

# 丰中子核 $^{144}, ^{146}\text{Ce}$ 的八极形变\*

朱凌燕 朱胜江 李明

(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

J. H. Hamilton<sup>1</sup> A. V. Ramayya<sup>1</sup> B. R. S. Babu<sup>1</sup>  
W. C. Ma<sup>2</sup> J. O. Rasmussen<sup>3</sup> M. A. Stoyer<sup>3</sup> I. Y. Lee<sup>3,4</sup>

1 (Department of Physics, Vanderbilt University, Nashville, TN-37235, USA)

2 (Department of Physics, Mississippi State University, MS-39762, USA)

3 (Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA-94720, USA)

4 (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN-37831, USA)

**摘要** 通过对 $^{252}\text{Cf}$ 自发裂变所产生的瞬发 $\gamma$ 谱的实验研究,建立并扩展了丰中子核 $^{144}, ^{146}\text{Ce}$ 的高自旋和八极形变集体带,最高自旋态可达 $15^-$ . 对这两个核的八极形变特性进行了讨论.

**关键词** 自发裂变 高自旋态 八极形变

## 1 引言

$^{144}, ^{146}\text{Ce}$ 属于丰中子核,通常难于用重离子熔合-蒸发反应研究其高自旋态的特性. 推转平均场计算预言,处于 $Z = 56$ ,  $N = 88$ 附近的核在相当低的自旋就能发生八极形变,这种八极形变在自旋大于 $7\hbar$ 时开始趋向稳定<sup>[1,2]</sup>. 实验上也发现了围绕此区的八极形变岛,如 $N = 88, 90$ 的Ba核<sup>[3]</sup>和 $N = 86, 88$ 的Nd核<sup>[4]</sup>.  $^{144}, ^{146}\text{Ce}$ 核位于这个八极形变岛的附近,其高自旋能级结构的研究对理解该核区的八极形变特性具有重要意义. 对 $^{144}\text{Ce}$ 的能级结构的研究相对比较完善的是对 $^{144}\text{La}$ 的 $\beta$ 衰变谱的分析<sup>[5]</sup>, 没有发现八极形变带. W. R. Phillips<sup>[6]</sup>曾利用 $^{252}\text{Cf}$ 自发裂变所产生的瞬发 $\gamma$ 谱研究过 $^{146}\text{Ce}$ 的能级结构,并发现了八极形变带,但自旋不是很高. 我们与国外有关实验组对由 $^{252}\text{Cf}$ 等重核裂变所产生的众多丰中子核的能级结构进行了多年的合作研究,最近完成了 $^{144}, ^{146}\text{Ce}$ 的数据分析,发现了许多新的能级和跃迁,修正了部分数据,建立了 $^{144}\text{Ce}$ 的八极形变带并扩展了 $^{146}\text{Ce}$ 的八极形变带的高自旋态.

1997-10-09收稿, 1998-03-11收修改稿

\* 国家自然科学基金(19375029)与核工业科学基金(J94Y5072)资助

## 2 实验和数据分析

实验是由众多合作组联合进行的. 数据来自两个实验: 第一个实验是在美国橡树岭国家实验室 (ORNL) 的 Holifield 重离子研究设施 (HIRF) 上进行的, 利用  $^{252}\text{Cf}$  源的裂变强度为每秒  $6 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ , 用 20 个反康高纯锗探测器来测量自发裂变所产生的瞬发  $\gamma$  射线, 共记录了  $1.9 \times 10^9$  个  $\gamma$ - $\gamma$  符合事件; 第二个实验是在美国洛仑兹伯克利国家实验室 (LBNL) 完成的, 所用  $^{252}\text{Cf}$  源与第一次实验类似, 利用 Gammasphere 的第一期装置, 由 36 个大体积反康高纯锗探测器所组成的阵列来获取数据, 记录三重以上的符合事件, 得到了相当于  $9.8 \times 10^9$  个两重符合的事件数.

