

35MeV/u $^{36,40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中同位旋自由度的弛豫^{*}

肖志刚 吴和宇 李祖玉 靳根明 王宏伟 段利敏 张保国
胡荣江 魏志勇 柳永英 王素芳 卢朝晖 诸永泰 朱海东

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 35MeV/u $^{36,40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中,在前角 5° 和 20° 观测到丰中子核与稳定核的产额比随粒子出射动能的增加而减小,而缺中子核与稳定核的产额比随动能的增加而增加. 对于某种元素,随着动能的减小,其平均中质比逐渐由弹核 N/Z 向靶核 N/Z 过渡. 这些现象表明在这样的入射能量下,周边或近周边碰撞过程中同位旋自由度没有完全达到平衡. 这种行为对两个靶核系统是相似的,但是同位素产额比的绝对值在 5° 没有靶核相关性,而在 20° 处却表现出明显的靶核相关性.

关键词 同位素产额比 周边碰撞 同位旋自由度

1 引言

随着放射性束的广泛使用,同位旋自由度的弛豫越来越引起人们的兴趣^[1,2]. 早在七八十年代,人们便得出结论:在低能核反应中,同位旋自由度是最早达到平衡的自由度^[3]. 随着束流能量的提高,测量碰撞中形成的热核的粒子发射,有助于进一步了解碰撞同位旋自由度的弛豫情况. Lozhkin 等人在中高能轻核引起的反应中,在较大角度测量到的中等质量碎片(IMF)发射的同位旋效应可以由统计模型加以解释,意味着复合体系已经达到同位旋平衡^[4]. 但是,最近更多的实验似乎并不支持这样的结论^[5,6]. Yennello 等人在 $^{40}\text{Cl}/^{40}\text{Ca}/^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}/^{58}\text{Fe}$ 等反应体系中,测量了实验室系 40° 处复杂碎片的同位素产额比,发现它并不是简单地依赖于系统 N/Z 比,由此认为 IMF 产物并非来源于一个同位旋平衡的复合系统. 理论上基于已有的输运方程,加入同位旋相关项,可以较好地描述同位旋自由度弛豫的动力学过程及其它的同位旋效应^[7-9]. Li Bao-An 等的计算表明,当入射能量高于费米能量时,中心碰撞同位旋平衡大约发生在 $50\text{fm}/c$ 处,先于动量达到平衡^[10].

2000-05-31 收稿

^{*} 中国科学院“九五”基础性研究重大科学基金(KJ95T-03),中国科学院“百人计划”和国家自然科学基金重点项目(19735010)基金资助

从一般图像上说,在中能重离子碰撞中,对于远周边碰撞反应,由于作用时间短,耗散程度较浅,同位旋自由度可能不平衡,随着碰撞参数的增加,作用时间变长,弹靶体系的同位旋逐渐向平衡过渡.在中低能反应中,类弹或深部非弹粒子的动能反映耗散程度,也反映作用时间.定性地说,作用时间越长,耗散程度越深,出射粒子动能越小.因此,出射粒子动能可以作为作用时间的一个量度.同时,根据深部非弹机制,出射角度也反映两体耗散时间的长短.为了考察同位旋这个快自由度在周边或近周边碰撞过程中的弛豫情况,我们研究了 $35\text{MeV/u } ^{36,40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中前角出射产物的同位素产额比随粒子出射动能的变化,以及靶核相关性的角度依赖性.

