

## 丰中子核 $^{145,147}\text{La}$ 的八极形变\*

朱胜江 王牧歌 朱凌燕 李明 甘翠云 杨利明  
萨哈伊 朴秀日 邓景康 龙桂鲁  
(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> J. K. Hwang<sup>1</sup> W. C. Ma<sup>2</sup> J. Komicki<sup>1</sup>  
J. D. Cole<sup>3</sup> R. Aryaeinejad<sup>3</sup> M. W. Drigert<sup>3</sup> J. O. Rasmussen<sup>4</sup> M. A. Stoyer<sup>4</sup>  
S. Y. Chu<sup>4</sup> K. E. Gregorich<sup>4</sup> M. F. Mohar<sup>4</sup> S. G. Prussin<sup>4</sup> I. Y. Lee<sup>4</sup>  
Yu. Ts. Oganessian<sup>5</sup> G. M. Ter-Akopian<sup>5</sup> A. V. Daniel<sup>5</sup>

1 (Department of Physics, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA)  
2 (Department of Physics, Mississippi State University, MS 39762, USA)  
3 (Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, ID 83415, USA)  
4 (Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA)  
5 (Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia)

**摘要** 通过对 $^{252}\text{Cf}$ 自发裂变产生的瞬发 $\gamma$ 谱的实验研究,建立与扩展了丰中子核 $^{145,147}\text{La}$ 的高自旋态能级图,最高自旋态达到 $(41/2^+)$ 与 $(43/2^-)$ .测得的交叉相联的相反宇称带及带间的强化E1跃迁说明在 $^{145,147}\text{La}$ 中形成强的八极形变.对 $^{145}\text{La}$ 的研究表明,具有轴对称形状的四极形变与具有反演不对称形状的八极形变在同一核中产生共存与竞争.在 $\pi h_{11/2}$ 带中观测到的带交叉位于 $\hbar\omega\approx 0.26-0.30\text{MeV}$ 附近,由推转壳模型计算表明,它是由一对 $i_{13/2}$ 中子的顺排所引起的.

**关键词** 核结构 高自旋态 八极形变 自发裂变

### 1 引言

原子核的八极形变反映在内禀坐标系中空间反演的不对称性,即八极形变的原子核具有反演不对称的形状.近年来对于八极形变的研究引起人们很大的关注.理论上预言,在 $Z=56, N=88$ 核附近存在一个八极形变区<sup>[1-3]</sup>,这个区域的八极形变趋动轨道为

1999-03-02 收稿

\* 国家自然科学基金(19775026),核工业科学基金(Y7197AY509)以及美国能源部(DE-FG05-88ER40407, DE-FG03-87ER40323)资助

$\pi(h_{11/2} \otimes d_{5/2})$ 与 $\nu(i_{13/2} \otimes f_{7/2})$ . 八极形变集体带可用“simplex”量子数  $s$  来表征. 对于偶核,  $s = \pm 1$ , 对于奇  $A$  核,  $s = \pm i$ . 这一理论的预言引起人们从实验上寻找八极形变的很大兴趣. 然而,  $Z = 56, N = 88$  附近的核位于丰中子核区, 在目前条件下很难用通常的重离子熔合-蒸发反应研究其高自旋态, 一种有效的手段是通过测量重核裂变产生的瞬发  $\gamma$  谱来进行研究<sup>[4-6]</sup>. 通过这种方法, 目前在此区内已发现众多的八极形变核, 包括:  $^{139}\text{Xe}$ <sup>[6-8]</sup>,  $^{140-144, 146, 148}\text{Ba}$ <sup>[8-13]</sup>,  $^{144, 146}\text{Ce}$ <sup>[14, 15]</sup> 等, 从而在此区内已形成八极形变岛. 而对于丰中子奇  $Z$   $^{145, 147}\text{La}$  核, 其质子数位于已发现的 Ba 和 Ce 八极形变核之间, 预计也是存在八极形变的重要候选者. 在早期的报道中, 通过衰变  $\gamma$  谱的测量, 对  $^{145}\text{La}$ <sup>[16]</sup> 与  $^{147}\text{La}$ <sup>[17]</sup> 的低激发态能级进行了研究, 未发现任何集体带结构. 本工作通过对  $^{252}\text{Cf}$  自发裂变产生的瞬发  $\gamma$  谱的分析, 报道对  $^{145, 147}\text{La}$  高自旋态八极形变的研究结果. 在本工作即将完成时<sup>[18]</sup>, Urban 等<sup>[19]</sup> 报道了  $^{145, 147}\text{La}$  八极关联的一些结果. 然而, 与文献<sup>[19]</sup> 相比, 我们的工作大大扩展了这两个核的高自旋态结构.

