

## 中能 $^{12}\text{C}$ 离子轰击铯靶的 超靶余核截面测量\*

李宗伟 杨维凡 赵之正 杨永峰 秦 芝

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

用核化学方法测量了入射能量为  $47\text{M eV}/\text{A}$   $^{12}\text{C}$  离子轰击铯靶的超靶产物钷的生成产额, 并用放射化学分离方法和离线  $\gamma$  谱方法进行确定。从测量结果可知, 获得的超靶产物的截面都比较大(与低靶产物相比)。而且钷同位素的分布峰位的最可几质量数为  $A_p = 129.7 \pm 0.2$ , 其分布宽度参数  $\sigma_Z = 2.76 \pm 0.28$ 。

关键词 超靶产物 融合反应 化学分离 产额 重离子核反应

在入射能量接近库仑位垒, 用较轻的重离子轰击重靶核时, 产生的融合反应是其主要的反应道。在这样的核反应中, 蒸发粒子(主要是中子)过程的贡献比较大。在用低能  $25\text{—}34\text{M eV}$   $^{6,7}\text{Li}$  离子轰击铯靶反应中<sup>[1]</sup>, 发现转移一个或两个电荷的产物截面比融合-蒸发反应产生的截面要高。根据轻离子的发射能谱<sup>[2]</sup>, 它们在厚靶中有较大的产额。然而, 在中能重离子引起的核反应中, 炮弹碎裂或靶核碎裂有可能产生一些轻离子( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^8\text{Be}$  等), 使得靶核俘获轻离子成为可能, 并形成质量转移, 发生全融合或非全融合反应。同时, 当炮弹有较高的入射能量时, 全融合或非全融合反应导致了该系统有较高的激发能, 而且产生裂变和多粒子转移的衰变现象。在这样的条件下, 超靶产物的截面将降低。在中能 $^{12}\text{C}$  与铋和铅靶相互作用下, 利用离线  $\alpha$  和  $\gamma$  谱的测量也得到了超靶产物 Bi, Po, At 和 Rn 等元素的截面<sup>[3]</sup>。Alekkett 等人<sup>[4]</sup> 用  $8.5\text{M eV}/\text{A}$ 、 $19\text{M eV}/\text{A}$  的  $^{16}\text{O}$  和  $35\text{M eV}/\text{A}$ 、 $85\text{M eV}/\text{A}$  的  $^{12}\text{C}$  离子轰击丰中子稀土靶 $^{154}\text{Sm}$ , 从测得碎片的同位素产额发现随着炮弹能量的增加, 其同位素峰明显降低。

本文用  $47\text{M eV}/\text{A}$   $^{12}\text{C}$  离子与  $^{133}\text{Cs}$  厚靶反应, 测量超靶产物 Ba 的产生截面, 试图获得中等质量区的超靶产物的产额分布, 得到增加电荷数时产物的最可几质量数。

\* 中国科学院“八·五”重大课题资助项目

收稿日期: 1996-01-25 收到修改稿日期: 1997-03-10

## 1 实验部分

### 1.1 照射和化学分离

在中国科学院近代物理研究所的重离子回旋加速器(HIRFL)上用入射能量为 47 MeV/A  $^{12}\text{C}$  离子轰击  $\text{CeNO}_3$  粉末靶(光谱纯),靶物质的厚度为  $560 \text{ mg/cm}^2$ 。根据 Ziegler<sup>[5]</sup>的能量射程关系曲线, $^{12}\text{C}$  离子在靶中心的能量减到 40 MeV/A 左右。该靶物质装在一内径为 15 mm 的铜靶室中,并置于法拉第筒底部。靶子前方用一直径为 10 mm 的准直光栏限定束流。实验中的平均束流强度为 5—10 nA,持续照射时间为 1.5 h,同时用束流积分器监测束流随照射时间的变化。照射结束后,将靶物质混合均匀,取其中的一份用于直接测量,剩余的辐照样品用于化学分离,其分离和纯化流程如下:

(1) 在一 50 mL 烧杯中分别加 10 mg La 和 Ba 载体,同时加 10 mL 蒸馏水和 1 mL 浓  $\text{HNO}_3$  以溶解辐照后的样品,加 5 滴 50%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液,得  $\text{BaSO}_4$  沉淀,离心,沉淀用于钡的纯化。

