

8—24 MeV/u ^{40}Ar 离子和 ^{197}Au 相互 作用中靶余核的研究

孙彤玉 李文新 吴定清 尹新民 赵莉莉 张 翔
秦 芝 郑纪文 刘国兴 靳根明 赵之正

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

用核化学技术研究了 8.2、12.1、16.2、20.0 和 24.2 MeV/u ^{40}Ar 离子和 ^{197}Au 相互作用中, 反应余核的激发函数和碎片的反冲性质。根据反冲性质讨论了各种反应余核可能的生成机制, 指出裂变产物截面和重靶余核生成截面与 ^{40}Ar 离子能量依赖关系。

关键词 γ 能谱 激发函数 裂变碎片 周边碰撞

中能(10—200 MeV/u)重离子反应处于由平均场控制的低能(< 10 MeV/u)反应和由核子-核子碰撞起主要作用的高能(> 200 MeV/u)反应之间的过渡能区。近年来, 研究这个过渡能区核反应机制的演化以及观察新的原子核运动形式和特征, 已成为人们普遍关注的课题。文献[1—4]用核化学技术在 20—46 MeV/u 能量范围内测定了 ^{12}C 离子和天然铜相互作用中靶碎片的质量分布和线性动量转移及其与入射能的依赖关系。把类似的研究拓广到更重的碰撞体系中, 是非常有意义的, 因为此时核裂变过程将成为一个重要的反应道。

Loveland 等^[5]曾报道了 16 MeV/u ^{32}S , 32、44 MeV/u ^{40}Ar 和 ^{197}Au 的相互作用中靶碎片的截面、质量分布和角分布, 观察到裂变产物截面和重靶余核的生成截面与重离子入射能量的依赖关系, 并以角分布的对称性分析了裂变碎片产生的不同裂变过程的平衡特点。这两个问题是当前中能重离子碰撞研究的热点, 因为它涉及到中能重离子碰撞是否形成已达到热平衡的高激发的热核以及形成的热核的性质和衰变模式。基于相似的研究目的, 我们使用离线 γ 能谱法, 并配合厚靶-厚收集箔技术测量了 8.2—24.2 MeV/u 的 ^{40}Ar 离子和 ^{197}Au 相互作用中靶碎片的截面、质量分布和前向平均反冲射程, 选择重离子的入射能量处于低能区到中能区的低能端, 目的是为了细致和系统地研究从低能到中能范围内 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应机制的演化特征。本文是该工作的第一部分, 旨在研究靶碎片的激发函数及前向平均反冲射程。

1 实验部分

1.1 靶子和照射

靶子采用厚度为 $12.4\text{--}15.2\text{ mg/cm}^2$ 、纯度为 99.99% ^{197}Au 箔。Au 靶夹在作为前后冲收集箔的 Al 之间(前冲收集箔为 $8\text{--}11.6\text{ mg/cm}^2$, 后冲收集箔为 2 mg/cm^2), 组成一个靶单元。整个靶组由 5 个相同的靶单元组成, 每 2 个靶单元之间, 插入适当厚度的 Al 作为降能箔。照射在中国科学院近代物理研究所重离子研究装置 HRFL 上进行, 初始能量为 25 MeV/u 的 ^{40}Ar 离子通过 Al 和 Au 箔后, 在每片 Au 靶的中心能量依次为 $24.2, 20.0, 16.2, 12.0$ 及 8.2 MeV/u 。照射时间为 15 h , 用法拉第筒、电流积分器和定标器测量束流强度, 总积分束流为 $609\text{ }\mu\text{C}$ 或 2.53×10^{14} 个 ^{40}Ar 离子。

1.2 γ 能谱测量

照射结束后, Au 靶以及前后冲收集箔上的 γ 放射性用效率已经刻度的 4 台高纯锗探测器测量, 探测器的相对效率为 $15\% \text{--}40\%$, 能量分辨在 $2.1\text{--}2.5\text{ keV}$ (对 ^{60}Co 的 1332 keV γ 线) 范围内。脉冲幅度分析器和数据获取系统, 由一套微机和美国 ORTEC 公司的 919 多道缓冲器组成, 测量在照射结束后 30 min 开始, 并持续了 3.5 个月(测量到 6 星期后, 每隔 1 个月测量 1 次), 除了后冲箔每个样品测量 11 次外, 其余每个样品均测量 21 次, 总共获得 300 多个 γ 能谱。