## 2 实验与数据分析

实验技术及数据处理方法参见文献<sup>[4, 6, 8-10]</sup>, 这里仅作简略叙述. 实验是由众多研究组联合在美国洛伦兹伯克利国家实验室(LBNL)的 Gammasphere 上进行的, 共进行两次. 第一次利用 Gammasphere 早期的实验装置, 由 36 个反康高纯 Ge 组成的阵列获取数据, 记录三重以上的符合事件, 所用  $^{252}\text{Cf}$  源的裂变强度为  $6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ , 得到约  $9.8 \times 10^9$  个折合成两重符合的事件数. 第二次实验仍在 Gammasphere 上进行, 用 72 个 Ge 探测器, 所用源强与第一次类似, 得到约  $2.9 \times 10^{10}$  个折合成两重符合的事件数.

对于所测实验数据, 分别建立了三维  $\gamma$ - $\gamma$ - $\gamma$  符合矩阵. 数据分析是在清华大学进行的, 采用移植了的功能很强的数据处理软件包. 因为在自发裂变中产生围绕  $A = 100-150$  区域大量的丰中子核, 这些核的高自旋态与低自旋态退激  $\gamma$  谱线混杂在一起, 使得数据分析工作极其复杂. 采用三维  $\gamma$ - $\gamma$ - $\gamma$  符合(双开门)方法能消除绝大部分干扰谱线, 使特定核的极弱跃迁的识别成为可能. 另一种识别新跃迁的方法是利用互补核. 在自发裂变中, 重核绝大部分分裂成两块, 称为互补核. 每块在退激过程中先发射不同数目的中子, 然后发射  $\gamma$  射线. 在对某个核的  $\gamma$  谱线开门时, 除了能够观测到其本身的级联  $\gamma$  跃迁外, 其互补核的  $\gamma$  谱线应也能观测到. 通过反复分析比较, 可以建立起新的高自旋态能级图.

## 3 结果与讨论

图 1 给出对  $^{145}\text{La}$  的一个双门符合谱的例子. 由图可以清楚地看到部分属于  $^{145}\text{La}$  的跃迁谱线. 因为开门的跃迁谱线自旋态比较高, 其互补核的峰显得较弱, 但从 366.0 与 477.9 keV 的  $\gamma$  双门符合谱中, 仍能清楚地看到  $^{103}\text{Nb}(4n)$  的 163 与 217 keV  $\gamma$  跃迁峰. 图 2 与图 3 为新建立的  $^{145}\text{La}$  与  $^{147}\text{La}$  的高自旋态能级图. 图中除标出能级能量、跃迁能量及能级的自旋与宇称外, 还标出跃迁的相对强度. 能级图的上方标出具有 E2 级联跃迁的集体带结构. 所有在文献<sup>[19]</sup> 中报道的能级与跃迁, 除了  $^{147}\text{La}$  中的 1109.7 keV 能级外,