数据分析是由清华大学和范德比尔特大学合作进行的, 本实验组承担了主要的工作. 对在橡树岭获取的实验数据, 建立了二维  $\gamma$ - $\gamma$  符合矩阵; 而对在伯克利获取的数据, 建立了三维立体  $\gamma$ - $\gamma$ - $\gamma$  符合矩阵. 对二维符合矩阵采用“单门”符合方法, 用于低激发态的分析; 而对三维符合矩阵采用“双门”符合方法, 用来扩充高自旋态及识别极弱的  $\gamma$  跃迁. 在进行数据分析时, 运用了功能很强的分析程序包. 由于自发裂变谱包括上百种丰中子核的退激  $\gamma$  谱线, 需要反复开门比较, 综合各方面实验数据, 才能正确识别出谱线. 这是一项极为复杂的工作, 为节省版面, 具体过程这里从略.

## 3 结果及讨论

参照 Table of Isotopes CD-ROM (eighth edition, 1996) 中的  $^{144}\text{Ce}$  能级图和文献 [6] 中的  $^{146}\text{Ce}$  能级图, 利用系统比较的方法, 我们建立了  $^{144,146}\text{Ce}$  八极形变集体带能级图. 这种集体带最明显的特征是具有两个相反宇称的  $\Delta I = 2$  的  $E2$  跃迁集体带, 且由  $\Delta I = 1$  的  $E1$  交叉跃迁相连接.  $^{144}\text{Ce}$  的交叉跃迁比较少, 八极形变集体带的典型特征表现不明显, 在这里认为它是一个八极形变带还有些证据不足, 故又接着进行了一些计算和讨论, 通过与其它典型的八极形变带的结果的比较来进一步证实我们的观点.

对于  $^{144}\text{Ce}$  核, 在早期的  $\beta$  衰变的研究中, 正宇称能级仅识别到  $4^+$  (938.2keV), 负宇称能级仅识别了  $3^-$  (1242.0keV) 和  $5^-$  (1523.1keV) 两个能级.  $4^+$  和  $5^-$  以上的八极形变集体带的能级与跃迁都是本实验首次建立的, 其自旋和宇称是由系统学原则推测而来. 在两个正负宇称带间新发现了 347.6keV 与 374.3keV 的交叉跃迁, 这是八极形变带的主要特征, 与相邻核  $^{144}\text{Ba}$ <sup>[3]</sup>、 $^{146}\text{Ce}$ <sup>[6]</sup> 相似. 图 1 给出  $^{144,146}\text{Ce}$  八极形变集体带能级图. 对于  $^{146}\text{Ce}$  核, 除证实了文献 [6] 中原有的能级与跃迁外, 新发现了 3162.5keV 和 3825.1keV 能级及其相应的 600.7keV 和 662.6keV 跃迁, 将自旋扩展到  $15^-$ , 还新发现了 292.2keV 和 666.5keV 跃迁.

跃迁比率  $B(E1) / B(E2)$  正比于八极形变参数  $\beta_3$  的平方的期望值<sup>[7]</sup>, 是判断八极形变带的重要依据. 对一般的八极形变带, 其量级为  $10^{-6} \text{fm}^{-2}$ <sup>[3,4,6]</sup>. 计算公式如下所示:

$$\frac{B(E1)}{B(E2)} = 0.770 \times 10^{-12} \cdot \frac{I_{\text{nt}}(E1)}{I_{\text{nt}}(E2)} \cdot \frac{E_{\gamma_2}^5}{E_{\gamma_1}^3}, \quad (1)$$