1.3 数据处理

数据处理在 VAX-8350 计算机上进行, γ 能谱用 SAMPO 程序分析, 衰变曲线用 TAU 88 程序在 Tektronix-4014 图象显示终端上分解。放射性核素鉴别和截面计算方法见参考文献 [6, 7], 计算截面用的核数据引自参考文献 [8], 每一核素的靶与前后冲收集箔上的放射性活度之和被用来计算生成截面, 计算截面时, ^{40}Ar 离子的电荷态取 15。

2 结果和讨论

用离线 γ 能谱法鉴定了由 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应产生的从 ^7Be 到 ^{198}Au 约 130 个放射性靶余核, 这些余核分布在靠近 β 稳定线的两侧, 大部分是缺中子核素, 除了少数核素由于计数较低引起较大误差外, 大部分截面的相对标准偏差约为 10% , 它包括 γ 谱分析误差, 最小二乘法分解衰变曲线误差, 探测效率误差以及束流误差等, ^{40}Ar 离子入射弹核能量计算的误差未包括在内。

2.1 激发函数由截面数据得到约 60 个靶碎片的激发函数。为了讨论 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中靶碎片生成的可能反应机制, 根据碎片质量数 A 把靶碎片大致分成 3 组: 中质量碎片 ($A < A_t/3, A_t$ 为靶质量数 197); 重靶余核 ($A > 2/3 A_t$) 和裂变碎片 ($A_t/3 < A < 2/3 A_t$)^[5]。一些典型的激发函数示于图 1。

在中能重离子反应中, 中质量碎片通常认为起源于热核的多重碎裂或级联两体衰变。文献 [9] 发现, 中质量碎片的生成截面在中能区随着重离子入射能增加而增加。但是在本实验中, 从图 1(a) 看到, 在入射能大于 20 MeV/u 的中能区, 中质量碎片都随能量增加而减小。其原因是本实验中使用了 Al 作收集箔和降能箔, 实验观察到的所谓中质量碎片主要产生于 ^{40}Ar 离子和 ^{27}Al 的全熔合和非完全熔合后的蒸发过程, 另一部份产物来自于准弹性转移反应或深部非弹性碰撞以后的粒子余核。此外, ^7Be 、 ^{23}Na 和 ^{24}Na 的反冲射程相当大, 已超过了本实验中的 ^{197}Au 靶和 Al 收集箔的厚度, 因此测定的截面已严重“失真”, 这就是这一类产物和 ^{28}Mg 、 ^{43}K 等的激发函数不同的原因。鉴于上述情况, 以下仅讨论裂变碎片和重靶余核的特征。

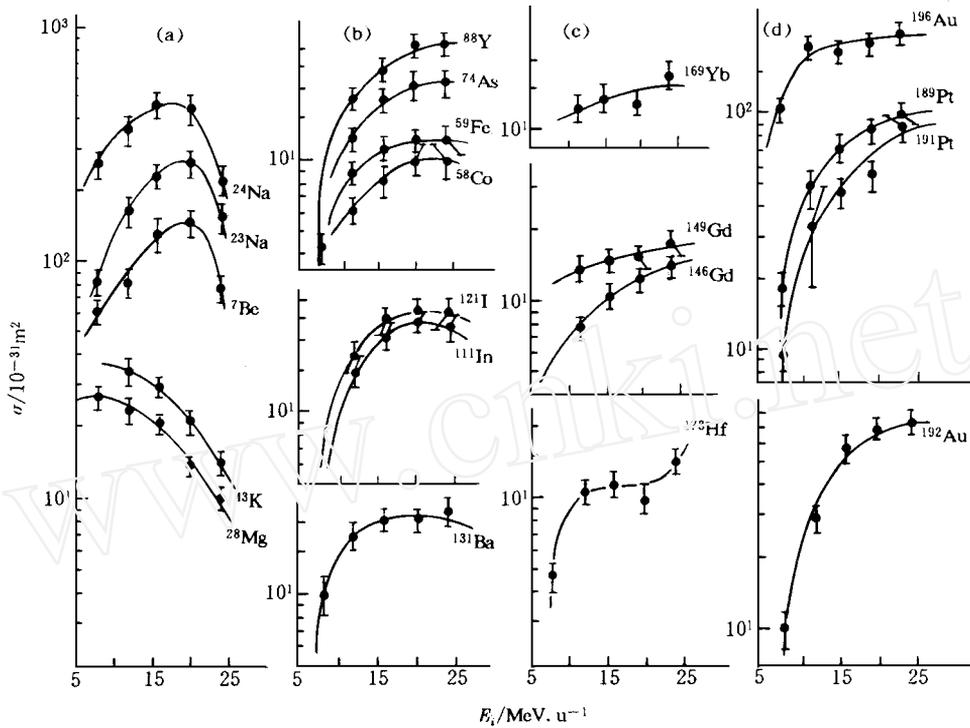


图 1 8—24 M eV /u ⁴⁰Ar 和 ¹⁹⁷Au 相互作用中靶余核的激发函数
(a)——中质量碎片; (b)——裂变碎片; (c), (d)——重靶余核