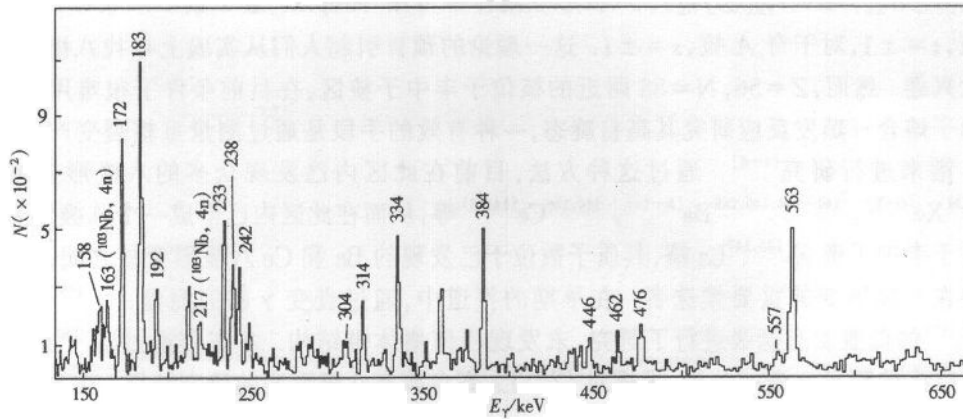


图1 对<sup>145</sup>La的366.0与477.9keV  $\gamma$ 峰双开门所得的符合谱

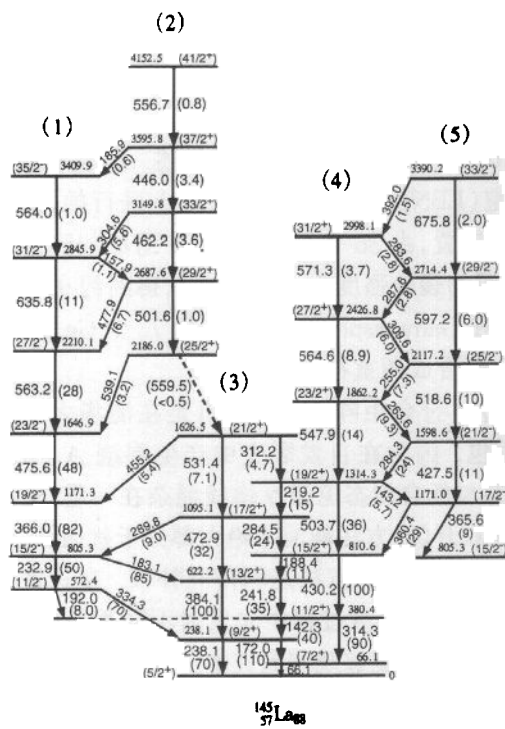


图2 <sup>145</sup>La能级图

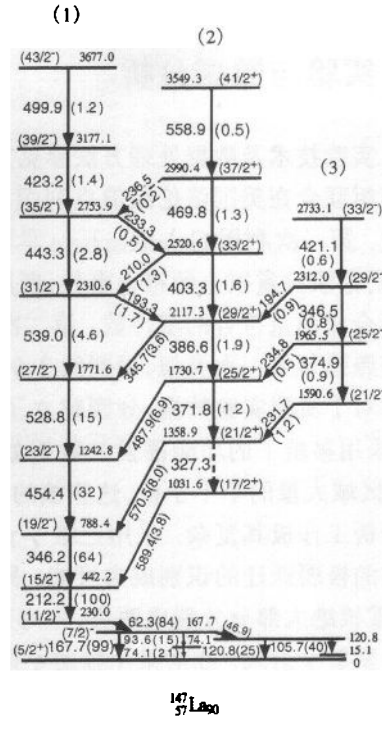


图3 <sup>147</sup>La能级图

其它在本工作中都得到了证实. 与文献[19]相比,我们的工作大大扩展了高自旋态结构. 在<sup>145</sup>La中,新识别了9个能级与19个新的 $\gamma$ 跃迁. 特别重要的是发现了新的基于2186.0keV能级的集体带(2)以及此带与带(1)之间的交叉跃迁. 而带(3)—(5)在高自旋态也被扩展了许多新能级与跃迁. 在低自旋态部分,还发现了从572.4到380.4keV的192.0keV的 $\gamma$ 跃迁. 在<sup>147</sup>La中,新识别了5个高自旋态能级和7个跃迁,观测到了重要的带(1)与带(2)间的几个交叉跃迁. 此外,新建立了1031.6keV能级以取代文献[19]中