(2) 在上层清液中加入 5 滴 10 mol/L NaOH 至碱性,离心,得  $\text{La}(\text{OH})_3$  沉淀,用于稀土的纯化。

(3) 在  $\text{BaSO}_4$  沉淀中加入 20 mL 50%  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,在沸水中煮沸 10 min,离心,弃去上层清液。往沉淀中加入 2 滴浓 HCl 和 10 mL 水,在电炉上赶  $\text{CO}_2$ ,加 4 滴 50%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液,用蒸馏水和酒精各洗沉淀一次,在电炉上烘干,得到固体  $\text{BaSO}_4$  测量源。

(4) 往  $\text{La}(\text{OH})_3$  沉淀中加入数滴 11 mol/L  $\text{HNO}_3$  直至沉淀溶解,并加 5 mg Ce 载体,加数滴  $\text{K}_2\text{CO}_3$  溶液,将  $\text{Ce}^{3+}$  氧化为  $\text{Ce}^{4+}$ ,用丙酮萃取两次。

(5) 用 NaOH 将萃余水相调至甲基橙呈黄色,滴加 2 滴 6 mol/L  $\text{HNO}_3$  至红色,加 10 mL 8% 草酸溶液,得 La 沉淀和其它稀土测量源。

(6) 用 0.1 mol/L 的 HCl 洗有机相,加 1 mL 1 mol/L  $\text{HNO}_3$  和 1 滴 10%  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,反萃两次,在萃余水相中加入几滴  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,并用乙醚萃取两次,在红外灯下烘干有机相,得 Ce 测量源。

经过对测量谱(直接和化学分离样品)的数据分析,得到上述化学分离产物的化学产额大于 50%。

### 1.2 $\gamma$ 射线谱的测量及数据分析

实验测量方法及数据获取系统的死时间修正参见文献[6]。将测量的  $\gamma$  时间序列谱转至 VAX-8350 图示终端计算机上进行分析,用 SAMPO 程序<sup>[7]</sup>解谱来确定测量到的  $\gamma$  谱的全能峰下面积。依据核素的半衰期、分支比、HPGe 探测器谱仪的探测效率、束流强度、靶核素以及化学产额,用下述公式计算由 LEONE 程序获得的少量小截面核素的产生截面:

$$\sigma = \frac{S \cdot e^{-\lambda t_1}}{N \cdot \epsilon_{\gamma} \cdot \eta_{\gamma} \cdot \eta_c \cdot (1 - e^{-\lambda t_2}) \int_0^t I(t) e^{-\lambda t} dt}$$

式中,  $S$  为用 LEONE 程序获得的全能峰下面积,  $\lambda$  为核素的衰变常数,  $N$  为靶核素,  $\epsilon_{\gamma}$  为  $\gamma$  射线的分支比,  $\eta_{\gamma}$  为 HPGe 探测器的探测效率,  $\eta_c$  为化学产额,  $t$  为照射时间,  $t_1$  为照射结束到开始测量的时间,  $t_2$  为开始测量到测量结束的时间,  $I(t)$  为照射期间的束流强度。

通过对测量样品谱的数据分析,获得了一些超靶产物的生成截面,但它们大多数是累积产额,仅有少数核素是独立产额,依据文献[6]的处理方法对获得的截面进行修正,得到超靶产物的独立截面。数据分析中采用的超靶产物的核素、半衰期、主要  $\gamma$  射线能量及相应的分支比参见文献[8],对每一个核素的确定,主要是取分支比高的  $\gamma$  射线对测得的核素进行鉴定。各元素

的化学产额的确定是以直接样品中测得的核素的独立截面与化学分离后相应核素的独立截面之比获得的。

## 2 结果与讨论

实验测得的同位素截面和利用近似于高斯拟合方法得到的独立产额列入表 1, 拟合后获得的结果列入表 2。图 1 给出了中能(47M eV /A)<sup>12</sup>C 离子轰击 CsNO<sub>3</sub> 靶获得的超靶产物钡的同位