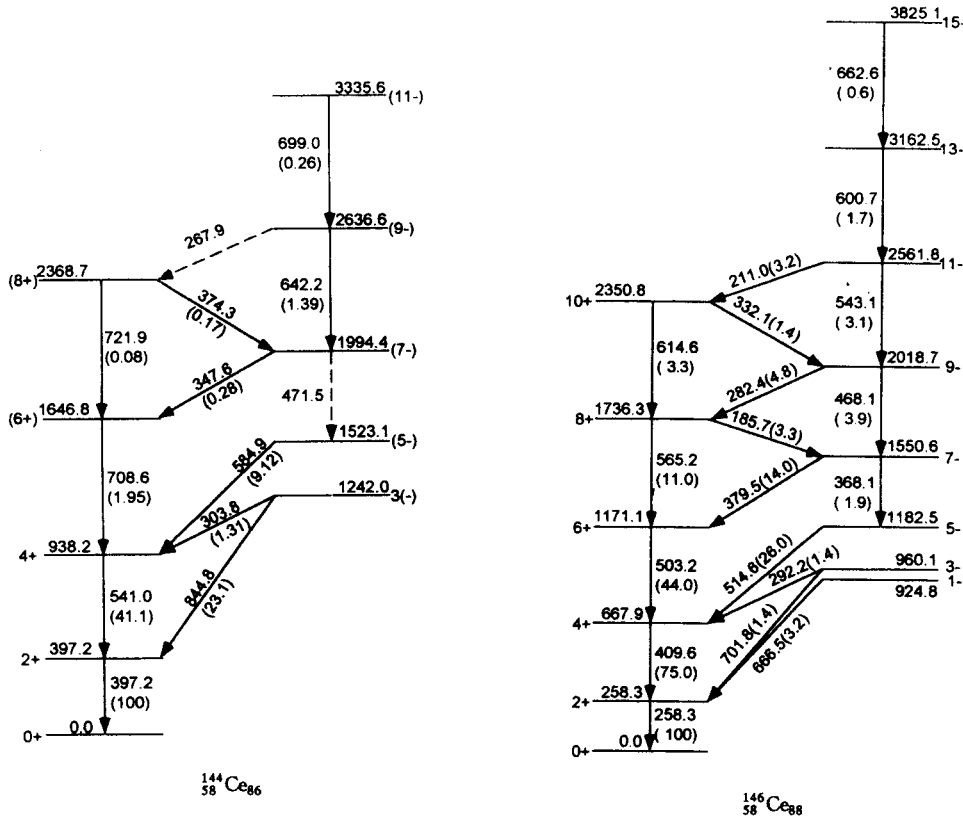


图1 <sup>144,146</sup>Ce八极形变集体带能级图

-----不太肯定的极弱跃迁.

其中  $Int(E1)$ ,  $Int(E2)$  分别代表 E1 和 E2 跃迁的相对强度;  $E_{\gamma_1}$ ,  $E_{\gamma_2}$  分别代表 E1 和 E2 跃迁的能量, 取单位为 keV;  $B(E1)$ ,  $B(E2)$  代表 E1 和 E2 跃迁的约化跃迁几率. 利用下面的式子经过简单的推导可得到公式 (1), 只需注意到  $L$  级电多极辐射的跃迁几率  $\lambda(EL)$  正比于相对强度  $Int(EL)$ ,

$$\lambda(EL) = \frac{8\pi(L+1)}{L[(2L+1)!!]^2} \cdot \frac{k^{2L+1}}{\hbar} B(EL), \tag{2}$$

其中  $k = \omega / c = E_{\gamma} / (\hbar c)$  为光子的波数.

用最简单的单质子模型, 韦斯科夫 (W.F. Weisskopf) 估计了  $\gamma$  跃迁几率的数量级, 公式如下所示<sup>[8]</sup>:

$$\lambda(EL) = \frac{2(L+1)}{L[(2L+1)!!]^2} \left( \frac{3}{L+3} \right)^2 \frac{e^2 R^{2L}}{\hbar} k^{2L+1}, \tag{3}$$

其中  $R = r_0 A^{1/3}$  为核的半径,  $A$  为原子量. 取  $r_0$  为 1.2fm, 联立公式 (2) 和 (3), 可得到韦斯科夫估计的电偶极约化跃迁几率

$$B(E1)_w = \frac{A^{2/3}}{15.5}, \quad (4)$$

当  $A$  等于 144, 146 时,  $B(E1)_w$  分别为 1.77、1.79 fm<sup>2</sup>e<sup>2</sup>. 对八极形变带来讲,  $B(E1) / B(E1)_w$  的量级为  $10^{-3} \sim 10^{-2}$ [3,6,7], 电偶极跃迁增强. 如 <sup>225</sup>Ac 和 <sup>218</sup>Ra 核, 此比值的量级为  $10^{-2}$ , 比铀系形变重核的值大 2~3 个数量级, 比典型的单粒子跃迁大 3~4 个量级[7].