的 1109.7keV 的不确定能级. 在早期的衰变  $\gamma$  谱的测量中, <sup>145</sup>La 与 <sup>147</sup>La 的基态自旋与宇称分别被指定为  $(5/2^+, 7/2^+)^{[16]}$  与  $(5/2^+)^{[17]}$ . 对 <sup>145</sup>La 的其它低自旋态能级的自旋与宇称则未作任何指定, 而对 <sup>147</sup>La 的 167.2 与 120.8keV 的自旋与宇称分别指定为  $(3/2)^-$  与  $(3/2, 5/2)^+^{[16]}$ . 基于此区内的系统学比较, 文献[19]将 <sup>145</sup>La 的基态自旋与宇称指定为  $(5/2^+)$ , 这同我们的指定相符. 同时, 文献[19]基于内转换系数、分支比及角关联的测量, 将 <sup>145</sup>La 与 <sup>147</sup>La 的较低激发态的自旋与宇称作了指定, 这种指定是有充足的实验依据的. 对于新测得的 <sup>145</sup>La 中的带(2)能级的自旋与宇称的指定, 是根据与 <sup>147</sup>La 中带(2)类似的结构系统性比较以及带(1)与带(2)间强的 E1 跃迁特性而指定的. 其它新能级的自旋与宇称是基于每个带内的级联 E2 跃迁特性而推得的.

在 <sup>145</sup>La 中, 从基态一直到  $(23/2^+)$  能级, 具有级联 E2 跃迁的两个 signature 伙伴带(3)与(4)形成一个强耦合带, 两带之间由 M1/E2 跃迁相连接. 这种强耦合基带表明 <sup>145</sup>La 在较低自旋态下呈现轴对称转子的形状, 而在 <sup>147</sup>La 中则未观测到此结构. 图 4 为 <sup>145,147</sup>La 中每一个  $\Delta I=2$  的集体带的第一类转动惯量  $J_1$  对转动频率  $\hbar\omega$  的变化图(除了 <sup>147</sup>La 中的带(3)). 从图中可以看到, 对于 <sup>145</sup>La, 一直到  $\hbar\omega \approx 0.27\text{MeV}$  ( $I \approx 23/2\hbar$ ), 带(3)与带(4)的转动惯量几乎是等同的, 此点也支持以上的强耦合的观点. 这种强耦合的基带很可能起源于  $g_{7/2}$  质子的组态混合<sup>[19]</sup>.

负宇称带(1)和正宇称带(2)在 <sup>145</sup>La 和 <sup>147</sup>La 中具有类似的结构特性: 一对正负宇称带之间以强化 E1 交叉跃迁相连接, 形成了八极形变带结构, 正如在此区内相邻核, 比如, Ba<sup>[8-13]</sup> 与 Ce<sup>[14,15]</sup> 核中所展示的那样. 这种八极形变带结构显示了核的非轴对称形状. 在 <sup>145</sup>La 中新观测到的 477.9, 157.9, 304.6, 185.9keV 以及在 <sup>147</sup>La 中观测到的 345.7, 197.3, 210.0, 233.3keV 强的正负宇称带之间的交叉跃迁是八极形变强有力的证据. 这种八极形变结构具有 simplex 量子数  $s = +i$ . <sup>145</sup>La 中的另一八极形变带结构由带(4)和(5)组成, 与  $s = +i$  带相类似, 正负宇称带之间也观测到强化电偶极交叉跃迁, 此八极形变结构属于  $s = -i$  带.

本实验测得的  $B(E1)/B(E2)$  值列于表 1. 对于 <sup>145</sup>La 的  $s = -i$  的八极形变带(带(4)和带(5)), 随着自旋值  $I$  的增加,  $B(E1)/B(E2)$  值变化不明显, 平均值为  $1.3 \times 10^{-6} \text{fm}^{-2}$ . 此值约为相邻同中异位素 <sup>144</sup>Ba 所测值<sup>[10]</sup> 的 1 倍, 且与文献[19]所测值大体相符. 此组数据表明, 在 <sup>145</sup>La 的  $s = -i$  带具有非常强的八极关联. 而对于  $s = +i$  带(带(1)和带(2)),  $B(E1)/B(E2)$  值随  $I$  的增加变化剧烈, 平均值为  $1.5 \times 10^{-6} \text{fm}^{-2}$ , 在自旋值  $I$  为  $31/2\hbar$  时具有最大值为  $1.9 \times 10^{-6} \text{fm}^{-2}$ . 在 <sup>147</sup>La 中, 对于  $s = +i$  带(带(1)与带(2)),  $B(E1)/B(E2)$  的平均值为  $0.76 \times 10^{-6} \text{fm}^{-2}$ . 然而, 对

