞截面的 3 倍^[11]. IQMD 中泡利阻塞是在核子 - 核子碰撞中将中子和质子分开进行考虑的. 显然, 在相同条件下, 中子 - 质子间阻塞小于中子 - 中子或质子 - 质子之间阻塞. 经过修正后的 IQMD 能正确地描述重离子碰撞中的同位旋效应. 另外, 为正确描述重离子碰撞过程, 弹核和靶核的初始化过程也是十分重要的. 首先利用 Skymre-Hartree-Fock (SHF) 方法计算出弹核和靶核基态的质子和中子密度分布, 然后用蒙特卡罗方法抽样出弹核和靶核的初始坐标和动量. 图 1 是用 SHF 方法计算的弹核和靶核的密度分布. 从图中可以明显地区分出丰中子核和缺中子核具有不

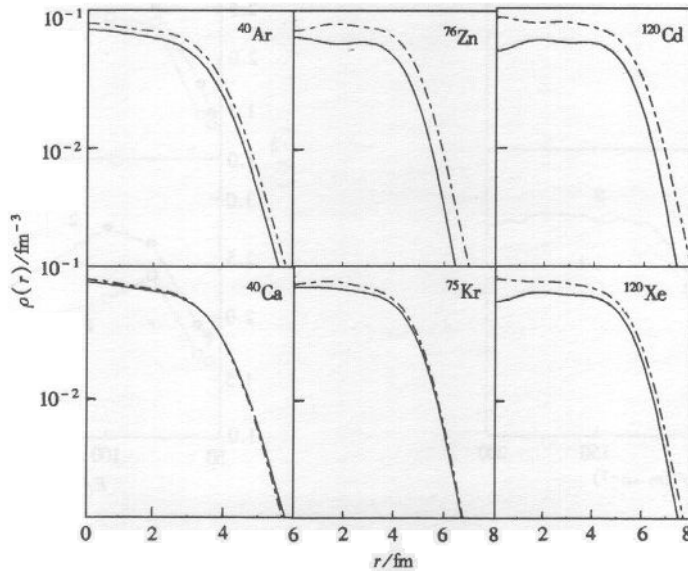


图 1 用 SHF 方法计算的原子核中质子和中子密度分布
—— 质子密度分布, ---- 中子密度分布.

同的密度分布,即丰中子核表现出明显的中子皮(或中子晕).

3 结果和分析

本文应用 IQMD 理论,对两组逆反应系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$, $^{20}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$ 和 $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$, $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ 进行研究. 每组逆反应系统具有相同质量的弹核和靶核,但是具有不同的中子质子比. 反应系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{20}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$; $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ 的中子质子比分别为 1.16 和 1.42; 1.07 和 1.42. 对于每组逆反应系统,由于势参数完全相同,所以,在入射能量和碰撞参数相同时,核反应产物的差别主要是由同位旋效应引起的.

图 2 中显示两组反应系统在碰撞参数 $b=0$ 时, N_{mf} 随时间的演化. $A=120$ 弹核系统的入射能量 $E=100\text{MeV/u}$, 中等质量碎片的电荷取 $3 \leq Z \leq 13$; $A=76$ 弹核系统的入射能量 $E=80\text{MeV/u}$, 中等质量碎片的电荷取 $3 \leq Z \leq 8$. N_{mf} 的计算采取逐个事件模拟, 结果是对 200 个事件的平均值. 曲线 1 为丰中子碰撞系统, 曲线 2 为缺中子碰撞系统.

图 3 中计算了碰撞参数 $b=0$ 时, 两组反应系统在入射能量分别为 $E=55, 60, 80, 100, 150$ 和 200MeV/u 的中等质量碎片多重性 N_{mf} . 图 3 和图 2 一样, 结果表明缺中子系统的 N_{mf} (曲线 2) 明显大于丰中子系统的 N_{mf} (曲线 1). 以上数据是对确定碰撞参数而言, 但是反应机制和反应产物对于碰撞参数是很灵敏的.

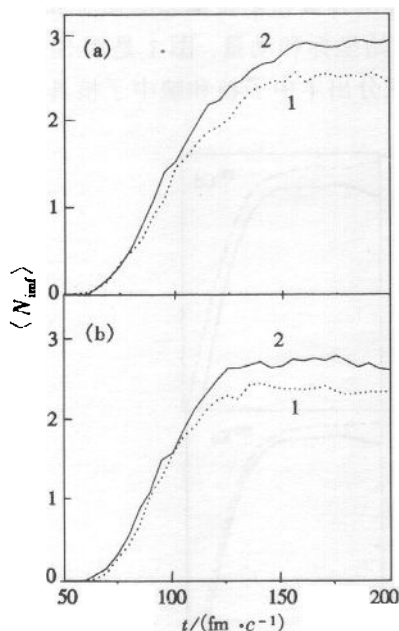


图 2 中等质量碎片多重性 N_{mf} 随时间的演化

(a) \cdots $^{120}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$, $-$ $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$;
(b) \cdots $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$, $-$ $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$.

