

中能重离子碰撞中同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏探针*

陈波² 赵强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 基于重质量弹核(放射性核或稳定核)打轻质量靶核的逆运动学效应,即反应产物主要集中在小角度的优点,利用同位旋相关的量子分子动力学模型,探寻了对于中能重离子碰撞过程中同位旋效应灵敏的物理观测量. 计算表明,在入射能量约大于80MeV/u能区,中等质量碎片多重性随发射带电粒子总数之间的演化是提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的灵敏物理量.

关键词 同位旋效应 重离子碰撞 灵敏的探针

1 引言

放射性核所引起的重离子碰撞为在大跨度同位旋自由度范围内研究和建立核物质状态方程以及提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面提供了良好的手段^[1],因为原子核结构和反应的诸多性质,例如原子核的结合能、核物质密度分布、核半径、核形状、中子晕、中子皮、质子晕、质子皮和重离子碰撞机制(如原子核多重碎裂^[2,3]),与核物质状态方程和核子-核子碰撞截面密切相关. 同样,核物质状态方程和核子-核子碰撞截面对于确定天体和宇宙的演化过程中的一些观测量起着重要作用. 从理论与实验的结合上,挑选和探寻同位旋非对称原子核碰撞动力学过程中对同位旋自由度灵敏的物理观测量,从中分析和提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面,或者建立大跨度同位旋自由度范围内直至纯中子核物质状态方程就成为极端条件下研究核物理的重要课题.

兰州重离子加速器放射性束装置的建成为理论与实验结合展开中能重离子碰撞同位旋效应的研究提供了良好的条件. 但鉴于目前开展放射性束物理研究的探测器还不完全

1999-02-03 收稿

* 国家自然科学基金(19775057),国家自然科学基金理论物理专项(19847002),中国科学院九五基础性研究重大项目(KJ951-A1-410)和中国科学院院长特别支持项目资助

配套,因此,可利用重弹打轻靶的逆运动学效应,反应产物主要分布在小角度区域的优点,在有限粒子探测器的条件下,开展一些有意义的与同位旋相关的研究工作. 根据兰州重离子加速器可以产生的放射性束,选取 $^{120}_{54}\text{Xe}$, $^{120}_{48}\text{Cd}$, $^{76}_{36}\text{Kr}$ 和 $^{76}_{30}\text{Zn}$ 分别轰击 $^{40}_{20}\text{Ca}$ 和 $^{40}_{20}\text{Ar}$,利用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)理论,对在不同入射能量、不同碰撞参数、不同同位旋自由度碰撞系统条件下的中等质量碎片多重性(N_{MF})随带电粒子总数(N_c)或者随时间的演化过程进行了计算. 分析和比较结果发现能量在100MeV/u左右时,对称势强度的变化对 N_{MF} 与 N_c 的关联影响不大,而同位旋相关核子-核子碰撞截面却对中等质量碎片多重性同位旋效应很灵敏. 为此我们建议实验上通过测量发射 N_{MF} 随 N_c 的演化,结合理论计算和分析以提取有关介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的知识.

2 理论计算和结果分析

2.1 理论模型和参数选取

在中能重离子碰撞动力学过程中,与同位旋效应相关的物理因素有库仑作用、核子-核子碰撞截面、对称势和碰撞的泡利阻塞以及弹核、靶核的初始核密度分布. 我们采用同位旋相关的IQMD来进行计算和分析^[4,5],这里IQMD就是在原有QMD的基础上,在平均场中加入反映同位旋效应的对称势,同时采用实验上参数化了的同位旋相关的核子-核子碰撞截面. 关于介质效应采用如下公式:

$$\sigma^{\text{Med}} = \sigma^{\text{free}} \left(1 + \alpha \frac{\rho(r)}{\rho_0} \right),$$

其中 σ^{free} 是实验上参数化了的自由核子-核子碰撞截面,如文献[6]中的(6),(7)式所示.

由对称核物质集体流分析,一般估计 $\alpha = -0.2$ 到 -0.3 ,计算中将取 $\alpha = -0.2$ 反映核子-核子碰撞中的介质效应.