在入射能 < 20 M eV /u 时, 裂变产物的截面随着入射能的增加而增加(见图 1 (b))。这些裂变产物起源于 ⁴⁰Ar 离子和 ¹⁹⁷Au 近中心碰撞中非完全熔合生成的类熔合核的裂变, 在这个能区, 裂变产物截面随入射能量增加而增加, 当 ⁴⁰Ar 能量接近 20 M eV /u 时, 裂变产物截面趋于平缓, 入射能量增加到 24 M eV /u 时, 有下降趋势。这意味着在从低能向中能区过渡时, 裂变产物截面存在一个最大值, 这现象在一些在线测量的物理实验中也多次观察到。裂变产物截面随入射能量增加而下降的原因可能是: (1) 入射能量增加, 非完全熔合趋势增强, 使得类熔合核的质量和原子序数下降, 因而裂变几率也下降; (2) 较高入射能形成高激发的热核后, 裂变由于是一个较慢的 (~ 10⁻¹⁵ s) 集体运动, 因而不再成为主要的退激发模式, 新的退激发模式, 如多重碎裂开始起着重要的作用。

在低能反应中, 重靶余核可能是熔合蒸发余核、深部非弹性碰撞的类靶余核以及准弹性转移产物。在中能区导致类熔合的中心碰撞几率下降, 周边碰撞几率增大, 重靶余核是周边碰撞的产物, 因此在本实验涉及到的整个能区重靶余核的截面随入射能量而增加(见图 1 (c), (d))。

2.2 靶余核的反冲性质

使用厚靶-厚收集箔技术, 可以从前后向反冲收集箔以及靶中的放射性活度得到与靶余核反冲性质有关的 F/B 和 FW 值, 其中 F 和 B 分别为前后向收集箔中某一核素活度占该核素总活度的相对分数, W 为靶厚 (mg/cm²)。根据 F/B 和 FW 值对余核作运动学分析, 有可能提

供关于余核生成的反应机制的信息。

F/B 为余核前后向发射比,表示反应余核反冲时在前角度成峰的程度,并且是角分布和反冲射程的综合量度。图 2 显示了 $20\text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中余核的前后向发射比 F/B 值与产物质量数的关系。在低能反应或中能的中能端能区的重离子反应都伴随较大的线性动量转移,因此大部分反应产物的角分布都强烈前冲,再由于实验中 ^{40}Ar 离子束流强度的限制,未能在后冲收集箱中测到更多的反应产物的活度,只有裂变碎片才会在后冲收集箱中存在较大的活度,其原因在于重离子碰撞第一阶段生成的类熔合裂变核是非常前冲的,但在反应第二阶段即裂变过程中,裂变碎片发射的角分布在运动系中是关于 90° 成对称的^[10]。

FW 则近似为反应余核在靶中前向平均反冲射程。 $20\text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar}$ 离子和 ^{197}Au 相互作用中碎片的前向平均反冲射程 FW 值和碎片质量数的依赖关系示于图 3 中。 FW 值随着碎片质量数增加而迅速下降,质量数 A 处于 $1/3A_t$ 和 $2/3A_t$ 之间的裂变碎片有较大的 FW 值,因为在本文所涉及到的能区,裂变碎片的动能主要由裂变核断裂时两碎片之间的库仑能决定,因而裂变碎片有较大的反冲射程 FW 值。此外裂变碎片动能应该与入射能没有明显的依赖关系,这在图 4 所显示的若干反应产物的 FW 值与入射能依赖关

