

# Ba(n, x)<sup>134</sup>Cs\*, <sup>134</sup>Ba(n, 2n)<sup>133</sup>Ba, <sup>140</sup>Ce(n, 2n)<sup>139</sup>Ce, <sup>142</sup>Ce(n, 2n)<sup>141</sup>Ce 和 <sup>23</sup>Na(n, 2n)<sup>22</sup>Na反应截面的测量

孔祥忠 王永昌 杨景康 袁俊谦

(兰州大学现代物理系 兰州 730001)

1994-07-12 收稿

## 摘 要

用中子活化法相对于 <sup>54</sup>Fe(n, P)<sup>54</sup>Mn 反应, 在 13.50—14.80MeV 中子能区测量了 Ba(n, x)<sup>134</sup>Cs, <sup>134</sup>Ba(n, 2n)<sup>133</sup>Ba, <sup>140</sup>Ce(n, 2n)<sup>139</sup>Ce, <sup>142</sup>Ce(n, 2n)<sup>141</sup>Ce 和 <sup>23</sup>Na(n, 2n)<sup>22</sup>Na 的反应截面。并将所测的结果和其他作者的结果进行了比较, 中子能量是用 <sup>90</sup>Zr(n, 2n)<sup>89m+g</sup>Zr 反应和 <sup>93</sup>Nb(n, 2n)<sup>92m</sup>Nb 反应截面比法测定的。

**关键词** 活化方法, 反应截面, (n, x)(n, 2n) 反应。

## 1 前 言

核反应截面是检验核理论的基本依据, 也是核技术应用和核能利用的基础数据。钡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, 且钡的天然同位素多, 活化后的  $\gamma$  谱十分复杂, Ba(n, x)<sup>134</sup>Cs, <sup>134</sup>Ba(n, 2n)<sup>133</sup>Ba 两反应的剩余核半衰期长。 <sup>140</sup>Ce(n, 2n)<sup>139</sup>Ce, <sup>142</sup>Ce(n, 2n)<sup>141</sup>Ce 和 <sup>23</sup>Na(n, 2n)<sup>22</sup>Na 三个反应是快中子增殖反应, 其中 <sup>140</sup>Ce(n, 2n)<sup>139</sup>Ce 和 <sup>142</sup>Ce(n, 2n)<sup>141</sup>Ce 两反应截面实验测量数据较少, 而 <sup>23</sup>Na(n, 2n)<sup>22</sup>Na 反应激发函数是混合堆安全防护和环境评价的重要数据<sup>[1]</sup>。因此我们用强流中子发生器照射样品, 用活化法相对于 <sup>54</sup>Fe(n, p)<sup>54</sup>Mn 反应, 测量了上述五个反应截面。

## 2 实验过程

### 2.1 样品照射

实验工作是在兰州大学 ZF-300-II 型强流中子发生器上进行的。以 T(d, n)<sup>4</sup>He 作中子源, 平均氘束能量  $\bar{E}_d$  为 125keV, 束流强度约 20mA, 氘靶厚度约为 0.9mg/cm<sup>2</sup>,

\* Ba(n, x)<sup>134</sup>Cs: <sup>135</sup>Ba(n, np + pn + d) + <sup>134</sup>Ba (n, p)。

靶点处中子产额为 $(1-3) \times 10^{12} \text{n/s}$ 。在与入射氘束夹角为 $0^\circ-130^\circ$ 之间放置样品,样品距中子源中心距离最近是5cm,最远是28cm。样品处的中子能量是用铈锆截面比法测定的。样品总的照射时间为108.9h,照射期间中子通量的波动是用铀裂变室监督,铀样品是由纯度好于99.8%的分析纯碳酸钡粉末压成;铈样品是由纯度好于99.5%的分析纯草酸铈粉末压成;钠样品是由纯度好于99.8%的分析纯氯化钠粉末压成;压成的样品用涤纶纸带封装。铁样品为金属片,纯度为99.9%。样品和监督片直径均为20mm。照射时,把样品夹在两个监督片之间,并用0.5mm厚的锡皮包住。

