

$^{132,134,136,137}\text{Ba}(n,p)$ 、 $^{132,134}\text{Ba}(n,2n)$ 反应截面测量

袁俊谦 伏九子 杨景康 孔祥忠 王永昌

(兰州大学现代物理系 兰州 730000)

摘要 本文叙述 $14.2 \pm 0.1 \text{ MeV}$ 中子能量的 $^{137}\text{Ba}(n,p)^{137}\text{Cs}$ 、 $^{136}\text{Ba}(n,p)^{136}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Ba}(n,p)^{134}\text{Cs}$ 、 $^{132}\text{Ba}(n,p)^{132}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Ba}(n,2n)^{133}\text{Ba}$ 和 $^{132}\text{Ba}(n,2n)^{131}\text{Ba}$ 等反应截面的测量,测量方法采用以 $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ 和 $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$ 反应为标准截面的相对活化法,并用现有的数据对本结果进行了比较.

关键词 截面, 活化方法, 测量.

1 前言

1986年12月1~5日,国际原子能机构(IAEA)在原德意志民主共和国的Gaussig召开了关于聚变堆技术核数据顾问组会议,会议报告中列出的聚变堆对活化截面需求清单中有Ba同位素生长寿命核的一些反应,因为Ba是聚变反应堆的重要生物屏蔽材料之一.生长寿命核的反应截面直接关系到聚变堆的剂量大小、聚变堆旧结构材料的再生利用和废料的处理.目前,有关钡同位素生成短寿命核的反应有 (n,p) 、 $(n,2n)$ 、 (n,α) ,如: $^{138}\text{Ba}(n,2n)^{137m}\text{Ba}$ 、 $^{136}\text{Ba}(n,2n)^{135m}\text{Ba}$ 、 $^{134}\text{Ba}(n,2n)^{133m}\text{Ba}$ 、 $^{136}\text{Ba}(n,p)^{136}\text{Cs}$ 、 $^{138}\text{Ba}(n,p)^{138}\text{Cs}$ 、 $^{138}\text{Ba}(n,\alpha)^{135m}\text{Xe}$ 和 $^{138}\text{Ba}(n,\alpha)^{135}\text{Xe}$ 等仅有少量的数据^[1~5],而对生长寿命核的有关反应截面数据,在现有文献中几乎找不到,所以我们在兰州大学强流中子发生器上测量了 $^{132,134,136,137}\text{Ba}(n,p)$ 和 $^{132,134}\text{Ba}(n,2n)$ 反应截面.

2 实验过程

2.1 样品照射

样品照射是在兰州大学ZF-300-I型强流中子发生器上进行的.以 $T(d,n)^4\text{He}$ 作为中子源.平均入射氘束能量 E_d 为125keV,束流强度约20mA,氘靶厚度约0.9mg/cm²,靶点处中子产额为 $(1\sim 3) \times 10^{12}\text{n/s}$.样品是用化学纯的BaCO₃粉末压成直径为20mm,厚度为5mm的

圆片,然后用塑料胶带包裹.样品中钡的净重量为1.7514g.用纯度为99.99%,直径为20mm的铁片作为中子注量测量,钡样品夹在两个铁片之间组成样品组,放在距靶点5cm、中子能量为 $14.2 \pm 0.1 \text{ MeV}$ 的位置上.中子能量是用铯铊截面比测定.总的照射时间为108.9小时.在照射期间中子通量的变化是用铀裂变室监督的,目的是在数据处理时对照射期间中子通量的波动作修正.

2.2 剩余核放射性强度的测量

剩余核的放射性强度是通过测量它的特征 γ 射线的全能峰计数求得的.测量用的 γ 谱仪由北京原子能研究院生产的CH8403同轴高纯锗探测器与美国ORTEC公司制造的7450多道脉冲幅度分析器组成.探测器相对效率为20%,能量分辨率为2.7keV(对⁶⁰Co的1.33MeV γ 射线).谱仪系统对 γ 射线的探测效率是用美国国家标准局生产的SRM4275标准源精心刻度的,源的误差1%,估计刻度的效率误差约为1.5%.待测反应和监督反应的放射性强度计算时用到的核数据取自文献[6],它们的值和计算的级联符合修正系数列在表1中.对¹³³Ba活性测量考虑到半衰期为38.9小时的^{133m}Ba亚稳态的影响,对¹³³Ba测量的实际冷却时间为190.8天.在计算 γ 射线活性时,对中子注量波动、 γ 射线在样品中的自吸收、级联 γ 符合效应及测量几何等进行了校正.