内禀电偶极矩  $D_0$  也是判断衡量是否发生了八极形变的重要物理量, 它与四极形变参数  $\beta_2$  和八极形变参数  $\beta_3$  的乘积成正比[7], 具有空间反演对称性的形变, 其值为零. 在转动模型中, 内禀电偶极矩  $D_0$  与电偶极约化跃迁几率  $B(E1)$  通过下面的公式直接相关[3]:

$$D_0 = \left[ \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{B(E1)}{\langle I_1 0 1 0 | I_1 0 \rangle^2} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

其中  $\langle I_1 0 1 0 | I_1 0 \rangle = - \left( \frac{I_i}{2I_i + 1} \right)^{1/2}$ ,  $i$  和  $f$  分别表示跃迁的初态和末态 ( $I_f = I_i - 1$ ).

表 1 列出了 <sup>144,146</sup>Ce 核的计算结果, <sup>146</sup>Ce 的数据主要因为相对跃迁强度定得不同而与文献 [6] 有些差异, 但量级一样. 从表中数据可以看出, <sup>144</sup>Ce 的各项计算结果都与 <sup>146</sup>Ce 及其它八极形变核处于同一个量级, 这进一步证实它是一个八极形变核. 从图 1 各能级的自旋和宇称可以知道 <sup>144,146</sup>Ce 都有 Simplex 数为 1 的八极形变带[7]. 至于为什么实验观察到的 <sup>144</sup>Ce 交叉跃迁少, 本实验组认为一方面是因为 <sup>144</sup>Ce 的裂变相对产额较低, 测量的统计精度不够高; 另一方面是因为高自旋态对应能级太高, 而自发裂变能量不高, 故核处在这些高能级上的几率小, 有关跃迁太弱.

为了讨论八极形变的稳定性随自旋的变化, 定义[7,8]

表 1 <sup>144,146</sup>Ce 的电偶极跃迁  $B(E1)$  和内禀电偶极矩  $D_0$

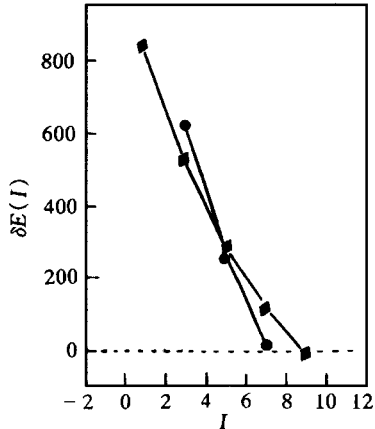
核素	$I_i^\pi$	$\frac{B(E1)}{B(E2)} \times 10^{-6} / \text{fm}^{-2}$	$B(E1) \times 10^{-2} / (\text{e}^2 \text{fm}^2)$	$\frac{B(E1)}{B(E1)_w} (10^{-3})$	$D_0 / (\text{e} \cdot \text{fm})$
<sup>144</sup> Ce	8 <sup>+</sup>	6.12	1.16	6.55	0.32
<sup>146</sup> Ce	11 <sup>-</sup>	4.00	0.84	4.69	0.27
	10 <sup>+</sup>	0.78	0.16	0.89	0.12
	9 <sup>-</sup>	0.95	0.20	1.12	0.13
	8 <sup>+</sup>	2.08	0.44	2.46	0.20
	7 <sup>-</sup>	0.70	0.15	0.84	0.12

注: 假设  $B(E2)$  与自旋无关, 对 <sup>144</sup>Ce, 取  $B(E2) = B(E2: 2^+ \rightarrow 0^+) = 0.19 \times 10^4 \text{e}^2 \text{fm}^4$ ; 对 <sup>146</sup>Ce, 取  $B(E2) = B(E2: 2^+ \rightarrow 0^+) = 0.21 \times 10^4 \text{e}^2 \text{fm}^4$ [6].

