

中能重离子碰撞中同位旋相关核子-核子碰撞截面的可能观测量*

赵强² 陈波² 刘建业^{1,2} 张丰收^{1,2}
王顺金^{1,3} 陈列文² 左维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和寻找提取中能重离子碰撞多重碎裂中同位旋相关核子-核子碰撞截面的可能观测量. 计算结果表明,在多重碎裂过程中中等质量碎片多重性与带电粒子总数之间的关联是在所选能区提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏观察量. 应用重质量弹核打轻质量靶核具有反应产物向前角发射这一逆反应效应,可以在有限探测器条件下与实验相结合提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面.

关键词 重离子碰撞 多重碎裂 中等质量碎片多重性

1 引言

近几年,在中能重离子碰撞实验中使用大量中子或质子过剩的放射线束,这使得探索核物质状态方程和提取大跨度同位旋自由度范围内的介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的信息成为可能. 它不仅对了解核的性质,而且对于超新星爆炸机制和中子星冷却速率的研究都是非常重要的^[1].

但是,至今对称能和介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面还没有被很好地确定. 最近,李保安等^[2-4]利用同位旋相关的BUU模型研究了核对称能. 结果表明,中能重离子碰撞中前平衡发射的中子质子比对核对称能灵敏,但与对称核物质的不可压缩性和介质中核子-核子碰撞截面无关. 尽管最近对集体流和平衡能的同位旋相关性在理论上和实验上进行了研究^[5-7],并表明它们可观察的同位旋相关性主要是由于在同位旋相关的BUU模型中使用了介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面,但是同位旋相关的BUU模型只能给出平衡能同位旋相关性的定性描述,不能给出定量的大小. 特别是人们对介质

1999-03-24 收稿

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

中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性所知甚少. 此外, 陈列文等已经研究了面内横向集体流和平衡能的同位旋相关性. 这个相关性主要由同位旋相关的平均场、核子-核子碰撞截面和入射通道条件确定^[8-10].

目前, 人们对介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的特征所知甚少, 期望寻找其它不同的方法来探索介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面. 众所周知, 在中能重离子碰撞中有大量中等质量碎片产生^[11-13], 并且中等质量碎片多重性 N_{mf} 和带电粒子总数 N_c 之间存在着很强的关联^[14]. 因此可以根据这个特性来寻找介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面或核状态方程的可能探针.

利用同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD) 研究重离子碰撞中多重碎裂过程, 来寻找重离子碰撞多重碎裂过程中对介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面灵敏的观测量. 计算结果显示, 随着入射能量的变化在某些能区 N_{mf} 和 N_c 之间的关联是探索介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面信息的灵敏观察量. 当然, 在所选能区内对称能对 N_{mf} 与 N_c 关联的影响弱于核子-核子碰撞截面的影响.

选用中能重离子碰撞中重质量弹核打轻质量靶核的逆反应效应, 即大部分反应产物分布在前角, 使得本工作便于在有限探测器条件下, 实验和理论结合, 通过 N_{mf} 和 N_c 之间的关联提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的信息.

我们曾在以前的工作中采用对所有事件求平均的方法, 即对应于实验上的单举测量, 对这一问题进行初步研究^[15]. 而在本文中采用与实验中符合测量相对应的逐个事件模拟的方法, 对该问题进行深入研究.

2 同位旋相关的量子分子动力学和参数

中能重离子碰撞会产生大量中等质量碎片. 描述碎片形成和同位旋相关性的有效理论是 IQMD, 它包括对称能、介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面和泡里阻塞的同位旋效应修正, 以及利用 Skyrme-Hatree-Fock 方法计算出弹核和靶核的初始密度分布. IQMD 的平均场为

$$U(\rho) = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + V_C (1 - \tau_z) + C \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_z + V^{Yuk}, \quad (1)$$

其中软势参数 $\alpha = -356 \text{ MeV}$, $\beta = 303 \text{ MeV}$, $\gamma = -1.1667$; 不可压缩系数 $K = 200 \text{ MeV}$; ρ_0 是正常核物质密度 (0.16 fm^{-3}); ρ , ρ_n , ρ_p 分别是整体、中子和质子密度; V_C 和 V^{Yuk} 是库仑和 Yukawa 势; τ_z 对于中子为 1, 对于质子为 -1, 对称项强度 $C = 32 \text{ MeV}$. 值得注意的是, 最近对中能重离子碰撞中集体流的研究表明介质效应使核子-核子碰撞截面变小^[16]. 故经验的介质中核子-核子碰撞截面

$$\sigma_{NN}^{med} = \left(1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0} \right) \sigma_{NN}^{free}, \quad (2)$$

其中参数 $\alpha = -0.2$. σ_{NN}^{free} 是实验获得的同位旋相关自由核子-核子碰撞截面. 在 500 MeV 以下能区中子-质子碰撞截面是质子-质子或中子-中子碰撞截面的 2—3 倍.