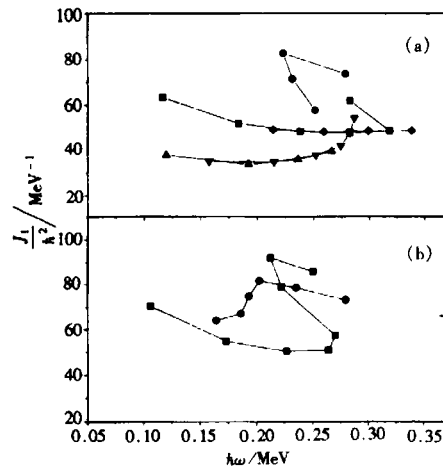


图 4 <sup>145</sup>La(a)与 <sup>147</sup>La(b)的集体带转动惯量  $J_1/h^2$  随转动频率  $\hbar\omega$  的变化  
对 <sup>145</sup>La: -■-带(1), -●-带(2),  
▲-带(3), -▼-带(4), -◆-带(5);  
对 <sup>147</sup>La: -■-带(1), -●-带(2).

于  $I \leq 31/2\hbar$  时,平均值为  $0.29 \times 10^{-6} \text{fm}^{-2}$ ,这个值也与文献[19]所测相当. 在  $I = 31/2\hbar$  时,与  $^{145}\text{La}$  相似,达到峰值  $1.8 \times 10^{-6} \text{fm}^{-2}$ . 总之,在  $^{147}\text{La}$  中所测  $B(E1)/B(E2)$  值也比相邻同中异位素  $^{146}\text{Ba}$  所测值<sup>[10]</sup>大得多.  $B(E1)/B(E2)$  值表明,这两个奇  $Z$  核的八极形变要比相邻偶  $Z$  的 Ba 核强,且在自旋值  $I = 31/2\hbar$  附近,  $B(E1)/B(E2)$  出现峰值,表明此时八极形变最为稳定.