考虑核子-核子碰撞泡利阻塞中的同位旋效应,即中子-中子和质子-质子碰撞的泡利阻塞大于中子-质子碰撞中的泡利阻塞. 同位旋效应对于对称势的强度和核密度的依赖形式是很灵敏的^[1],选用

$$V^{\text{Sym}} = V_{0s} \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_z, \tau_z = \begin{cases} +1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases} \quad (2)$$

ρ_n, ρ_p 为中子、质子密度,对称势强度参数 $V_{0s} = 32\text{MeV}$. 而Skyrme势仅采用软势,即

$$U^{\text{Skv}} = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (3)$$

其中, $\alpha = -356\text{MeV}$, $\beta = 303\text{MeV}$, $\gamma = 1.16667$. 利用Skyrme H-F方法计算和确定所有弹核或靶核的基态中子和质子密度分布.

2.2 反应系统的选取

为了突出重离子碰撞中的同位旋效应,选取了完全相同的人射道条件,即选取两个弹核和靶核质量完全相同的逆反应系统,包括碰撞系统的势参数都完全相同,差别仅在于两个反应系统的同位旋自由度不同,例如: $^{120}_{48}\text{Cd} + ^{40}_{18}\text{Ar}$ 与 $^{120}_{54}\text{Xe} + ^{40}_{20}\text{Ca}$ 碰撞系统的中子质子

比(N/Z)分别为 1.42 和 1.16. 碰撞系统 $^{76}_{30}\text{Zn} + ^{40}_{18}\text{Ar}$ 与 $^{76}_{36}\text{Kr} + ^{40}_{20}\text{Ca}$ 的中子质子比(N/Z)分别为 1.42 和 1.07. 这 4 个碰撞系统在入射能量和碰撞参数都相同的条件下,碰撞中不同系统之间物理观测量的差别主要来自同位旋效应.

2.3 计算结果分析和对同位旋效应灵敏探针的选取

在中能重离子碰撞中有大量中等质量碎片产生. 选取电荷在 $3 \leq Z \leq 8$ 之间的碎片, 研究与中等质量碎片有关的物理观测量, 如 N_{IMF} 随带电粒子总数 N_c 的演化. 以上物理量都是实验上可以直接测量的量, 便于理论结果与实验数据的直接比较和提取有关知识.

首先对比在 $E = 100\text{MeV/u}$ 附近能区, 丰中子系统 $^{120}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$ 和缺中子系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$, N_{IMF} 随 N_c 的演化 (见图 1). 结果表明, 在该能区, 对于缺中子系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$, $N_{\text{IMF}}(N_c)$ 总的

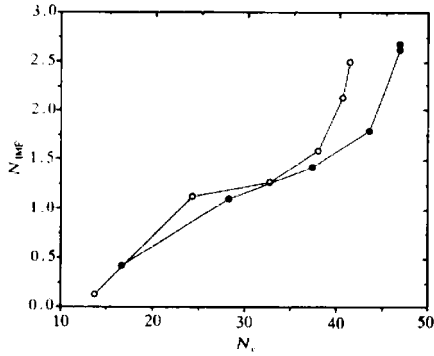


图 1 碰撞系统 $^{120}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$ 和 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$ 在 $E = 100\text{MeV/u}$ 时中等质量碎片多重性

N_{IMF} 随带电粒子数 N_c 的演化

○ $^{120}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$, ● $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$.

比丰中子系统的 $N_{\text{IMF}}(N_c)$ 大. 因为在入射能量增加到一定数值时, 核子-核子碰撞截面的贡献逐步占据主导地位, 而平均场起次要作用. 实验的核子-核子碰撞截面表明在 500MeV/u 以下能区, 中子-质子碰撞截面比同类粒子碰撞截面大 2—3 倍. 而缺中子碰撞系统的 np 碰撞数大于丰中子碰撞系统, 故平均碰撞截面 $\langle \sigma \rangle$ 有所增加, 如下式所示:

$$\langle \sigma \rangle = \frac{N_{\text{np}} \cdot \sigma_{\text{np}} + (N_{\text{nn}} + N_{\text{pp}}) \sigma_{\text{pp}}}{N_{\text{np}} + N_{\text{nn}} + N_{\text{pp}}} = \frac{3N_{\text{np}} + N_{\text{nn}} + N_{\text{pp}}}{N_{\text{np}} + N_{\text{nn}} + N_{\text{pp}}} \sigma_{\text{np}}, \quad (4)$$

这里 N_{np} 和 σ_{np} 分别是中子-质子碰撞数和碰撞截面, 其余类推. 从上面公式可以看出: (1) 平均核子-核子碰撞截面同位旋效应增大了碰撞几率, 因而加大了热核压缩膨胀过程和多重碎裂, 结果增加了 $N_{\text{IMF}}(N_c)$. (2) 相同质量的碰撞系统, 其中缺中子碰撞系统 (同位旋自由度小), 由于碰撞数增加, 因而有利于 $N_{\text{IMF}}(N_c)$ 的增加.