## 2.2 $\gamma$ 放射性测量

反应产物的 $\gamma$ 放射性用国产CH8403同轴高纯锗探测器测量,探测器的相对效率为20%,能量分辨率为3keV(对1.33MeV $\gamma$ 射线)。对探测器的 $\gamma$ 探测效率进行了精确刻度,标准点源的不确定性为1%,我们在2cm处所定的效率误差小于1.5%,关于效率刻度的细节见文献<sup>[2]</sup>。在计算 $\gamma$ 活性时对中子注量率的波动, $\gamma$ 射线在样品中的自吸收,测量几何以及级联 $\gamma$ 的符合效应进行了校正。

## 3 结果和讨论

测量截面的计算公式如下:

$$\sigma_x = \frac{[\epsilon I_{\gamma} \eta s m D K]_{F_0} [\lambda A F C]_x}{[\epsilon I_{\gamma} \eta s m D K]_x [\lambda A F C]_{F_0}} \sigma_{F_0}$$

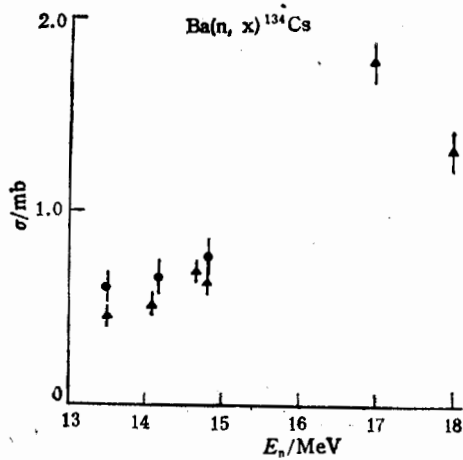
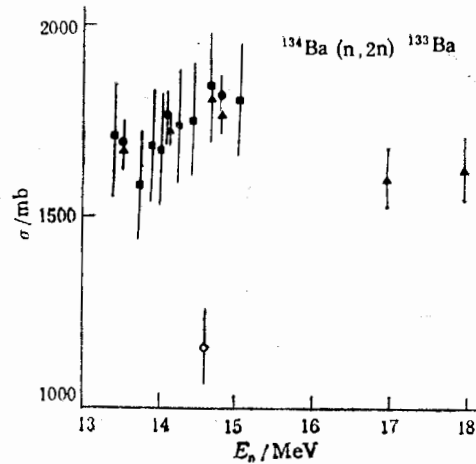
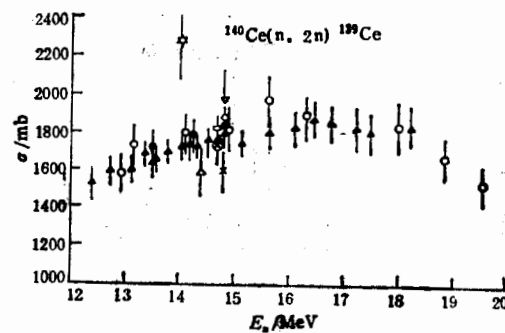
公式中各个因子的含意见文献<sup>[2]</sup>。所用的核数据列于表1。表2是本文所测 $\text{Ba}(n, x)^{134}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Ba}(n, 2n)^{133}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{Ce}(n, 2n)^{139}\text{Ce}$ ,  $^{142}\text{Ce}(n, 2n)^{141}\text{Ce}$ 和 $^{23}\text{Na}(n, 2n)^{22}\text{Na}$ 反应截面的测量结果。图1—图5分别画出了 $\text{Ba}(n, x)^{134}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Ba}(n, 2n)^{133}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{Ce}(n, 2n)^{139}\text{Ce}$ ,  $^{142}\text{Ce}(n, 2n)^{141}\text{Ce}$ 以及 $^{23}\text{Na}(n, 2n)^{22}\text{Na}$ 五个反应截面的实验数据和其他作者的实验结果<sup>[3-23]</sup>。