表 1  $^{145,147}\text{La}$  的电偶极跃迁强度  $B(E1)$  与电四极跃迁强度  $B(E2)$  比值

	$E_{\gamma}/\text{keV}$	$I_{\pi}^{\gamma} \rightarrow I_{\pi}^{\gamma}$	$I_{\gamma}$	$\frac{B(E1)}{B(E2)} (\times 10^{-6})/\text{fm}^{-2}$
$^{145}\text{La}$	503.7	$19/2^{+} \rightarrow 15/2^{+}$	36(2)	1.3(1)
带(4)与(5)	143.2	$19/2^{+} \rightarrow 17/2^{-}$	5.7(3)	
$s = -i$	427.1	$21/2^{-} \rightarrow 17/2^{-}$	11(1)	1.0(1)
	284.3	$21/2^{-} \rightarrow 19/2^{+}$	24(2)	
	547.9	$23/2^{+} \rightarrow 19/2^{+}$	14(1)	1.4(1)
	263.6	$23/2^{+} \rightarrow 21/2^{-}$	9.3(5)	
	518.6	$25/2^{-} \rightarrow 21/2^{-}$	10(4)	1.3(5)
	255.0	$25/2^{-} \rightarrow 23/2^{+}$	7.3(3)	
	564.6	$27/2^{+} \rightarrow 23/2^{+}$	8.9(4)	1.0(1)
	309.6	$27/2^{+} \rightarrow 25/2^{-}$	6.0(4)	
	597.2	$29/2^{-} \rightarrow 25/2^{-}$	6.0(4)	1.1(1)
	287.9	$29/2^{-} \rightarrow 27/2^{+}$	2.8(3)	
	571.3	$31/2^{+} \rightarrow 27/2^{+}$	3.7(3)	1.6(2)
	283.9	$31/2^{+} \rightarrow 29/2^{-}$	2.8(3)	
	675.8	$33/2^{-} \rightarrow 29/2^{-}$	2.0(1)	1.4(1)
	392.0	$33/2^{-} \rightarrow 31/2^{+}$	1.5(1)	
带(1)与(2)	501.6	$29/2^{+} \rightarrow 25/2^{+}$	1.0(1)	1.5(2)
$s = +i$	477.5	$29/2^{+} \rightarrow 27/2^{-}$	6.7(3)	
	635.8	$31/2^{-} \rightarrow 27/2^{-}$	11.0(5)	1.9(4)
	157.6	$31/2^{-} \rightarrow 29/2^{+}$	1.0(2)	
	462.2	$33/2^{+} \rightarrow 29/2^{+}$	3.6(2)	0.90(7)
	304.6	$33/2^{+} \rightarrow 31/2^{-}$	5.6(3)	
	446.0	$37/2^{+} \rightarrow 33/2^{+}$	3.4(2)	0.37(7)
	185.9	$37/2^{+} \rightarrow 35/2^{-}$	0.6(1)	
$^{147}\text{La}$	371.8	$25/2^{+} \rightarrow 21/2^{+}$	1.2(1)	0.27(2)
带(1)与(2)	487.9	$25/2^{+} \rightarrow 23/2^{-}$	6.9(2)	
$s = +i$	386.6	$29/2^{+} \rightarrow 25/2^{+}$	1.9(2)	0.31(4)
	345.7	$29/2^{+} \rightarrow 27/2^{-}$	3.6(3)	
	539.0	$31/2^{-} \rightarrow 27/2^{-}$	4.6(3)	1.8(2)
	193.3	$31/2^{-} \rightarrow 29/2^{+}$	1.7(2)	
	403.3	$33/2^{+} \rightarrow 29/2^{+}$	1.6(2)	0.72(14)
	210.0	$33/2^{+} \rightarrow 31/2^{-}$	1.3(2)	
	443.3	$35/2^{-} \rightarrow 31/2^{-}$	2.8(2)	0.19(8)
	233.3	$35/2^{-} \rightarrow 33/2^{+}$	0.5(2)	
	469.8	$37/2^{+} \rightarrow 33/2^{+}$	1.3(2)	0.21(11)
	236.5	$37/2^{+} \rightarrow 35/2^{-}$	0.2(1)	

进一步考察<sup>145,147</sup>La中的 $s = +i$ 带,其负宇称带的带头都是基于 $(11/2^-)$ 能级,它起源于单质子 $\pi h_{11/2}$ 轨道<sup>[19]</sup>.将此八极形变带能级结构与相邻偶偶核<sup>144</sup>Ba和<sup>146</sup>Ba<sup>[10]</sup>相比较,如图5所示.发现在相邻同中异位素之间,即 $N = 88$ 的<sup>144</sup>Ba与<sup>145</sup>La, $N = 90$ 的<sup>146</sup>Ba与<sup>147</sup>La能级间距非常相近,说明<sup>145,147</sup>La的 $s = +i$ 带起源于 $\pi h_{11/2}$ 轨道与相邻偶偶核<sup>144,146</sup>Ba芯的耦合.虽然能级间距相似,但从 $B(E1)/B(E2)$ 比值可以看出,单质子的耦合强化了八极形变效应.

<sup>147</sup>La中的另一集体带(3)的自旋与宇称尚不能指定,它可能起源于八极声子与 $h_{11/2}$ 质子轨道耦合<sup>[19]</sup>.