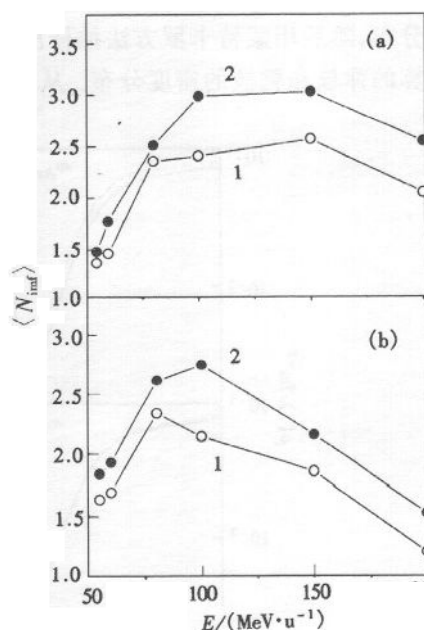


图 3 中等质量碎片多重性 N_{mf} 随能量的变化

(a) \circ $^{120}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$, \bullet $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$;
(b) \circ $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$, \bullet $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$.

图 4 表示 N_{mf} 随碰撞参数 b 的变化. 两组系统的入射能量与图 2 相同. $A = 120$ 弹核碰撞系统在碰撞参数 $b = 0-6\text{fm}$ 范围内, 缺中子系统 N_{mf} 大于丰中子系统; $A = 76$ 弹核碰撞系统在 $b = 0-5\text{fm}$ 范围内, 缺中子系统的 N_{mf} (曲线 2) 大于丰中子系统 (曲线 1).

图 5 表明带电粒子总数 N_c 与中等质量碎片多重性 N_{mf} 之间的关联. 同样, 两组系统的入射能量与图 2 相同. 图中缺中子系统的曲线 2 和丰中子系统的曲线 1 差别较大, 表现出明显的同位旋效应. 由于在逐个事件模拟的 N_{mf} 与 N_c 关联计算中, 同一 N_c 对应的 N_{mf} 来自于不同碰撞参数 b 的贡献, 结果使得丰中子碰撞系统对应的 $N_{mf}-N_c$ 关联曲线相对缺中子系统对应的 $N_{mf}-N_c$ 关联曲线向左移动, 故在低 N_c 时曲线 1 大于曲线 2. 但在高 N_c 时缺中子系统的曲线 2 仍然明显大于丰中子系统的曲线 1, 特别是缺中子系统中 N_{mf} 的总产额 (即每个图中相应曲线下的积分面积) 大于丰中子系统中 N_{mf} 的总产额.

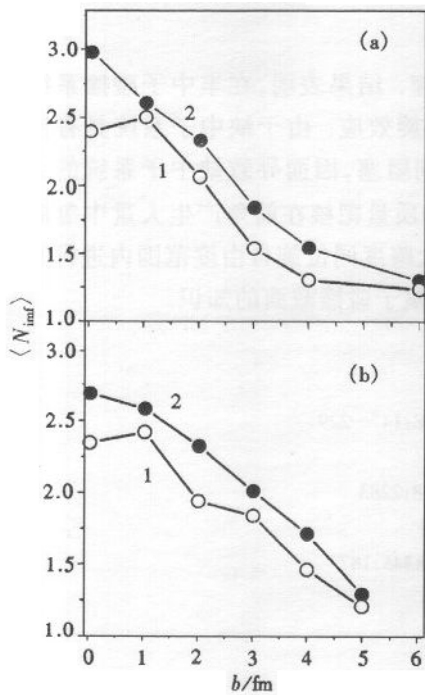


图 4 中等质量碎片多重性 N_{mf} 随碰撞参数的变化
说明同图 3.

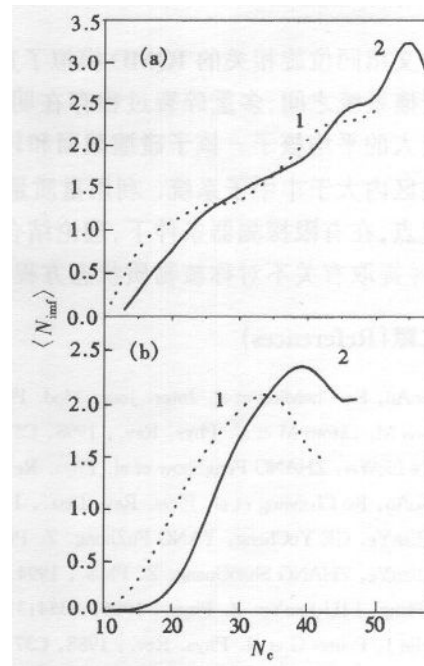


图 5 中等质量碎片多重性 N_{mf} 与带电粒子总数 N_c 的关联
说明同图 2.