2 实验安排

实验分别在兰州重离子加速器的大筒型散射室($^{36}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$)和次级束流线的初级靶室($^{40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$)中进行.束流能量均为 35MeV/u ,靶子厚度分别为 1.78 和 1.57mg/cm^2 ,纯度分别为 73% 和 84% .在 $^{36}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中,从 5° — 165° 分别摆放了 11 块粒子望远镜,同时在前角区以束流为轴对称地安放了 6 块平行板雪崩计数器(PPAC)测量余核,为了研究粒子发射时标的同位旋效应,在 23° 放置了一套 13 单元的粒子望远镜阵列,测量小角关联的出射粒子.位于 5° 的粒子望远镜由两块金硅面垒型探测器加一块锂漂移探测器组成,厚度分别为 $350, 500$ 和 $3500\mu\text{m}$,质量分辨 $A/\Delta A$ 高达 30.该望远镜距离靶 120cm ,立体角为 0.05msr ,用来测量反应中耗散弹核碎裂产物^[11].在 $^{40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中,除了在后角 145° 放置了粒子望远镜以研究热核粒子发射机制的同位旋效应外^[12],在前角 20° 也放置了一块高质量分辨的粒子望远镜,它也是由两块金硅面垒型探测器加一块锂漂移探测器组成,厚度分别为 $150, 350$ 和 $3500\mu\text{m}$,主要用来测量反应中的深部非弹碰撞(DIC)产物.本文主要讨论在 $^{36}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中 5° 和 $^{40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中 20° 的单举测量结果.

3 实验结果与分析

同位素产额比,在此定义为:对于同一种元素,某种丰中子或缺中子的同位素与它的稳定同位素的产额之比值.图 1 显示了 $^{36}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 反应中 5° 处出射的 $3 \leq Z \leq 10$ 的类弹碎片同位素产额比随粒子单核子动能的变化关系.这些元素的能谱都有非常大的展宽,说明在这些粒子出射时经过了不同程度的耗散.从图中可以看出,对于丰中子同位素,如 $^8\text{Li}, ^{10}\text{Be}, ^{11}\text{B}, ^{13}\text{C}, ^{16}\text{N}, ^{20}\text{F}$ 等,它们同稳定同位素的产额比随能量的升高而减小,对于缺中子同位素,如 $^6\text{Li}, ^7\text{Be}, ^9\text{B}, ^{11}\text{C}, ^{14}\text{N}, ^{18}\text{F}$ 等,它们同稳定同位素的产额比随能量的升高而增加,这种变化趋势说明随着能量的升高,类弹粒子的发射更趋向于少中子的核素.图 2 显示了对于 B, C, N 和 O 几种元素,它们的产物平均中质比随动能的变化关系.在低能端,平均中质比较大,而在高能端,平均中质比变小,但对于较轻的核,它的平均中质比仍偏大.考虑到两系统的中质比 N/Z 分别为 $1.18(^{36}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn})$ 和 $1.35(^{36}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn})$,而弹核的 N/Z 为 1.0 ,图 2 的结果意味着,随着能量的减小,产物平均中质比逐渐由弹核的

N/Z 向系统的 N/Z 过渡. 考虑用出射动能反映耗散的程度或作用时间, 如果假设在类弹粒子出射之前, 同位旋弛豫已达到平衡, 那么丰中子和缺中子与稳定核素的同位素产额比按出射能量展开都应近似保持一常数, 平均中质比也应等于平衡的复合体系的平均中质比, 而不应该随出射能量发生变化. 但我们的结果显示, 5° 处的产物在同位旋自由度达到平衡之前就已经发射.

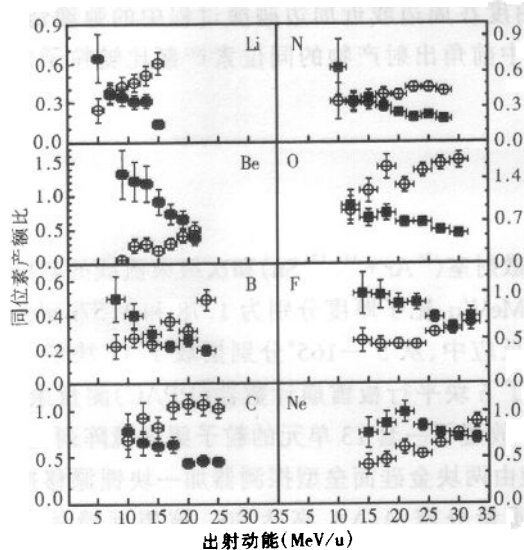


图 1 $35\text{MeV/u } ^{36}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 反应中 5° 处测量到的各种同位素产额比随出射动能的变化关系
对 $^{36}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 反应体系有相似的结果.