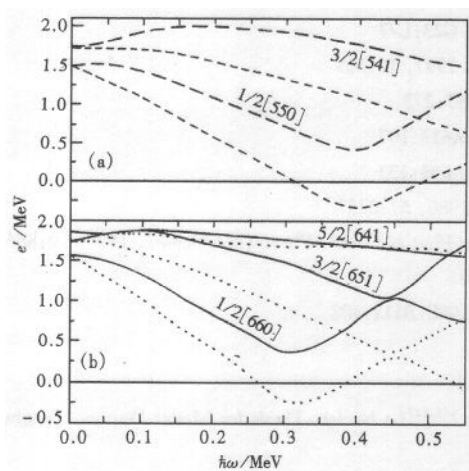


图6 由推转壳模型计算得的准质子(a)与准中子(b)的能级随转动频率的变化  
(a) - - -  $\pi = -, \alpha = +1/2,$   
 .....  $\pi = -, \alpha = -1/2;$   
 (b) ———  $\pi = +, \alpha = +1/2,$   
 - · - · -  $\pi = +, \alpha = -1/2.$

$h_{11/2}$ 质子对的顺排有可能被奇质子所堵塞.

### 4 结论

通过测量<sup>252</sup>Cf自发裂变产生的瞬发 $\gamma$ 谱,研究了丰中子核<sup>145,147</sup>La的高自旋态,识别了许多新的能级与跃迁,发现和扩展了这两个核中的八极形变带结构.从所测的电偶

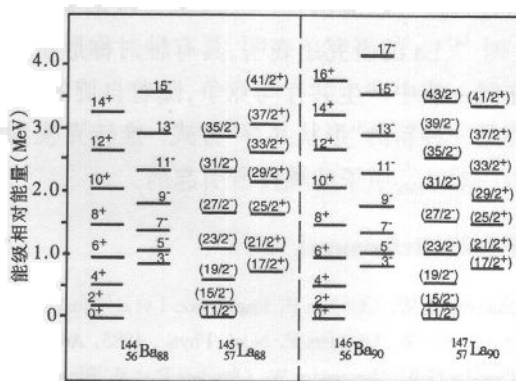


图5 丰中子同中异位素<sup>144</sup>Ba与<sup>145</sup>La( $s = +i$ 带),<sup>146</sup>Ba与<sup>147</sup>La( $s = +i$ 带)的八极形变带能级比较  
在<sup>145,147</sup>La中, $(11/2^-)$ 能级的能量取为零

从图4还可以看出,<sup>145,147</sup>La中的基于 $\pi h_{11/2}$ 轨道的负宇称带(1)的回弯发生在 $\hbar\omega \approx 0.25-0.30\text{MeV}$ 之间.我们用推转壳模型计算了准粒子能量 $e'$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 的变化,以便确定带交叉是由 $\pi h_{11/2}$ 质子还是 $\nu i_{13/2}$ 中子顺排所致.计算方法同文献[20].计算中的参量选取:四极形变参量 $\beta_2 = 0.163$ ,八极形变参量 $\beta_3 = 0.06$ ,十六极形变参量 $\beta_4 = 0$ ,对隙参量 $\Delta_p = 1.007, \Delta_n = 1.312$ ,质子与中子的费米能 $\lambda_p = -10.5576, \lambda_n = -5.0667$ .算得的准粒子能量随 $\hbar\omega$ 的变化如图6所示.由图可以看出,由一对 $i_{13/2}$ 中子顺排引起的带交叉发生在 $\hbar\omega = 0.32\text{MeV}$ 左右,此值与实验中观测的 $0.25-0.30\text{MeV}$ 值大体相符,而一对 $h_{11/2}$ 质子的顺排的频率在 $\hbar\omega = 0.40\text{MeV}$ 左右,此值比实验值高得多.所以,测得的回弯是由一对 $i_{13/2}$ 中子顺排所致.这种解释是有理由的,因为

极跃迁强度可以看出,  $^{145,147}\text{La}$  的八极形变相当强, 说明单质子的耦合增强了八极关联效应. 对  $^{145}\text{La}$  的研究还表明, 具有轴对称形状的四极形变与具有反演不对称形状的八极形变在同一核中产生共存与竞争, 随着自旋的增加, 轴对称形变减弱, 非轴对称形变增强, 这可能是一种新的“形状共存”方式. 推转壳模型计算表明, 在  $\pi h_{11/2}$  带中观测到的带交叉, 是由一对  $i_{13/2}$  中子的顺排所引起的.