表1 反应核数据

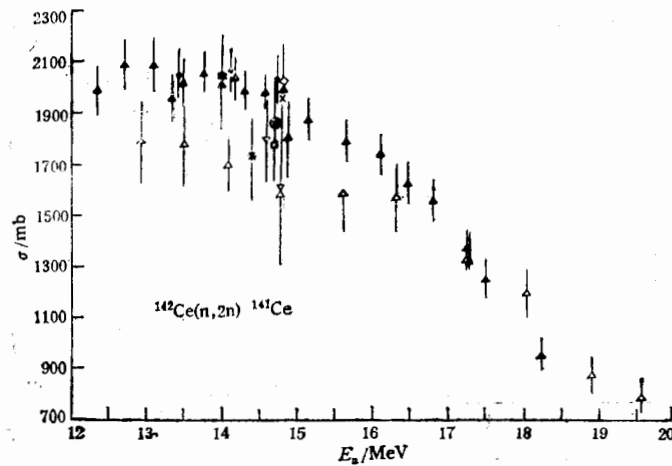
反应道	同位素丰度 %	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}(\text{keV})$	$I_{\gamma}$
$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	5.8	312.20d	834.826	99.975%
$\text{Ba}(n, x)^{134}\text{Cs}$	9.009	2.062a	795.867	85.4%
$^{134}\text{Ba}(n, 2n)^{133}\text{Ba}$	2.417	10.54a	355.999	62.2%
$^{140}\text{Ce}(n, 2n)^{139}\text{Ce}$	88.48	137.66d	165.853	79.9%
$^{142}\text{Ce}(n, 2n)^{141}\text{Ce}$	11.08	32.5d	145.44	48.4%
$^{23}\text{Na}(n, 2n)^{22}\text{Na}$	100	2.602a	1274.53	99.937%

表2 测量结果 (mb)

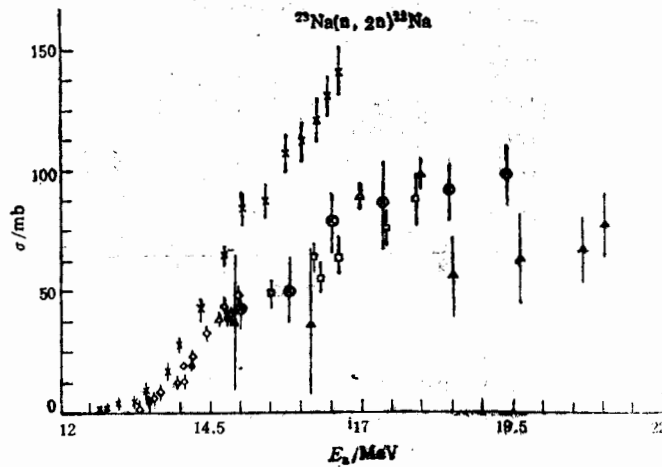
中子能量 MeV	$\text{Ba}(n, x)^{134}\text{Cs}$	$^{134}\text{Ba}(n, 2n)^{133}\text{Ba}$	$^{140}\text{Ce}(n, 2n)^{139}\text{Ce}$	$^{142}\text{Ce}(n, 2n)^{141}\text{Ce}$	$^{23}\text{Na}(n, 2n)^{22}\text{Na}$
$13.50 \pm 0.07$	$0.625 \pm 0.031$	$1682 \pm 84$	$1722 \pm 96$	$2050 \pm 100$	$5.60 \pm 0.20$
$14.18 \pm 0.07$	$0.711 \pm 0.036$	$1764 \pm 88$	$1799 \pm 100$	$2080 \pm 100$	$19.9 \pm 0.7$
$14.80 \pm 0.11$	$0.782 \pm 0.039$	$1785 \pm 89$	$1830 \pm 110$	$2043 \pm 100$	$38.2 \pm 1.1$