表 1 待测反应和监督反应的核数据

反应道	靶核同位素丰度(%)	产物核半衰期	特征 γ 射线能量(keV)	γ 发射率(%)	级联符合修正系数
$^{137}\text{Ba}(n,p)^{137}\text{Cs}$	11.23	30.174 年	661.65	85	—
$^{136}\text{Ba}(n,p)^{136}\text{Cs}$	7.854	13 天	818.56	99.7	1.297
$^{134}\text{Ba}(n,p)^{134}\text{Cs}$	2.417	2.062 年	604.66	97.6	1.093
$^{132}\text{Ba}(n,p)^{132}\text{Cs}$	0.101	6.47 天	667.7	97.5	1.002
$^{134}\text{Ba}(n,2n)^{133}\text{Ba}$	2.417	10.7 年	276.3	7.5	1.148
$^{132}\text{Ba}(n,2n)^{131}\text{Ba}$	0.101	12 天	496.2	42	1.122
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	5.8	312.5 天	834.83	100	—
$^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$	5.8	27.72 天	320.03	10.2	—

3 测量结果和讨论

测量截面的计算公式如下

$$\sigma_s = \frac{[eI\eta K g M D]_m [\lambda A F C]_s}{[eI\eta K g M D]_s [\lambda A F C]_m} \sigma_m \quad (1)$$

式中下标 s 代表被测样品的参数, m 代表监督标准的参数, 括号中 e 为探测器对特征 γ 射线全能峰探测效率; I 为特征 γ 射线发射率; η 为靶核同位素丰度; $g = 1 - e^{-\lambda t}$ 表示产物核的生长因子, 其中 λ 为衰变常数, t 为中子照射时间; M 为样品质量; $D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}$ 为测量收集因子, 其中 t_1 为从照射结束到测量开始的时间间隔, t_2 为从照射结束到测量结束的时间间隔; A 为元素的原子量; C 为测量的全能峰面积计数; $F = f_s \cdot f_c \cdot f_g$ 表示总的校正因子, 其中 f_s 为自吸收系数、 f_c 为级联符合修正因子、 f_g 为测量几何校正因

子; K 为中子注量波动校正因子, 其表达式为

$$K = \left[\frac{\sum_{i=1}^l \Phi_i (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_i}}{\Phi} \right] / \Phi g \quad (2)$$

式中, l 为将照射时间分成的段数; λt_i 为第 i 段的时间间隔; t_i 为第 i 段时间结束到照射结束的时间间隔; Φ_i 为第 i 段的平均中子通量; Φ 为总的照射时间内的平均中子通量。

在中子能量 $E_n = 14.2 \pm 0.1 \text{ MeV}$ 时, 测得各反应道的截面值如表 2 所示. 标准截面值取自文献[7]. 测量结果的误差主要来自标准截面误差 7.4%, 计数误差 0.1~3.5%、探测器效率误差 2.5%、样品称量误差 0.1%、自吸收校正误差 1%、级联符合修正误差 1%、中子能量测定误差 1% 和中子通量波动修正误差 1% 等. 对各个反应道同时用 $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ 和 $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$ 两个监督反应进行了计算, 本结果选用了两个

表 2 测量结果

反应道	$^{137}\text{Ba}(n,p)^{137}\text{Cs}$	$^{136}\text{Ba}(n,p)^{136}\text{Cs}$	$^{134}\text{Ba}(n,p)^{134}\text{Cs}$	$^{132}\text{Ba}(n,p)^{132}\text{Cs}$	$^{134}\text{Ba}(n,2n)^{133}\text{Ba}$	$^{132}\text{Ba}(n,2n)^{131}\text{Ba}$
测量截面 (mb)	10.6 ± 0.9	3.7 ± 0.3	16.4 ± 1.4	35.0 ± 1.5	1790 ± 152	1596 ± 136
监督反应	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	$^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$				
标准截面 (mb)	336 ± 16	89.4 ± 5.1				