在重离子碰撞中, 原子核多重碎裂过程中同位旋效应主要决定于密度相关的平均场、介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面和泡利阻塞效应. 平均场中对多重碎裂同位旋效应有影响的因素是库仑势和对称势, 库仑势引起质子间的排斥作用有利于缺中子系统的多重碎裂; 而对称势对中子产生的排斥作用有利于丰中子系统的多重碎裂, 二者作用相反, 它们的影响随入射能量的变化而变化. 在我们所考虑的能区内, 对称势对原子核多重碎裂的影响弱于介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的影响.

在中能区质子-中子碰撞截面是质子-质子或中子-中子碰撞截面的 3 倍. 由于缺中子系统中, 质子-中子碰撞数相对于质子-质子和中子-中子碰撞数会增加, 从而导致缺中子系统平均反应截面大于丰中子系统. 当考虑泡利原理时, 核子间碰撞受到阻塞, 使得实际碰撞数减少. 由于同类粒子之间的泡利阻塞大于异类粒子之间的泡利阻塞, 考虑泡利阻塞后缺中子系统平均反应截面更应大于丰中子系统平均反应截面. 故缺中子碰撞系统与丰中子系统相比将有利于碰撞系统的压缩、膨胀和多重碎裂, 从而导致较大的中等质量碎片多重性.

根据以上理由, 以及我们的 IQMD 模拟, 可以认为缺中子系统中等质量碎片多重性大于相同质量丰中子系统的中等质量碎片多重性, 表现出中能重离子碰撞过程中极强的同位旋效应.

4 小结

本文用同位旋相关的 IQMD 模拟了重离子碰撞. 结果表明, 在丰中子碰撞系统和缺中子碰撞系统之间, 多重碎裂过程存在明显的同位旋效应. 由于缺中子系统具有比丰中子系统大的平均核子-核子碰撞截面和较小的泡利阻塞, 因而导致缺中子系统的 N_{mf} 在所选能区内大于丰中子系统. 利用重质量弹核打轻质量靶核在前角产生大量中等质量碎片的优点, 在有限探测器条件下, 理论结合实验在大跨度同位旋自由度范围内进行系统的研究, 并提取有关不对称核物质状态方程和核子-核子碰撞截面的知识.

参考文献 (References)

- 1 LI BaoAn, Ko CheMing et al. Inter. Jour. Mod. Phys., 1998, E:147—229
- 2 Colonna M, Ditoro M et al. Phys. Rev., 1998, C57:1410
- 3 CHEN LieWei, ZHANG FengShou et al. Phys. Rev., 1998, C58:2283
- 4 LI BaoAn, Ko CheMing et al. Phys. Rev. Lett., 1997, 78:1644
- 5 LIU JianYe, GE YuCheng, YANG FuZhong. Z. Phys., 1993, A345:187
- 6 LIU JianYe, ZHANG ShaoGuang. Z. Phys., 1994, A354:31
- 7 LIU Hang, LIU JianYe. Z. Phys., 1996, A354:311
- 8 Aichelin J, Peilert G et al. Phys. Rev., 1988, C37:2451
- 9 Peilert G, H Stocher et al. Phys. Rev., 1989, C39:1402
- 10 Klakor D, Welke G, Baur W. Phys. Rev., 1993, C48:1982
- 11 Alkhozov G et al. Nucl. Phys. 1977, A280:365

Isospin Effect in Multifragmentation Process of Heavy Ion Collisions at Intermediate Energy *

ZHAO Qiang² LIU JianYe^{1,2} ZHANG FengShou^{1,2} WANG ShunJin^{1,3}
ZUO Wei^{1,2} CHEN LieWen²

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(*Institute of Modern Physics, South West Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

Abstract From the simulation of intermediate energy heavy ion collisions by using the isospin dependent quantum molecular dynamics (IQMD), we have investigated the isospin effects on the multifragmentation process in intermediate energy heavy ion collisions: reverse reactions $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$, $^{120}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$, $^{76}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ and $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$. To describe isospin effects appropriately, QMD was modified properly. The density dependent mean field contains correct isospin term including symmetry energy and Coulomb potential. The in-medium n-n cross section is different for neutron-neutron (proton-proton) and neutron-proton collisions. And finally Pauli blocking was counted by distinguishing neutrons and protons. In addition, the initial condition of the ground state of two colliding nuclei also contains isospin information. The calculated results show a prominent isospin effects for the multifragmentation process among the colliding systems with different neutron or proton excess. The correlation between N_{mf} and N_c for neutron-deficient systems are always larger than those for neutron-rich systems in intermediate energy region for all of colliding systems studied here, and the mechanism causing the above isospin effects is mainly due to the fact that the mean n-n cross section for the neutron-rich system is smaller than that of neutron-deficient system. Thus one can combine experimental studies and theoretical simulations to investigate the isospin effect of multifragmentation process and to extract the information on isospin dependence of in-medium n-n cross section from the correlation between N_{mf} and N_c .

Key words isospin effect, multiplicities of intermediate-mass fragments, nucleon-nucleon cross section

Received 7 September 1999

* Supported by NSFC (19775057, 19847002, 19775020) and Foundation of The Chinese Academy of Sciences