图 1  $Ba(n, x)^{134}Cs$  反应截面▲ Lu Hanlin<sup>[3]</sup> ● 本文.图 2  $^{134}Ba(n, 2n)^{133}Ba$  反应截面● Y. Ikeda<sup>[4]</sup>, ▲ Lu Hanlin<sup>[3]</sup>,  
○ E. Holub<sup>[5]</sup> ● 本文.图 3  $^{140}Ce(n, 2n)^{139}Ce$  反应截面☆ P. Cuzzocrea<sup>[12]</sup>, ⊗ W. Dilg<sup>[21]</sup>, × J. Csikai<sup>[9]</sup>, ● 本文, ○ M. Borman<sup>[22]</sup>,  
△ Wen Deh Lu<sup>[19]</sup>, ◇ A. Bari<sup>[18]</sup>, □ S. M. Qaim<sup>[20]</sup>, ▽ S. L. Sothras<sup>[23]</sup>,  
▲ Teng Dan<sup>[23]</sup>.

从图 1 可以看出  $Ba(n, x)^{134}Cs$  反应截面实验数据很少, 在 14MeV 中子能区随着中子能量的增大, 反应截面逐渐增大, 我们所测数据的走向和文献[3]一致。从图 2 可以看出  $^{134}Ba(n, 2n)^{133}Ba$  反应截面实验数据较少。在 14MeV 中子能区, 随着中子能量的增大, 反应截面稍有增大, 且在误差范围内我们所测数据与文献[3, 4]的实验结果一致。从图 3 可以看出  $^{140}Ce(n, 2n)^{139}Ce$  反应截面, 在 14MeV 中子能区随着中子能量的增大稍有增大, 除 P. Cuzzocrea<sup>[12]</sup> 所测截面明显偏大, Wen. Deh. Lu<sup>[19]</sup> 和 J. Csikai<sup>[9]</sup> 两家所测截面明显偏小外, 其余几家所测结果走向一致, 且实验结果较接近。从图 4 可以看出,  $^{142}Ce(n, 2n)^{141}Ce$  反应截面测量数据, 在 14MeV 中子能区随着中子能量的增大没有明显变化, 但各家测量结果较为分散。从图 5 可以看出  $^{23}Na(n, 2n)^{22}Na$  反应截面, 随中子能量的增大, 迅速增大各家测量结果走向一致。必须指出  $^{134}Ba(n, 2n)^{133}Ba$ ,  $^{140}Ce(n, 2n)^{139}Ce$

图4  $^{142}\text{Ce}(n,2n)^{141}\text{Ce}$  反应截面

$\Sigma$  R. G. Will<sup>[18]</sup>,  $\times$  J. Csikai<sup>[19]</sup>,  $\ast$  Wen Deh Lu<sup>[19]</sup>,  $\square$  S. M. Qaim<sup>[20]</sup>,  
 $\star$  A. Bari<sup>[13]</sup>,  $\triangle$  M. Bormann<sup>[22]</sup>,  $\blacktriangle$  Teng Dan<sup>[23]</sup>,  $\otimes$  W. Dilg<sup>[21]</sup>,  
 $\nabla$  Schwerer<sup>[23]</sup>,  $\bullet$  本文.

图5  $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$  反应截面

$\triangle$  Lu Hanlin<sup>[6]</sup>,  $\times$  H. Liskien<sup>[17]</sup>,  $\diamond$  Y. Ikeda<sup>[10]</sup>,  $\blacktriangle$  J. Piard<sup>[16]</sup>,  $\square$  L. Adamski<sup>[11]</sup>,  
 $\circ$  R. J. Prestwood<sup>[8]</sup>,  $\otimes$  H. O. Menlove<sup>[13]</sup>,  $\bullet$  本文.