监督反应的平均值. 关于 $^{132}\text{Ba}(n,2n)^{131}\text{Ba}$ 反应截面, 文献[1]在 E_n 为 $14.4 \pm 0.3\text{MeV}$ 时的值为 $1574 \pm 100\text{mb}$; 文献[5]在 $E_n = 14.21\text{MeV}$ 时的值为 $1567 \pm 47\text{mb}$; 而 $^{134}\text{Ba}(n,2n)^{133}\text{Ba}$, 文献[5]在 $E_n = 14.10 \pm 0.15\text{MeV}$ 时的值为 $1723 \pm 45\text{mb}$, 在误差范围内与我们的结果符合得很好. 由于天然钡元素中稳定同位素有: ^{130}Ba 丰度为 0.106% , ^{132}Ba 丰度为 0.101% , ^{134}Ba 丰度为 2.417% , ^{135}Ba 丰度为 6.592% , ^{136}Ba 丰度为 7.854% , ^{137}Ba 丰度为 11.23% , ^{138}Ba 丰度为 71.7% , 所以 $^{137}\text{Ba}(n,p)^{137}\text{Cs}$ 中包含 $^{135}\text{Ba}(n,np+pn+d)^{137}\text{Cs}$, $^{136}\text{Ba}(n,p)^{136}\text{Cs}$ 中包含 $^{137}\text{Ba}(n,np+pn+d)^{136}\text{Cs}$, $^{134}\text{Ba}(n,p)^{134}\text{Cs}$ 中包含 $^{135}\text{Ba}(n,np+pn+d)^{134}\text{Cs}$. 由于样品采用天然同位素丰度的钡, 所以 $^{137,136,134}\text{Ba}$ 的 (n,p) 反应截面中分别含 $^{138,137,135}\text{Ba}$ 的 $(n,np+pn+d)$ 反应截面. $^{136}\text{Ba}(n,p)^{136}\text{Cs}$ 反应截面, 文献[3]在 $E_n = 14.8 \pm 0.8\text{MeV}$ 的测量值为 $49 \pm 10\text{mb}$, 理论计算值为 9.3mb , 本工作的结果与它的理论值比较接近, 它的实验值

偏大. 在本工作中, 作者是用 $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$ 和 $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ 监督的, 用正比 β 计数器通过测量 β 计数测定样品的放射性强度, β 绝对测量的校正是不容易准确. 总之, 本工作中的 $^{137}\text{Ba}(n,p)^{137}\text{Cs}$ 的结果与卢涵林的结果比较接近, 但 $^{134}\text{Ba}(n,p)^{134}\text{Cs}$ 、 $^{132}\text{Ba}(n,p)^{132}\text{Cs}$ 反应, 目前还没有找到其他的数据.

参 考 文 献

- 1 Wen Deh Lu, et al. Phys. Rev., 1970, C1(1): 350
- 2 An Jong Do, et al. J. Phys., G: Nucl. Phys., 1984, 10: 91
- 3 Wille R G, Fink R W. Phys. Rev., 1960, 118(1): 242
- 4 Lakshmana Das N, et al. J. Phys. G: Nucl. Phys., 1980, 6: 1045
- 5 Lu Hanlin, et al. Chinese Journal of Nucl. Phys., 1992, 14(3): 244
- 6 Browne E, Firstone R B. Table of Radioactive Isotopes, 1986
- 7 Zhao Wenrong, et al. INDC (CPR) 1989, 16

Cross Section Measurement of $^{132,134,136,137}\text{Ba}(n,p)$ and $^{132,134}\text{Ba}(n,2n)$

Yuan Junqian Qiu Jiuzi Yang Jingkang Kong Xiangzhong Wang Yongchang
(Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract The cross sections of the $^{137}\text{Ba}(n,p)^{137}\text{Cs}$, $^{136}\text{Ba}(n,p)^{136}\text{Cs}$, $^{134}\text{Ba}(n,p)^{134}\text{Cs}$, $^{132}\text{Ba}(n,p)^{132}\text{Cs}$, $^{134}\text{Ba}(n,2n)^{133}\text{Ba}$ and $^{132}\text{Ba}(n,2n)^{131}\text{Ba}$ reactions have been measured by using the activation method relative the cross sections of $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ and $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$ reactions at the neutron energy of $14.2 \pm 0.1\text{MeV}$. The results obtained are compared with the data on hand.

Key Words cross section, activation method, measurement.