3 结果和讨论

中能重离子碰撞反应动力学主要由核物质状态方程、介质内核子-核子碰撞截面和泡里阻塞决定. 实际上, 从重离子碰撞中提取核状态方程的主要不确定性来自于对介质中核子-核子碰撞截面的不确定性. 因此, 对确定的碰撞系统, 通过改变入射能量来寻找对介质中核子-核子碰撞截面最灵敏的观测量. 鉴于中能重离子碰撞能发射大量中等质量碎片的特性, 利用 IQMD 来研究重离子碰撞中多重碎裂过程, 基于 N_{mf} 与 N_c 之间的关联寻找介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的灵敏观测量. 在数值计算中采取了逐个事件进行模拟, 即对于每个碰撞参数 b , 模拟 200 个事件. 对碰撞系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ 改变入射能量来研究同位旋相关核子-核子碰撞截面和对称势对 N_{mf} 的影响. 发现对于碰撞系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$ 在入射能为 $E = 100\text{MeV/u}$ 左右时中等质量碎片多重性对对称势不灵敏, 而对介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面灵敏; 对于碰撞系统 $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$, 这种情况出现在入射能为 $E = 80\text{MeV/u}$ 左右. 图 1, 2, 3 比较了下列 3 种关于 N_{mf} 的同位旋效应: 1) 全部同位旋效应; 2) 不考虑核子-核子碰撞截面的同位旋效应(即 $\sigma_{np} = \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$); 3) 不考虑对称势.

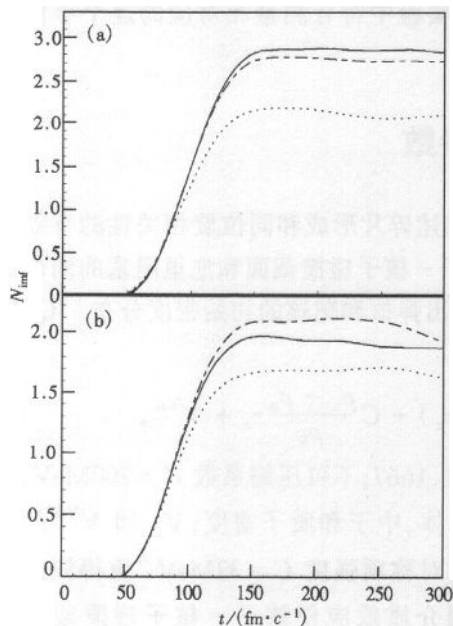


图 1 3 种同位旋效应下 N_{mf} 随时间的演化
(a) 反应系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$, $E = 100\text{MeV/u}$,
 $b = 2.0\text{fm}$; (b) $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$, $E = 80\text{MeV/u}$, $b = 2.0\text{fm}$.
——考虑全部同位旋效应的情况; - - - 不考虑对称势;
..... 不考虑核子-核子碰撞截面的同位旋效应.

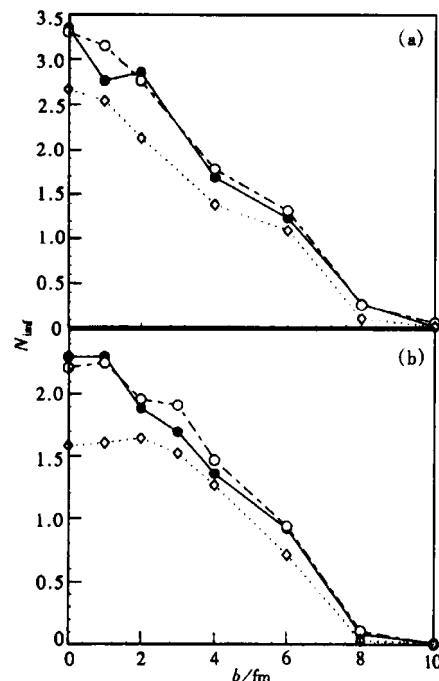


图 2 3 种同位旋效应下 N_{mf} 随碰撞参数 b 的变化
(a) 反应系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$, $E = 100\text{MeV/u}$;
(b) $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$, $E = 80\text{MeV/u}$. 图中符号说明同图 1.

图 1 显示了在碰撞参数 $b = 2.0\text{fm}$ 时,反应系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$ ($E = 100\text{MeV/u}$) (a) 和 $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ ($E = 80\text{MeV/u}$) (b) 的 N_{inf} 随时间演化情况. N_{inf} 是对 $b = 2.0\text{fm}$ 的 200 个事件的平均结果. 核反应几率和机制是与碰撞参数紧密相关的. 图 2 与图 1 相似,是在 3 种情况下, N_{inf} 随碰撞参数 b 的演化. 碰撞参数 $b = 0.0 - 10.0\text{fm}$.

图 3 显示了对于上述 3 种情况下两个反应系统的 N_c 和 N_{inf} 之间的关联. 我们采用逐个事件模拟的方法计算图 3 中的 N_{inf} 和 N_c . 从图 1, 2, 3 可知,代表全同位旋效应的实线和代表无对称势的点划线靠近,而远离代表不考虑核子-核子碰撞截面同位旋效应的虚线. 这表明在所选能区,介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面对 N_{inf} 和 N_c 之间关联的影响和对称势相比是主要的. 即重离子碰撞中 N_{inf} 和 N_c 之间的关联是所选能区内提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏观察量. 因此,重离子碰撞的实验观测应与理论预言相结合来提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的知识.

