

## Ba 同位素的截面测量\*

徐岩冰 杨维凡 袁双贵 肖永厚 潘强岩 李英俊

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 用  $60\text{MeV/u } ^{18}\text{O}$  离子轰击天然铀靶, 通过  $^{238}\text{U}(^{18}\text{O}, \text{X})$  反应产生钡的放射性同位素. 使用放射化学分离方法从被照射过的铀靶中分离出 Ba, 用 HPCGe  $\gamma$  射线探测器测量 Ba 样品的  $\gamma$  射线谱, 经对所得时间累计谱的处理和分析得到了 Ba 同位素的产生截面, 并观察到 Ba 同位素分布中的双峰分布现象.

**关键词** 中能核-核碰撞 放射化学分离 Ba 同位素截面 双峰分布

### 1 引言

多年来, 中能条件下的重离子核-核碰撞研究引起了广泛的关注. 以前的工作主要集中在低能和高能区域, 在低能核-核碰撞条件下, 碰撞系统的行为可通过对其平均场的研究来加以确定; 而在高能核-核碰撞条件下, 反应产物的特性主要由碰撞系统中粒子个体的碰撞行为所决定. 通过对中能条件下核-核碰撞行为的研究, 可以了解到从高能到低能的核-核碰撞行为的过渡性<sup>[1]</sup>.

在重离子同重核的反应中, 只要形成处于高激发态的重核体系, 就会发生裂变. 而其形成机制一般来说十分复杂, 它包含了多种可能的方式, 如直接反应、深度非弹反应、部分融合和全融合反应等, 它们都可能形成发生裂变的核体系. 另一方面, 由于重核裂变时, 体系大都处于高激发态, 壳效应可以忽略, 因而其位能面可用宏观模型计算, 从而简化了理论分析. 对重离子核裂变碎片的观测有助于对重离子核反应机制的研究, 特别是对裂变前核体系的形成机制的研究<sup>[2,3]</sup>.

中能碰撞条件下重靶核体系所产生的碎片按其质量数可分为以下几种: (1)  $A_f < (1/3)A_t$  称为中等质量碎片; (2)  $A_f > (2/3)A_t$  称为重剩余核; (3)  $(2/3)A_t > A_f > (1/3)A_t$  称为裂变碎片<sup>[1]</sup>. 这里, 下标 f 和 t 分别代表碎片和靶子. 本文描述了  $60\text{MeV/u } ^{18}\text{O}$  轰击天然铀靶所产生的裂变产物 Ba 同位素的截面测量.

2001-07-02 收稿

\* 国家自然科学基金(19775055, 10075063), 国家重点基础研究发展规划(G2000077400)和中国科学院基金(KJ95T-03)资助

## 2 实验方法与结果

实验是在中国科学院近代物理研究所的重离子实验装置(HIRFL)上进行的. 使用能量为 60MeV/u、强度为 30—40enA 的  $^{18}\text{O}$  束流轰击天然铀靶 ( $50\text{mg}/\text{cm}^2$ ), 照射时间分别是 30 和 120min. 照射结束后, 利用自动快速传输装置将靶传送至 30m 远的放射化学实验室, 采用  $\text{BaCl}_2$  沉淀方法从铀及其它反应产物中分离出 Ba, 制成固体  $\gamma(\text{X})$  测量源.

使用高纯锗 (HPGe)  $\gamma$  射线探测器对 Ba 样品进行测量. 该探测器的效率为 70%, 对  $^{60}\text{Co}$  的 1332keV  $\gamma$  峰的分辨 ( $FWHM$ ) 为 2.6keV. 用一套标准混合  $\gamma$  放射源对系统进行能量刻度, 用标准  $^{152}\text{Eu}$  源做效率校准. 使用  $\gamma$  射线谱微机拟合分析程序 GF2 对所获得的  $\gamma$  谱进行分析, 根据每个同位素  $\gamma$  射线的能量、相对强度以及半衰期的值对核素进行指定, 并得到所感兴趣的 Ba 同位素的  $\gamma$  射线的全能峰面积. 根据 Ba 各同位素特征  $\gamma$  射线峰的强度、探测器效率以及相关数据计算出了各 Ba 同位素的累积截面.