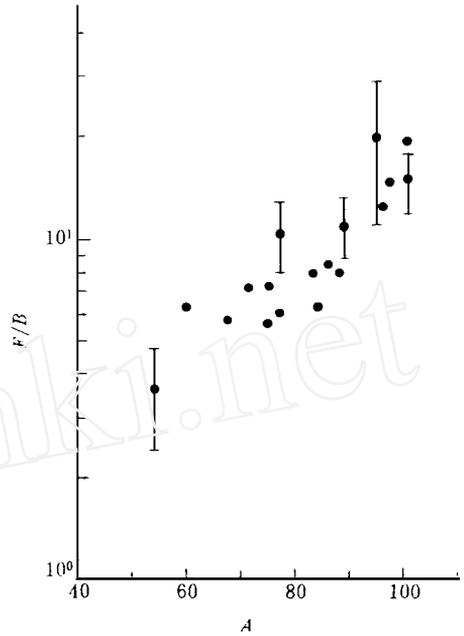


图 2 $20\text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应的 F/B 值与产物质量数的关系

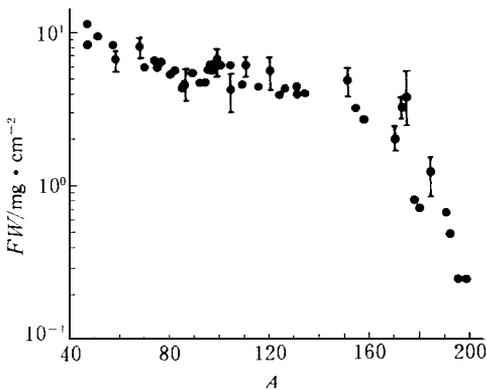


图 3 $20\text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应产物的 FW 值和碎片质量数的依赖关系

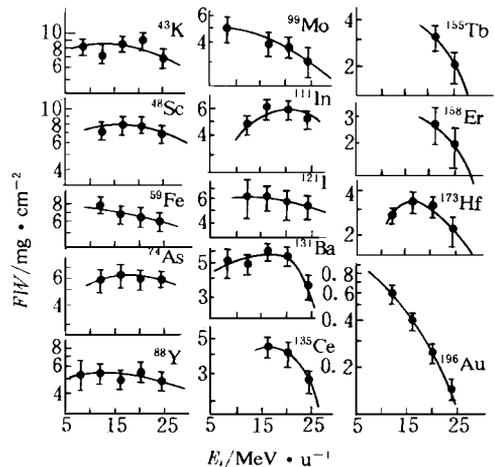


图 4 $8\text{--}24\text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 相互作用中若干余核的 FW 值与轰击能量的依赖关系

系上也得到证实。由此可见,在 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中,质量数 $1/3A_t < A < 2/3A_t$ 的碎片确系裂变碎片,在本实验涉及的较低的入射能区,它们主要产生于非完全融合后的裂变反应。

本实验中获得的关于重靶余核的反冲性质数据比较少,从图3看到的重靶余核的平均反冲射程 FW 值非常低,这与它们起源于周边碰撞的预言相一致,在这种反应中,被碰撞的靶核只接受到很少一点线性动量。例如在 $85\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}$ 反应中,质量数为180的重靶余核的反冲动能不到 $100\text{keV/u}^{[11]}$,在这样的情况下,要以存在大量裂变产物的前冲收集箔中鉴别放射性活度很低的重靶余核确是相当困难的,但从图4仍能看到重靶余核的反冲射程随着入射能量增加而减小,这与中能重离子碰撞中有关线性动量转移的实验结果相一致^[4,11]。

3 结 论

在 $8.2\text{—}24.2\text{MeV/u}$ 的 ^{40}Ar 离子与 ^{197}Au 相互作用时,裂变反应的截面随入射重离子能量增加而增加,当入射能量达到约 20MeV/u 时,裂变产物截面不再增加,而且随入射能增加呈现下降趋势,而重靶余核的截面却不断增加,这两种截面的竞争和消长的演变和中能重离子碰撞中热核的形成以及其衰变模式有重要联系,这个现象的物理本质需要在实验和理论上作进一步研究。重靶余核的反冲动能非常低,在线的纯物理实验中,各类固体探测器或气体电离室由于存在固有的“截止阈”,探测这些低速运动的重碎片非常困难,因此核化学技术成了研究中能重离子反应中重靶余核生成的重要手段,为了得到更多的实验资料,必须对重靶余核进行合适的放射化学分离。

孙儒林、牟万统、杨维凡和于暹参加了部分加速器实验。张立、赵进华提供了靶室。文万信在计算程序上给予帮助,HRFL和VAX-8350全体运行人员为完成实验提供了良好的工作条件,谨表谢意。