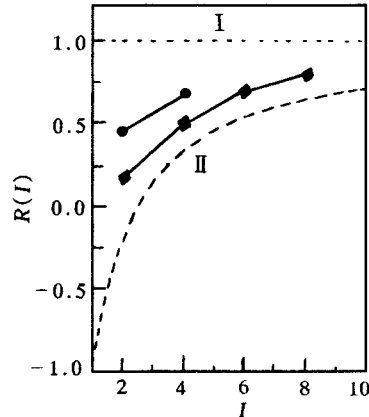
$$\delta E(I) = E(I^-) - \frac{(I+1)E(I-1^+) + IE(I+1^+)}{2I+1}, \quad (6)$$

$$R(I) = \frac{\omega^-(I)}{\omega^+(I)} = 2 \frac{E(I+1^-) - E(I-1^-)}{E(I+2^+) - E(I-2^+)}. \quad (7)$$

在稳定的八极形变极限下, 奇偶宇称带的能级劈裂  $\delta E(I)$  应接近于 0, 奇偶宇称带的转动

图 2 <sup>144,146</sup>Ce 的  $\Delta E$  随角动量  $I$  变化曲线

■ <sup>144</sup>Ce, ● <sup>146</sup>Ce.

图 3 <sup>144,146</sup>Ce 的  $R$  随角动量  $I$  变化曲线

■ <sup>144</sup>Ce, ● <sup>146</sup>Ce.

I 稳定八极形变, II 顺排八极振动.

频率比  $R(I)$  应接近于 1; 而在顺排八极振动的极限下,  $R(I)$  应接近于  $(2I-5)/(2I+1)$ <sup>[9]</sup>. 图 2 和图 3 分别给出了奇偶宇称带的能级劈裂和转动频率比随角动量的变化, 并与极限情况进行了比较. 从图 2 可以看出, 随角动量的增加, 实验曲线很快地趋向于极限曲线 (<sup>144,146</sup>Ce 从偏离很远的地方分别在角动量为  $7\hbar$  和  $9\hbar$  时接近极限曲线). 这表明八极形变随角动量的增加而趋于稳定. 对于图 3, 就已有的数据还看不出实验曲线会趋向于哪一种极限. 铯系有类似的处在中间区域的八极形变核, 但大部分在高自旋时趋向于两个极限中的一个<sup>[7]</sup>. 如果我们能确定更高角动量的能级位置, 也许能看出实验曲线的走向.

### 参 考 文 献

- [1] Leander G A et al. Nucl Phys., 1982, **A388**:452—476
- [2] Nazarewicz W. Proc. int. Conf. on Nuclear Structure Thruhg Static and Dynamic Moments. Melbourne: Conf. Proc. Press. Melbourne, 1987, 180
- [3] Phillips W R et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**(26):3257—3260
- [4] Urban W et al. Phys. Lett., 1988, **B200**(4):424—428
- [5] Michelatakis E et al. J. Phys., 1982, **G8**:111—152
- [6] Phillips W R et al. Phys. Lett., 1988, **B212**(4):402—406
- [7] Nazarewicz W, Olanders P. Nucl. Phys., 1985, **A441**:420—444
- [8] Xu Sida. Nuclear Physics. Beijing: Tsinghua University Press(in Chinese), 1992, 92—93  
(徐四大. 核物理学. 北京: 清华大学出版社, 1992, 92—93)
- [9] Afanasjev A V. J. Phys., 1993, **G19**:L143—L150

## Octupole Deformation in Neutron-rich $^{144,146}\text{Ce}$ Nuclei\*

Zhu Lingyan   Zhu Shengjiang   Li Ming

(Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

J. H. Hamilton<sup>1</sup>   A. V. Ramayya<sup>1</sup>   B. R. S. Babu<sup>1</sup>

W. C. Ma<sup>2</sup>   J. O. Rasmussen<sup>3</sup>   M. A. Stoyer<sup>3</sup>   I. Y. Lee<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> (Department of Physics, Vanderbilt University, Nashville, TN-37235, USA)

<sup>2</sup> (Department of Physics, Mississippi State University, MS-39762, USA)

<sup>3</sup> (Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA-94720, USA)

<sup>4</sup> (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN-37831, USA)

**Abstract**    The high spin states and octupole deformation collective bands of neutron-rich nuclei  $^{144,146}\text{Ce}$  have been established through measuring the prompt  $\gamma$ -rays from spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$ . The highest spin state is up to  $15^-$ . The characteristics of octupole deformation for the two nuclei are discussed.

**Key words**    spontaneous fission, high spin states, octupole deformation

---

Received 9 October 1997, Revised 11 March 1998

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China(19375029) and the Science Fundation of chinese Nuclear Industry (J94Y5072)