表 1 中能<sup>12</sup>C 轰击铯靶中的超靶产物截面

10<sup>-31</sup>m<sup>2</sup>

核素	测量截面	独立截面	核素	测量截面	独立截面
<sup>126</sup> Ba	85.6 ± 6.5	49.0 ± 4.9	<sup>129g+m</sup> Ba	232.7 ± 21.2	106.5 ± 10.6
<sup>127</sup> Ba	143.6 ± 15.2	67.3 ± 7.1	<sup>131g</sup> Ba	203.0 ± 14.8	101.5 ± 10.5
<sup>128</sup> Ba	168.0 ± 13.8	90.0 ± 8.8	<sup>133m</sup> Ba	51.0 ± 5.4	51.0 ± 5.4

表 2 中能<sup>12</sup>C 轰击铯靶中的超靶产物的同位素分布特性

产物核	最可几质量 A <sub>p</sub>	分布宽度参数 σ <sub>Z</sub>	积分截面/10 <sup>-31</sup> m <sup>2</sup>	R
Ba	129.7 ± 0.2	2.76 ± 0.28	756.6 ± 5.3	3.3

注:  $R = (A_{Cs} - A) / (Z_{Cs} - Z)$ , 其中 A<sub>Cs</sub>, Z<sub>Cs</sub>为靶物质(Cs)的质量数和电荷数; A, Z 为产物核(Ba)的质量数和电荷数

素分布曲线。从图 1 可知, 钡的同位素分布峰位较高。而且由表 2 可知, 其同位素分布的最可几质量数为 129.7, 增加一个电荷数(钡)的最可几产物的质量数为 3.3 个质量单位(质量损失  $A = A_T - A_p$ ), 稍低于文献[6, 9]中的结果。但在图 2 的增加质子数(1—5 个)蒸发中子的产

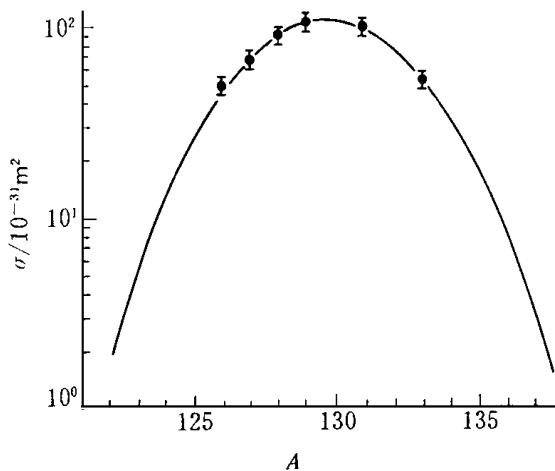


图 1 47M eV /A <sup>12</sup>C 离子轰击<sup>133</sup>Cs 靶时钡同位素的分布曲线图

额曲线分布中,随着质子数的增多,同位素产额下降较快,且有较大的截面。而且在中等质量区,由于没有裂变的竞争,使其同位素产额分布曲线明显大于文献[9]中的测量截面。在文献[9]中,由于使用的是 Pb 和 Bi 靶,附带可能有裂变的竞争,增加一个电荷的同位素分布峰位的最大值为  $50 \times 10^{-31} \text{ m}^2$  左右,而本文的结果其峰位最大值为  $108 \times 10^{-31} \text{ m}^2$ ,很明显有轻粒子作用的影响。

### 3 结 论

使用离线  $\gamma$  谱测量技术获得了超靶产物钷的同位素分布曲线,得到了在没有裂变竞争情形下产物的同位素分布峰位比有裂变竞争时超靶产物的峰位要约高 2 倍,这可能是融合反应的结果。同时也获得了靶核接收 1—5 个电荷的产额分布曲线图。