4 结论和展望

用包括核子-核子碰撞截面、平均场和泡里阻塞同位旋效应的 IQMD 来模拟核反应动力学,结果表明在中能重离子碰撞中, N_{inf} 和 N_c 之间的关联在所选能区内是探寻介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏观察量. 在所选能区内对称势的同位旋效应不重要. 因此,可以采用重质量弹打轻质量靶的逆反应在前角产生大量中等质量碎片的优点,在有限探测器的情况下,理论模拟结合实验观测,利用稳定核和放射性核系统地选择能区来分析 N_{inf} 和 N_c 之间的关联,从而提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的知识,并研究它们从对称核物质到核子滴线核或质子滴线核的演化特性.

参考文献 (References)

- 1 LI BaoAn, Ko CheMing, Baur W. Inter. Jour. Mod. Phys. E., 1998, 7(2):147—299
- 2 LI BaoAn, Ko CheMing, REN ZhongZhou. Phys. Rev. Lett., 1997, 78:1644
- 3 Hanold K A et al. Phys. Rev., 1995, C52:1462
- 4 Kunde G J et al. Phys. Rev. Lett., 1996, 77:2897
- 5 LI BaoAn, REN ZhongZhou et al. Phys. Rev. Lett., 1996, 76:4492—4495
- 6 Pak R, Benenson W, Bjark O et al. Phys. Rev. Lett., 1997, 78:1022—1025

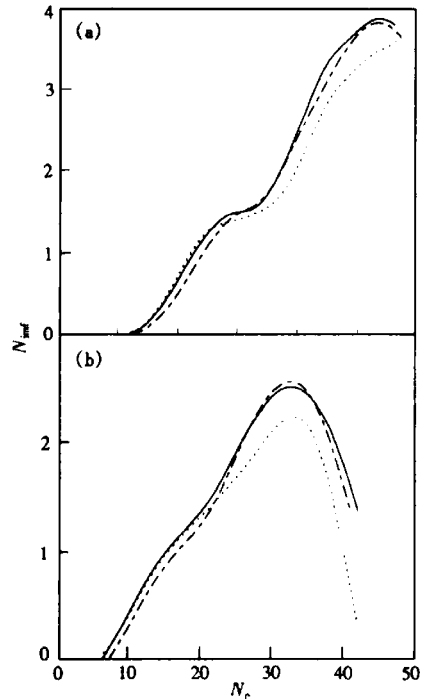


图 3 3 种同位旋效应下 N_{inf} 和 N_c 之间的关联
 (a) 反应系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$, $E = 100\text{MeV/u}$;
 (b) $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$, $E = 80\text{MeV/u}$.
 图中符号说明同图 1.

- 7 Pak R, LI BaoAn, Beneson W et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:1026—1029
- 8 CHEN LieWen, ZHANG FengShou, JIN GenMing. Phys. Rev., 1998, **C37**:2451
- 9 CHEN LieWen, ZHANG FengShou, JIN GenMing. Phys. Rev., 1998, **C38**:2283
- 10 CHEN LieWen, GE LingXiao, ZHANG XiaoDong et al. J. Phys., 1997, **G23**:211
- 11 LIU JianYe, GE YuCheng, YANG FuZhong. Z. Phys., 1993, **A354**:187
- 12 LIU JianYe, ZHANG ShaoGuang. Z. Phys., 1994, **A354**:31
- 13 LIU Hang, LIU JianYe. Z. Phys., 1996, **A354**:311
- 14 Bowman D R, Mader C M et al. Phys. Rev., 1992, **C46**: 1834
- 15 LIU JianYe, CHEN Bo et al. Nuclear Physics Review(in Chinese), 1999, **16**(3):165
(刘建业,陈波等. 原子核物理评论, 1999, **16**(3):165)
- 16 Huang M J et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:3737

Probable Observable of Isospin Dependent Nucleon-Nucleon Cross Section in Inter Mediate Energy Heavy Ion Collisions

ZHAO Qiang² CHEN Bo² LIU JianYe^{1,2} ZHANG FengShou^{1,2}
WANG ShunJin^{1,3} CHEN LieWen² ZUO Wei²

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 We have used the isospin dependent quantum molecular dynamics to investigate the probable observable for probing isospin dependent nucleon-nucleon cross section in multifragmentation process of intermediate energy heavy ion collisions. The calculation results show that the correlation between the intermediate mass fragment multiplicity N_{inf} and the total number of charged particles N_c is a sensitive observable for probing in-medium isospin dependent nucleon-nucleon cross section in the chosen energy region. Because we apply the reversible reaction effect of heavy mass projectile on light mass target in the chosen energy region, which result in more intermediate mass products emitted towards forward angles, it is convenient to extract in-medium isospin dependent nucleon-nucleon cross sections by combining theory simulations and experimental observations under the conditions of limited detectors.

Key words heavy ion collision, multifragmentation, multiplicity of intermediate mass fragment

Received 24 March 1999

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