总之, 图 1 两种系统的计算结果表明: (1) 缺中子碰撞系统 $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$ 的 N_{IMF} 大于丰中子碰撞系统 $^{120}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$ 的 N_{IMF} , 其主要原因是前者同位旋相关的碰撞几率大于后者所致. (2) 如果同位旋相关的对称势的影响是次要的, 那么造成两个碰撞系统结果差别的主要原因是介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面起着主导作用. 为了进一步验证这种看法, 在图 2(a), (b), (c) 中分别给出了三组碰撞系统 $^{40}\text{Ar} + ^9\text{Be}$ 在 $E = 120\text{MeV/u}$ 和 $b = 3.0\text{fm}$ 时, $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$ 在 $E = 80\text{MeV/u}$ 和 $b = 3.0\text{fm}$ 时及 $^{120}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$ 在 $E = 100\text{MeV/u}$ 和 $b = 3.0\text{fm}$ 时 N_{IMF} 随时间的演化过程. 对一确定的碰撞参数而言, 图中所有结果都表明无对称势曲线与全效应曲线相距很近, 即对称势的影响不大; 而与对称势结果相比, 无同位旋效应的核子-核子碰撞截面的曲线距全效应曲线较远, 这就表明介质中核子-核子碰撞截面的同位旋效应是主要的. 也就是说, 中能重离子碰撞中发射 N_{IMF} 对于核子-核子碰撞截面的同位旋效应是很灵敏的.

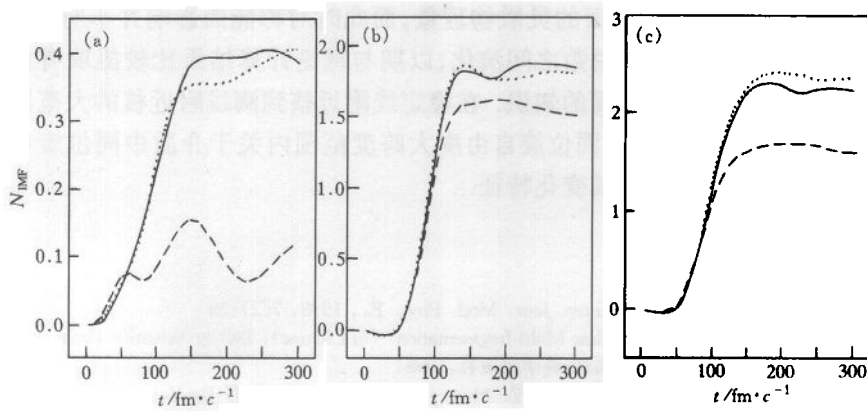


图 2 碰撞系统在 3 种情况下,中等质量碎片多重性 N_{IMF} 随时间的演化过程
 虚线代表同位旋不相关的核子-核子碰撞截面(即 $\sigma_{np} = \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$)的结果;
 实线表示包括全部同位旋效应(即全效应)的结果;点线表示对称势强度为零的结果.

在图 3(a—c)中分别给出了 $^{40}\text{Ar} + ^9\text{Be}$ 在 $E = 120\text{MeV/u}$ 时, $^{76}\text{Zr} + ^{40}\text{Ar}$ 在 $E = 80\text{MeV/u}$ 时及 $^{120}\text{Cd} + ^{40}\text{Ar}$ 在 $E = 100\text{MeV/u}$ 时 N_{IMF} 随碰撞参数 b 的变化. 可以看出,对于该能区所计算的 3 种类型的碰撞系统和所有的碰撞参数而言, N_{IMF} 主要对核子-核子碰撞截面的同位旋效应灵敏. 也就是说,通过理论计算和实验数据比较, N_{IMF} 是提取有关介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面知识的灵敏探针