和  $^{142}\text{Ce}(n,2n)^{141}\text{Ce}$  三个快中子反应分别有  $^{132}\text{Ba}(n,\gamma)^{133}\text{Ba}$ ,  $^{138}\text{Ce}(n,\gamma)^{139}\text{Ce}$  和  $^{140}\text{Ce}(n,\gamma)^{141}\text{Ce}$  三个  $(n,\gamma)$  反应产物的干扰,虽然在样品照射时,样品外包有 0.5mm 厚的镉皮,可大大减小热中子  $(n,\gamma)$  反应的干扰,但 14MeV 能区快中子  $(n,\gamma)$  反应的干扰仍然存在。

## 参 考 文 献

- [1] Cheng E T, NEANDC Specialists Meeting on Neutron Activation Cross Section For and Fusion Energy. Argonne, U. S. A 13-15 Sep 1989.

- [2] 王永昌等, 高能物理与核物理, **14**(1990)919.  
 [3] Lu Hanlin et al., *Chinese Journal of Nucl Phys.*, **14**(1992)244.  
 [4] Ikeda Y et al., NEANDC(Argonne), 1989.  
 [5] Holub H, Cindro N, *J. Phys.*, **G2**(1976)405.  
 [6] Lu Hanlin et al., *Chinese Journal of Nucl Phys.*, **14**(1992)83.  
 [7] Sigg R A, Thesis Univ of Arkanas (1976).  
 [8] Preswood R J, *Phys. Rev.*, **98**(1955)47.  
 [9] Csikai J, Nagy S, *Nucl. phys.*, **A91**(1967)222.  
 [10] Ikada Y E et al., Report JAERI 1312(1988).  
 [11] Adamski L et al., *Ann. Nucl. Energy*, **7**(1980)397.  
 [12] Cuzzocrea. J et al., *Nuovo Cim*, **52B**(1967)476.  
 [13] Bari. A, *J Radioanal Chem*, **75**(1982)189.  
 [14] Barrall R C et al., Report AFWL-TR-68-134(1968).  
 [15] Menlove H O et al., *Phys. Rev.*, **163**(1967)1308.  
 [16] Picard J, Williamson C F, *Nucl Phys.*, **63**(1965)673.  
 [17] Liskien H, Paulson A, *Nucl Phys* **63**(1965)673.  
 [18] Wille R G, Fink R W, *Phys. Rev.*, **118**(1960)242.  
 [19] Wen-Deh Lu et al., *Phys Rev.*, **C1**(1970)350.  
 [20] Qaim S M, *Nucl. Phys.*, **A319**(1970)319.  
 [21] Dilg W et al., *Nucl. Phys.*, **A118**(1968)9.  
 [22] Bormann. M et al., *Nucl. Phys.*, **A115**(1968)309.  
 [23] Teng Dan et al., *Chinese Journal Nucl. Phys.*, **4**(1985)307.

**The Cross Section Measurements for the  $Ba(n, x)^{134}Cs$ ,  
 $^{134}Ba(n, 2n)^{133}Ba$ ,  $^{140}Ce(n, 2n)^{139}Ce$ ,  $^{142}Ce(n, 2n)^{141}Ce$   
 and  $^{23}Na(n, 2n)^{22}Na$  Reactions**

Kong Xiangzhong    Wang Yongchang    Yang Jingkang    Yuan Junqian

(Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730001)

Received 12 July 1994

Abstract

The cross sections for  $Ba(n, x)^{134}Cs$ ,  $^{134}Ba(n, 2n)^{133}Ba$ ,  $^{140}Ce(n, 2n)^{139}Ce$ ,  $^{142}Ce(n, 2n)^{141}Ce$  and  $^{23}Na(n, 2n)^{22}Na$  reactions have been measured by the activation method relative to  $^{54}Fe(n, p)^{54}Mn$  reaction in the neutron energy range of 13.50—14.80MeV. The measured results are compared with published data. Neutron energies are determined by the method of making cross section ratios of  $^{90}Zr(n, 2n)^{89m+g}Zr$  and  $^{93}Nb(n, 2n)^{92m}Nb$  reactions.

**Key words** activation method, cross section of reaction,  $(n, x)(n, 2n)$  reactions.