衷心感谢重离子加速器运行人员对本实验的大力支持,赵莉莉参加了部分工作,谨表谢意。

### 参 考 文 献

- 1 Freiesleben H.  $^6\text{Li}$  Induced Reaction on  $^{209}\text{Bi}$  Phys Rev, 1974, C10: 245
- 2 Glasow R, Kampert KH, Santo R. Light Particle Emission in Reaction With 84 MeV/A  $^{12}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}$  Projectiles GSIA Annual Report, 1982, 29
- 3 Lund T, Molzahn D, Brandt R, et al Radiochemical Studies of Transtarget Nuclei in the Reaction Pb(Bi) + 86 MeV/A  $^{12}\text{C}$ . GSIA Annual Report, 1982: 31
- 4 Aleklett K, Loveland W, Sugihara TT, et al Incomplete and Complete Fusion in Intermediate Energy Heavy Ion Reactions Phys Scr, 1986, 34: 489
- 5 Litmark U, Ziegler JF. Handbook of Range Distributions for Energetic Ions in All Elements Vol 6, New York: Pergamon Press, 1977
- 6 李宗伟, 赵之正, 杨维凡, 等. 中能  $^{12}\text{C}$  离子同厚 Bi 靶反应近靶产物的产额测定. 核化学与放射化学, 1994, 16(3): 178
- 7 Morrissey DJ, Lee D, Otto RJ, et al Measurement of the Product Mass Distributions From Heavy-ion-induced Nuclear Reactions Nucl Instrum Methods, 1979, 158: 499
- 8 Reus U.  $\gamma$  Rays Catalog At Data Nucl Data Tables, 1983, 29(2): 1
- 9 Dolzahn DZ, Lund T, Brandt R, et al Yields of Transtarget Products in the Interaction of 86 MeV/A  $^{12}\text{C}$  Ions With Pb and Bi Targets J Radioanal Chem, 1983, 80: 109

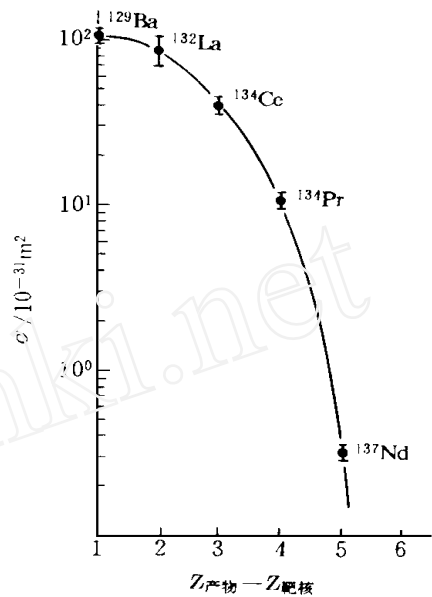


图 2 中能  $^{12}\text{C}$  离子轰击  $^{133}\text{Cs}$  靶时超靶产物的产额曲线

## TRANSTARGET RESIDUE YIELD MEASUREMENT IN INTERACTION OF $^{12}\text{C}$ IONS WITH CESIUM TARGETS

Li Zongwei Yang Weifan Zhao Zhizheng  
Yang Yongfeng Qin zhi

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

### ABSTRACT

The yields of transtarget products produced in the reaction of  $47\text{ MeV}/\text{A}$   $^{12}\text{C}$  ions with cesium compound targets are measured by using nuclear chemical method and the off-line  $\gamma$  spectrum techniques. The results show that the transtarget products have bigger reaction cross sections. The peak position of barium isotope distribution is  $A_p = 129.7 \pm 0.2$  and the distribution width parameter is  $2.76 \pm 0.28$ .

**Key words** Transtarget products Fusion reaction Chemical separation yields Yield Heavy ion nuclear reaction

### 第五届全国核化学与放射化学学术讨论会在北京举行

1997年5月20—23日,第五届全国核化学与放射化学学术讨论会在中国原子能科学研究院举行。来自日本和国内各地的111位代表及放射化学界的老前辈杨承宗、汪德熙、肖伦、吴征铠出席了会议。学会理事长刘元方致开幕词,中国原子能科学研究院院长樊明武致欢迎词,中国核学会秘书长严叔衡、同位素学会理事长王翌善、核化工学会理事长何建玉分别致贺词。汪德熙、吴征铠两位老院士即席发表了热情洋溢的讲话。

本次讨论会共收到论文125篇,基本覆盖了核燃料化学、铜系-镧系元素化学、核化学、放射分析-分离技术及示踪物化学、核药物及标记物化学、环境放射化学等领域近年来的最新成果。通过学术交流、相互学习和借鉴,必将促进我国核化学与放射化学的发展。

本次会议几代放射化学工作者欢聚一堂,盛况空前,作为我国放射化学开拓者的四位老先生虽年事已高退居二线,但仍关注学科的发展。刘元方、王方定、朱永贻、杨裕生院士和许多中青年学者已成为学科带头人。放射化学大有可为,放射化学后继有人。

本次会议期间还举行了理事会和杂志编委会的换届会。王方定任新一届“核化学与放射化学学会”理事长,林漳基任“核化学与放射化学”杂志主编。(李大明 供稿)