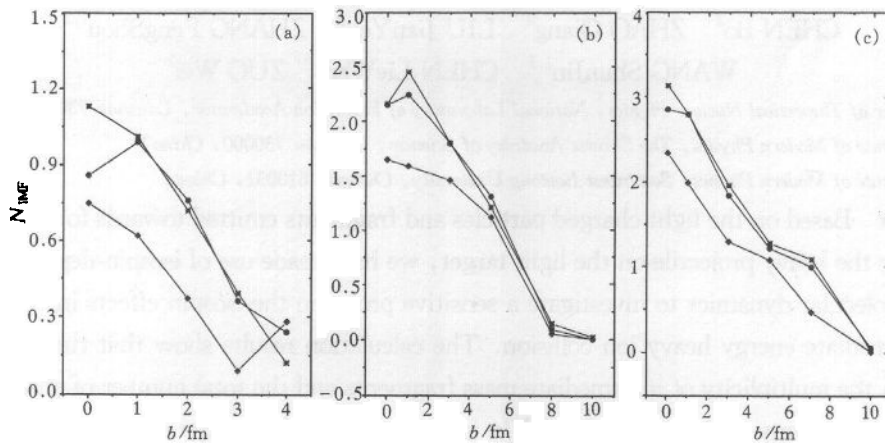


图 3 碰撞系统的 N_{IMF} 在 3 种情况下随 b 的演化
 —■—, —●—, —×— 分别与图 2 中虚线、实线、点线意义相同.

3 结 论

利用重弹(放射性核或稳定核)打轻靶的逆运动学效应,反应产物主要集中在小角度区的特点,可以在有限探测器的情况下研究中能重离子碰撞的同位旋物理. 在入射能量约大于 80MeV/u 能区,中等质量碎片多重性随发射带电粒子总数之间的演化对介质中同

位旋相关的核子-核子碰撞截面的灵敏物理量,而此时对称能的影响并不明显. 观测中等质量碎片多重性与带电粒子总数之间演化,以期与理论计算结果比较提取有关介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的知识. 在稳定线附近核到滴线附近核的大范围内系统地以上研究工作,从中提取同位旋自由度大跨度范围内关于介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的知识并研究其变化特征.

参考文献(References)

- 1 LI BaoAn, CHEN MingKo, Baur W. *Inter. Jour. Mod. Phys. E.*, 1998, 7(2):20
- 2 ZHANG FengShou, GE LingXiao. *Nuclear Multi-fragmentation.* (in Chinese), Beijing:Scientific Press, 1998
(张丰收,葛凌霄. 原子核多重碎裂. 北京:科学出版社,1998)
- 3 LIU JianYe, GE YuCheng, YANG FuZhong. *Z. Phys.*, 1993, A345:187; LIU JianYe, ZHANG ShaoGuang. *Z. Phys.*, 1994, A348:31; LIU Hang, LIU JianYe. *Z. Phys.*, 1996, A354:311
- 4 CHEN LieWen, ZHANG FengShou, JIN GengMin. *Phys. Rev.*, 1998, C58:2283
- 5 CHEN LieWen, ZHANG FengShou, ZENG XiangHua et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 1998, 22:1035
(陈列文,张丰收,曾祥华等. 高能物理与核物理. 1998,22:1035)
- 6 CHEN Bo, LIU JianYe, ZHANG FengShou et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 2000, 24(3):244
(陈波,刘建业,张丰收等. 高能物理与核物理,2000,24(3):244)

A Sensitive Probe for Isospin-Dependent Nucleon-Nucleon Cross Section in Intermediate Energy Heavy Ion Collision *

CHEN Bo² ZHAO Qiang² 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, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract Based on the light charged particles and fragments emitted towards forward angles by using the heavy projectile on the light target, we have made use of isospin-dependent quantum molecular dynamics to investigate a sensitive probe on the isospin effects in the process of intermediate energy heavy ion collision. The calculation results show that the correlation between the multiplicity of intermediate mass fragments and the total number of charged particles in the energy region above 80MeV/u is a sensitive probe on the isospin-dependent nucleon-nucleon cross section in medium in intermediate energy heavy ion collision, meanwhile the isospin effects of symmetric energy is not obvious in the same energy region.

Key words isospin effects, heavy ion collision, sensitive probe

Received 3 February 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19775057), Major Project of National Natural Scientific Theoretical Physics (19847002), Major Project of The Chinese Academy of Sciences (KJ951-A1-410) and Special Foundation of President of The Chinese Academy of Sciences