○ $^6\text{Li}/^7\text{Li}$, $^7\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$, $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$,
 $^{18}\text{F}/^{19}\text{F}$, $^{20}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$; ■ $^8\text{Li}/^7\text{Li}$, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{12}\text{B}/^{11}\text{B}$,
 $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$, $^{16}\text{N}/^{15}\text{N}$, $^{18}\text{O}/^{17}\text{O}$, $^{20}\text{F}/^{19}\text{F}$, $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$.

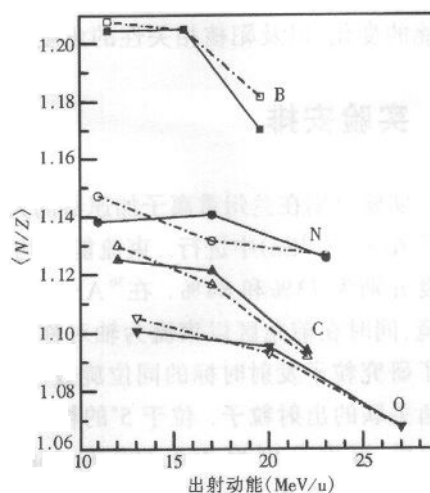


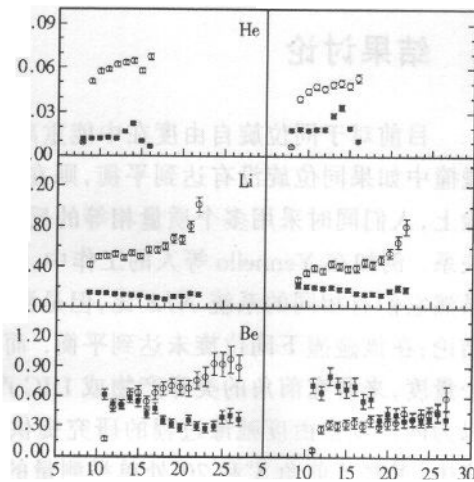
图 2 $^{36}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ (实心) / ^{124}Sn (空心) 中 B, C, N, O 4 种元素的各种同位素的平均中质比随出射能量的变化

图 3 显示 $^{40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中在 20° 测量的 He, Li, Be 的同位素产额比. 在很大的能量范围内, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^6\text{He}/^4\text{He}$ 的变化非常平缓, 对于 Li 元素, 除了在 20MeV/u 以上 $^6\text{Li}/^7\text{Li}$ 的比值有点增大外, 同位素产额比也近乎为常数. 而对于 Be 元素, 缺中子同位素产额比随能量的增加而增加, 丰中子同位素产额比随能量的增加而减小. 这可以由 20° 角 IMF 来源的复杂性加以解释. 在这个角度, 复杂碎片既可来源于耗散过程, 其能量反映耗散程度, 同位素产额比反映同位旋自由度的输运程度; 它也可来源于热核的平衡发射, 其能量呈麦克斯韦分布, 同位素比对应于一个常数. $^7\text{Be}/^9\text{Be}$ 和 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 的不同行为表明 Be 的主要产物来源于同位旋达到平衡之前的耗散过程, 对于 He 和能量小于 20MeV/u 的 Li, 已经有很大的平衡成分.

从上述的结果还可以看出, 不管是在 20° 还是 5° , ^{112}Sn 和 ^{124}Sn 两靶核系统中的同位素比变化行为非常类似. 但是如果假设在这些反应中同位旋弛豫达到平衡, 那么同位素比的绝对值应该有一定的靶核相关性或者说系统相关性. 图 4 比较两个靶核系统的各组同位素产额比, 图中 $R(i/j)$ 由下式定义

$$R(i/j) = \frac{(Y_i/Y_j)_{124}}{(Y_i/Y_j)_{112}} \quad (1)$$

式中 Y_i/Y_j 为 i 和 j 两种同位素产额比, 下标 124 和 112 分别代表 ^{124}Sn 和 ^{112}Sn 两靶核系统. 由图可见, 在 5° 时不管是丰中子还是缺中子同位素, 它们与稳定同位素的产额比在 $^{36}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{36}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 两个系统中是近乎相等的, 即两个系统的比值均接近于 1, 没有表现出明显的靶核相关性. 而在 20° 时, $^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 反应中, 缺中子与