图 1 给出了经化学分离后制得的 Ba 样品的  $\gamma$  射线谱. 对其所进行的分析显示, 除 Ba 和同族元素 Ra, Sr 的放射性同位素及其子体的主要  $\gamma$  射线外, 未见其它核素  $\gamma$  射线的沾污. 这说明本实验所使用的放射化学分离流程分离 Ba 样品对杂质的去污是令人满意的, 放射化学方法能确定目标产物电荷数的优势得到了体现. 由于在照射和化学分离过程

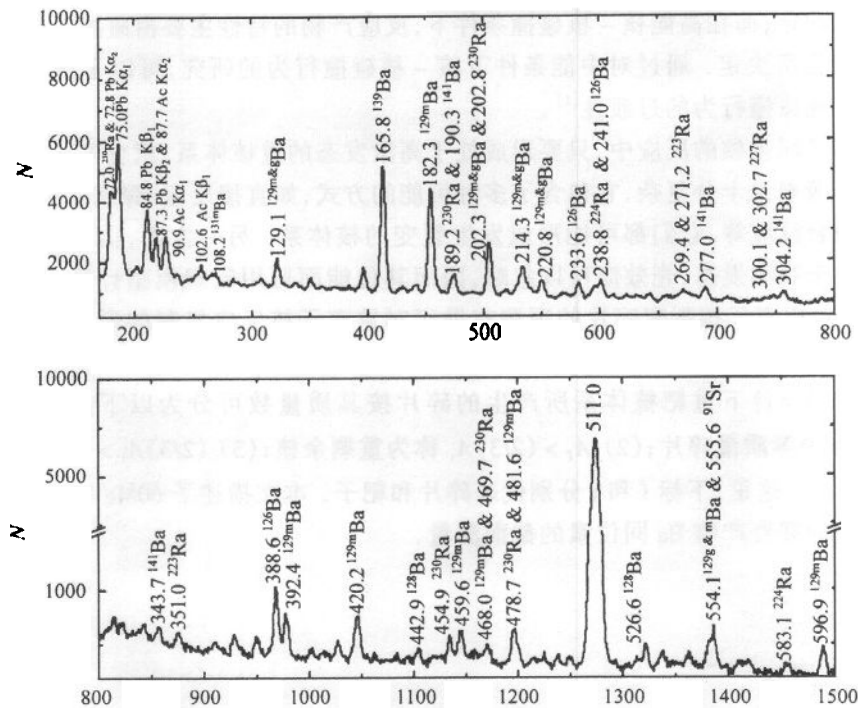


图 1 所测得的 Ba 样品的  $\gamma$  射线谱

中,一部分短寿命 Ba 的同量异位素会馈送到不同的 Ba 同位素,因此,实验中只能得到 Ba 的各个同位素的累积截面. 所以本文给出的 Ba 同位素的形成截面实际上是实验上测得的累积截面值,所得结果列于表 1.

表 1  $60\text{MeV/u } ^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$  反应所产生的 Ba 同位素的累积截面

核素	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}/\text{keV}$	$I_{\gamma}$	$\sigma/\text{mb}$
$^{126}\text{Ba}$	1.67h	233.6	0.204	$1.1 \pm 0.2$
$^{127}\text{Ba}$	12.7min	114.8	0.0926	$4.2 \pm 0.6$
$^{128}\text{Ba}$	2.43d	442.9	0.258	$3.1 \pm 0.5$
$^{129}\text{Ba}$	2.20h	214.3	0.099	$4.2 \pm 0.6$
$^{129\text{m}}\text{Ba}$	2.13h	182.3	0.470	$2.5 \pm 0.4$
$^{131}\text{Ba}$	11.8d	496.3	0.471	$5.8 \pm 0.9$
$^{131\text{m}}\text{Ba}$	14.6min	108.0	0.56	$5.1 \pm 0.8$
$^{133\text{m}}\text{Ba}$	38.9h	276.1	0.175	$3.7 \pm 0.6$
$^{135\text{m}}\text{Ba}$	28.7h	268.2	0.156	$3.4 \pm 0.5$
$^{139}\text{Ba}$	1.38h	165.8	0.238	$9.9 \pm 1.5$
$^{140}\text{Ba}$	12.75d	537.3	0.244	$16.4 \pm 2.5$
$^{141}\text{Ba}$	18.27min	304.2	0.250	$11.0 \pm 1.7$
$^{142}\text{Ba}$	10.7min	1204.0	0.160	$11.5 \pm 1.7$