参 考 文 献

- 1 孙彤玉,李文新,吴定清,等. 20—46 MeV/u ^{12}C 离子和铜的相互作用中靶余核的研究 I. 靶余核的产额及其分布. 核化学与放射化学, 1993, 15(2): 65
- 2 孙彤玉,李文新,吴定清,等. 20—46 MeV/u ^{12}C 离子和铜的相互作用中靶余核的研究 II. 靶余核的质量产额分布. 核化学与放射化学, 1994, 16(2): 109
- 3 吴定清,李文新,孙彤玉,等. ^{12}C 离子与铜相互作用中的平均线性动量转移. 核化学与放射化学, 1995, 17(2): 73
- 4 Li Wenxin, Sun Tongyu, Wu Dingqing, et al Target Residues From the Interaction of Copper With 20—46 MeV/nucleon ^{12}C Ions Radiochim Acta, 1996, 72: 109
- 5 Loveland W, Aleklett K, Sihver L, et al Changes in Target Fragmentation Mechanisms With Increasing Projectile Energy in Intermediate Energy Nuclear Collisions Phys Rev, 1990, C41: 973
- 6 李文新,孙彤玉. 核化学研究中 γ 能谱测量和分析. 原子能科学技术, 1990, 24(2): 60
- 7 孙儒林. 核化学研究中 γ 能谱分析法的改进. 核技术, 1993, 16(1): 15
- 8 Reus U, Westmeier W. Gamma-ray Catalog At Data Nucl Data Tables, 1983, 29(2): 205
- 9 Loveland W, Aleklett K, Scaborg GT. Target Fragmentation in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions Nucl Phys, 1985, A 447: C101
- 10 刘国兴,陈克良,于暹,等. 600 MeV $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应碎片角分布. 高能物理与核物理, 1995, 19: 305

- 11 Aleklett K, Loveland W, Lizenin J O, et al Heavy Residue Properties in Intermediate Energy Nuclear Collisions. In: Luo Yixiao ed Proceedings of International Symposium on Heavy Ion Physics and Its Application. Singapore: World Scientific Press, 1990 140

TARGET RESIDUES FROM THE INTERACTION OF GOLD WITH 8—24 MeV/NUCLEON ^{40}Ar IONS

Sun Tongyu Li Wenxin Wu Dingqing Yin Xinmin Zhao Lili Zhang Xiang
Qin Zhi Zheng Jiwen Liu Guoxing Jing Genmin Zhao Zhizheng

(Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

ABSTRACT

The excitation functions and recoil characteristic of the target fragments have been studied from the interaction of gold with 8.2, 12.1, 16.2, 20.0 and 24.2 MeV/nucleon ^{40}Ar ions using nuclear chemical techniques. The possible formation mechanisms for various reaction residues are discussed on the basis of the recoil characteristic. Variation of the cross sections from heavy target residues with energies of ^{40}Ar ions is indicated.

Key words γ Spectroscopy Excitation function Fission fragment Peripheral collision

中国核化学与放射化学学会第五届理事会组成

理事长: 王方定

副理事长: 王祥云 刘伯里 严叔衡 杨裕生 柴之芳 徐景明 顾忠茂 傅依备

常务理事: 王方定 王祥云 刘伯里 李大明 李文新 罗上庚 陈式 张利兴 严叔衡
杨裕生 祝霖 顾忠茂 徐景明 柴之芳 傅依备

理事: 王方定 王玉琦 王功鹏 王祥云 王榕树 毛家骏 戈晓海 王旭辉 包伯荣
叶玉星 叶明吕 田伍训 孙兆祥 孙培铨 刘元方 刘伯里 朱霖 朱永贻
朱建华 齐占顺 伏永杭 陈式 李大明 李大康 李文新 李茂良 严叔衡
汪小琳 张天梅 张丕禄 张利兴 沙边茂 何阿弟 何建玉 宋崇玉 杨维凡
杨裕生 范我 范显华 罗上庚 罗顺忠 林灿生 林漳基 金建南 郑成法
祝霖 钟广涛 侯小琳 贺佑丰 陶祖贻 郭景儒 柴之芳 高宏成 唐志刚
顾忠茂 顾鼎祥 徐景明 黄奕普 梁俊福 贾瑞和 崔海平 强亦忠 彭子城
傅依备

秘书长: 李大明

副秘书长: 毛家骏 齐占顺 唐志刚 崔海平

(李大明 供稿)