表现出明显的靶核相关性. 由此也可以说明, 在 20° 处已经有很大一部分同位旋平衡成分的贡献, 而 5° 处的产物在同位旋自由度建立平衡之前就已经从双核系统中分离. 随着角度的增大或是弛豫时间的增加, 同位旋由非平衡向平衡逐渐过渡.

图 3 $35\text{MeV/u} \text{ }^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ (左)和 ^{124}Sn (右)反应中 20° 处测量到的各种同位素产额比随动能的变化关系
 \circ $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^6\text{Li}/^7\text{Li}$, $^7\text{Be}/^9\text{Be}$; \blacksquare $^6\text{He}/^4\text{He}$, $^8\text{Li}/^7\text{Li}$, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$.

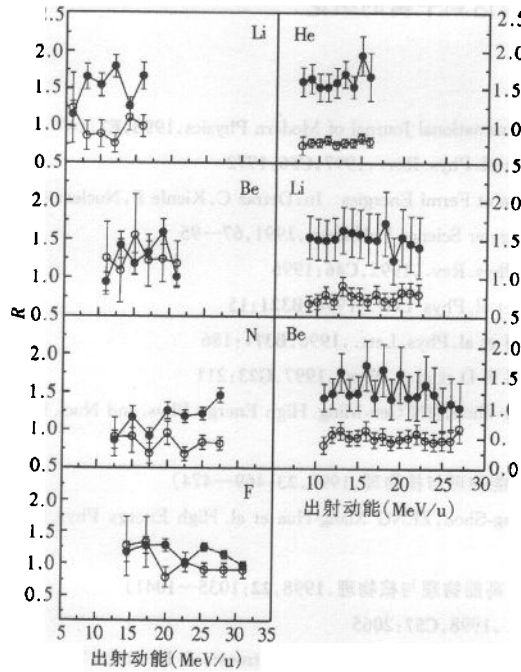


图 4 同位素产额比在两个靶核系统中的比较

左图为 5° 处 $^{36}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 与 $^{36}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 的比较, 右图为 20° 处 $^{40}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 与 $^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 的比较.
 \circ $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^6\text{Li}/^7\text{Li}$, $^7\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$, $^{18}\text{F}/^{19}\text{F}$; \bullet $^6\text{He}/^4\text{He}$, $^8\text{Li}/^7\text{Li}$, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{16}\text{N}/^{15}\text{N}$, $^{20}\text{F}/^{19}\text{F}$.

4 结果讨论

目前对于同位旋自由度在中能重离子碰撞中的弛豫研究是基于这样的思路:在中心碰撞中如果同位旋没有达到平衡,则在所有的碰撞参数下同位旋都不会达到平衡.在实验上,人们同时采用多个质量相等的反应体系,研究同位素产额比随体系 N/Z 比的变化关系.例如在 Yennello 等人的工作中,对于 $53\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$ 和 $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$ 两个体系,虽然它们有相同的系统 N/Z 比,但是测量到的同位素产额比却有很大的差异,由此得出结论:在该碰撞下同位旋未达到平衡.而本文以动能作为耗散强度,或者是作用时间的一个量度,来研究前角的类弹产物或 DIC 产物的同位素产额比随能量的变化关系,或许可以为同位旋自由度弛豫过程的研究提供一个方法.我们在 $35\text{MeV/u } ^{36,40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中,考察了前角 5° 和 20° 处单举测量的同位素产额比随粒子出射能量的变化关系,结果发现丰中子核与稳定核的产额比随粒子出射动能的增加而减小,而缺中子核与稳定核的产额比随动能的增加而增加.这种行为对两个靶核系统是相似的,但是同位素产额比的绝对值在 5° 没有靶核相关性而在 20° 处却表现出明显的靶核相关性.对于某种元素,随着动能的减小,或者说两体作用时间的增加,其平均中质比并没有保持不变,而是逐渐由弹核的 N/Z 比向系统的 N/Z 比过渡.这些现象支持在我们的入射能量下,周边或近周边碰撞过程中同位旋没有完全达到平衡的结论.