### 3 讨论

在中能碰撞导致热核裂变的反应中,质量分布是核裂变过程最主要的特征之一,实验上能观测到的碎片分布都是释放中子以后各过程产生碎片的分布. 这种分布可以分为 3 种类型:(1) 对称分布,即质量分布在  $A_1 = A_2 = A_f/2$  处有一个峰值的分布;(2) 非对称分布,即碎片分布的峰值不在  $A_f/2$  处的分布;(3) 混合分布,即对称分布与非对称分布混合在一起的分布. 严格讲,每种分布都可以看成是混合分布,只是当对称分布或非对称分布占较大优势时,另一个种分布就不容易看出来<sup>[4]</sup>.

对于锕系区核素自发裂变与热中子引起的裂变的质量分布曾经进行过很详细的研究. 特别是由于 U 和 Pu 与核能应用密切相关,而  $^{252}\text{Cf}$  又常用作比较的标准和仪器的刻度,因而有关 U, Pu 的热中子裂变和  $^{252}\text{Cf}$  的自发裂变都有详细的放射化学分析数据,也有物理测量的结果. 从其研究结果来看,对质量数相对较大的裂变体系来说,这些裂变的质量分布是非对称的,而且其重碎片的平均质量基本不变. 另外,分布的宽度则随裂变体系的质量数的增加而缓慢地增加<sup>[5]</sup>. 对于较高激发能的锕系核裂变,经过较详细研究的核素并不多,且大多限于使用放射化学方法<sup>[4]</sup>.

本次实验虽只观测了 Ba 同位素链上的一些核素的截面值,但对裂变机制的研究还是提供了有价值的信息. M. de Saint Simon 等<sup>[6]</sup>曾经使用能量直到  $77\text{MeV/u}$  的  $^{12}\text{C}$  离子轰击薄的  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{238}\text{U}$  靶,并得到了反应产生的碱金属的同位素的分布. 结果显示,在  $^{12}\text{C}$  与  $^{181}\text{Ta}$  的反应中, Rb 和 Cs 的同位素分布表现为较窄的(十多个质量单位)单峰高斯分布. 而在

$^{12}\text{C}$ 与 $^{238}\text{U}$ 的反应中,Rb和Cs的同位素分布较宽(20个质量单位左右),且出现双峰.其缺中子和丰中子部分都可分别用高斯曲线拟合,即表现出双高斯分布特性.丰中子部分的平均质量与分布半宽度不受弹核能量的影响,这显示出其反应在裂变后伴随有外围碰撞过程;而在缺中子部分,其平均质量与分布半宽度受到弹核能量的影响,反应机制明显不同.其荷质比较低且分布半宽度较宽,显示出发生过弹靶间的能量转移并与靶核的全裂变反应道相竞争<sup>[7]</sup>. Y. W. Yu等<sup>[8]</sup>用放射化学方法测量了 $240\text{MeV/u}$   $^{12}\text{C}$ 离子同 $^{238}\text{U}$ 相互作用产生碘同位素的截面,他们同样观察到碘同位素分布出现两个极大值,分别相应于丰中子和缺中子部分.本次实验我们采用了 $^{18}\text{O}$ 与 $^{238}\text{U}$ 进行反应,与表现出双高斯分布的 $^{12}\text{C}$ 与 $^{238}\text{U}$ 反应的弹靶组合类似.从实验结果来看,产生的Ba的同位素从 $^{126}\text{Ba}$ 到 $^{142}\text{Ba}$ ,跨度达17个质量单位之多,且反应截面在丰中子和缺中子之间出现下落,同样表现出双峰分布特征.可以推测,同位素分布的双高斯分布现象的出现应与弹靶组合,特别是重质量靶有关,而与弹核能量关系不大.其具体反应机制的探索以及是否涉及到靶物质的核结构问题,还应通过进一步实验加以研究.

另外,P. L. McGaughey等<sup>[9]</sup>在不同能量的 $^{12}\text{C}$ 和 $^{20}\text{Ne}$ 与 $^{238}\text{U}$ 相互作用的条件下,测量了Ba的一些同位素的累积截面.将我们的实验值同上述实验进行比较,发现当能量接近时,两者的结果基本上是一致的.但由于他们未进行化学分离,因而只得到了4种Ba同位素的截面,且靠近稳定线.这说明用中能炮弹的碎裂反应并结合高效率的化学分离方法,是产生远离稳定线核素并进而研究它们的衰变性质的一种行之有效的方法.

感谢在本实验中给予帮助的中国科学院近代物理所重离子加速器(HIRFL)系统的全体工作人员.

#### 参考文献 (References)

- 1 Loveland W, Aleklett K, Sihver L et al. *Phys., Rew. C*, 1990, **41**(3):973—987
- 2 Schroder W U, Huizenga J R. *Nucl. Phys.*, 1989, **A502**:473c
- 3 Viola V E. *Nucl. Phys.*, 1989, **A502**:531c
- 4 HU Ji-Min. *Physics of Nuclear Fission*, Beijing: Beijing University Press, 1999, 133—211(in Chinese)  
(胡济民. *核裂变物理学*,北京:北京大学出版社,1999,133—211)
- 5 Tsekhanovich I, Denschlag H O, Davi M et al. *Nucl. Phys.*, 1999, **A658**:217
- 6 de Saint Simon M, Haan S, Audi G et al. *Phys. Rew. C*, 1982, **26**(6):2447—2457
- 7 Scott D K. *Nucl. Phys.*, 1981, **A354**:375
- 8 YU Y W, Lee C H, Moody K J et al. *Phys. Rew. C*, 1987, **36**(6):2396—2402
- 9 McGaughey P L, Loveland W, Morrissey D J et al. *Phys. Rew. C*, 1982, **31**(3):896—909

## Measurement of the Cross Sections for Ba Isotopes\*

XU Yan-Bing YANG Wei-Fan YUAN Shuang-Gui XIAO Yong-Hou  
PAN Qiang-Yan LI Ying-Jun

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

**Abstract** Present experiment was performed in order to get more information about intermediate energy heavy ion collisions for the further understanding of that how nuclear reaction mechanisms change between the two extreme types of nuclear behaviors, the nuclear collisions at low and high energy. Ba isotopes were produced by 60 MeV/u  $^{18}\text{O}$  bombardment of nature uranium via  $^{238}\text{U}(^{18}\text{O}, \text{X})$  reaction, and then separated from the irradiated U targets by using radiochemical procedure. The accumulative sections of Ba isotopes are obtained through the processing and analyzing of time sequence  $\gamma$ -ray spectra. As a result, the two-peak phenomenon in the distribution of the Ba isotopes is observed. It can be presumed that the occurrence of the double Gaussian distribution is weakly related to the projectile energy, but closely related to the projectile-target combination. Present experiment also implied however, that fragmentation reaction induced by intermediate energy heavy ions followed by radiochemical separation is an efficacious method to produce nuclei far from stability, thereby to study their decay properties.

**Key words** intermediate energy heavy ion collision, radiochemical separation, Ba isotopes cross section, two-peak distribution

---

Received 2 July 2001

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19775055, 10075063), Major State Basic Research Development Program (G2000077400) and The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03)