参考文献 (References)

- 1 LI B A, Ko C M, Bauer W. *International Journal of Modern Physics*, 1998, **E7**:147
- 2 Johnston H, Ehite T, LI B A et al. *Phys. Rev.*, 1997, **C56**:1972
- 3 Olimi A. Dissipative Phenomena at Fermi Energies. In: Detraz C, Kienle P, *Nuclear Collisions from the Mean-Field into the Fragmentation Regime*. Elsevier Science Publishers, 1991, 67—95
- 4 Lozhkin O V, Trautmann W. *Phys. Rev.*, 1992, **C46**:1996
- 5 Yennello S J, Young B, Yee J et al. *Phys. Lett.*, 1994, **B321**:15
- 6 Johnston H, White T, Winger J et al. *Phys. Lett.*, 1996, **B371**:186
- 7 CHEN L W, GE L X, ZHANG X D et al. *J. Phys.*, 1997, **G23**:211
- 8 CHEN Lie-Wen, ZHANG Feng-Shou, JIN Gen-Ming. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1999, **23**:469—474 (in Chinese)
(陈列文, 张丰收, 靳根明. *高能物理与核物理*, 1999, **23**:469—474)
- 9 CHEN Lie-Wen, ZHANG Feng-Shou, ZENG Xiang-Hua et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1998, **22**:1035—1041 (in Chinese)
(陈列文, 张丰收, 曾祥华等. *高能物理与核物理*, 1998, **22**:1035—1041)
- 10 LI B A, Ko C M. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:2065
- 11 LI Zu-Yu, WU He-Yu, XIAO Zhi-Gang et al. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2000, **20**:161—170 (in Chinese)
(李祖玉, 吴和宇, 肖志刚等. *核电子学与核探测技术*, 2000, **20**:161—170)
- 12 WU He-Yu, XIAO Zhi-Gang, LI Zu-Yu et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1999, **23**:1115 (in Chinese)
(吴和宇, 肖志刚, 李祖玉等. *高能物理与核物理*, 1999, **23**:1115)

Relaxation of Isospin Degree of Freedom in the Reactions **$^{36}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ at 35MeV/u***

XIAO Zhi-Gang WU He-Yu LI Zu-Yu JIN Gen-Ming WANG Hong-Wei
DUAN Li-Min ZHANG Bao-Guo HU Rong-Jiang WEI Zhi-Yong LIU Yong-Ying
WANG Su-Fang LU Zhao-Hui ZHU Yong-Tai ZHU Hai-Dong

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

Abstract Isotope ratios, defined as the yield ratio of two isotopes with the same charge, were analyzed as a function of kinetic energy of outgoing particles at 20° in the reactions of $^{40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ and 5° in $^{36}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ at incident energy of 35MeV/u. Isotope ratios between the neutron-deficient isotopes and stable isotope increase with kinetic energy, while those between the neutron-rich isotopes and stable isotope decrease. This different behavior was observed similar for both ^{112}Sn and ^{124}Sn targets. The isotope ratios show rather obvious target dependence at 20° and little target dependence at 5° . As the outgoing energy getting down, the N/Z ratio of the fragmentation products at 5° diverts gradually from the N/Z ratio of the projectile to that of the system. These observations indicate that the isospin degree of freedom does not reach complete equilibrium in the peripheral or semi-peripheral collision at this bombarding energy.

Key words isotope ratio, peripheral collision, isospin degree of freedom

Received 31 May 2000

* Supported by Major Subjects of CAS (KJ95T-03) and 100 Persons Project of CAS and NSFC(19735010)