### 参考文献(References)

- 1 Nazarewicz W, Olanders P, Ragnarsson I et al. Nucl. Phys., 1984, **A429**:269
- 2 Nazarewicz W, Olanders P. Nucl. Phys., 1985, **A441**:420
- 3 Leander G A, Nazarewicz W, Olanders P et al. Phys. Lett., 1985, **B152**:284
- 4 ZHU ShengJiang. Trends in Nucl. Phys., 1992, **9**(2):8  
(朱胜江. 核物理动态, 1992, **9**(2):8)
- 5 ZHU ShengJiang, Lee. I. Y. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1993, **17**:353  
(朱胜江, Lee. I. Y. 高能物理与核物理, 1993, **17**:353)
- 6 Hamilton J H, Ramayya A V, Zhu S J et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 1995, **35**:635
- 7 Bentaleb M, Schulz N, Lubkiewicz et al. Z. Phys., 1994, **A348**:245
- 8 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. J. Phys., 1997, **G23**:L77
- 9 Zhu S J, Wang M G, Hamilton J H et al. Chin. Phys. Lett., 1997, **14**:569
- 10 Zhu S J, Lu Q H, Hamilton J H et al. Phys Lett., 1995, **B357**:273
- 11 Urban W, Jones M A, Durell J L et al. Nucl. Phys., 1997, **A613**:107
- 12 Jones M A, Urban W, Durell J L et al. Nucl. Phys., 1996, **A605**:133
- 13 Phillips W R, Ahmad I, Emling H et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**:3257
- 14 ZHU LingYan, ZHU ShengJiang, LI Ming et al. High Energy Phys and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, **22**:885  
(朱凌燕, 朱胜江, 李明等. 高能物理与核物理, 1998, **22**:885)
- 15 Phillips W R, Janssens R V F, Ahmad I et al. Phys. Lett., 1988, **B212**:402
- 16 Pfeiffer B et al. Z. Phys., 1978, **A287**:191
- 17 Mateosian E D, Peker L A. Nucl. Data Sheets, 1992, **66**:712
- 18 WANG MuGe. Research on High Spin States in Neutron-Rich  $^{145,147}\text{La}$  Nuclei, Thesis for Master Degree, Tsinghua University, 1996, 6  
(王牧歌. 丰中子核  $^{145,147}\text{La}$  高自旋态研究, 清华大学硕士学位论文, 1996, 6)
- 19 Urban W, Phillips W R, Durell J L et al. Phys. Rev., 1997, **C54**:945
- 20 Aryaeinejad R J, Cole J D, Greenwood R C et al. Phys. Rev., 1993, **C48**:566

**Octupole Deformation in Neutron-Rich<sup>145,147</sup>La Nuclei\***

ZHU ShengJiang WANG MuGe ZHU LingYan LI Ming GAN CuiYun  
YANG LiMing M Sakhaee Pau Sanli DENG JingKang LONG GuiLu  
(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

J. H. Hamilton<sup>1</sup> A. V. Ramayya<sup>1</sup> B. R. S. Babu<sup>1</sup> J. K. Hwang<sup>1</sup> W. C. Ma<sup>2</sup>  
J. Komicki<sup>1</sup> J. D. Cole<sup>3</sup> R. Aryaeinejad<sup>3</sup> M. W. Drigert<sup>3</sup> J. O. Rasmussen<sup>4</sup>  
M. A. Stoyer<sup>4</sup> S. Y. Chu<sup>4</sup> K. E. Gregorich<sup>4</sup> M. F. Mohar<sup>4</sup> S. G. Prussin<sup>4</sup>  
I. Y. Lee<sup>4</sup> Yu. Ts. Oganessian<sup>5</sup> G. M. Ter-Akopian<sup>5</sup> A. V. Daniel<sup>5</sup>  
1(Department of Physics, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA)  
2(Department of Physics, Mississippi State University, MS 39762, USA)  
3(Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, ID 83415, USA)  
4(Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA)  
5(Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia)

**Abstract** The level schemes with high spin states in neutron-rich<sup>145,147</sup>La nuclei have been established from the study of prompt  $\gamma$ -rays emitted in the spontaneous fission of <sup>252</sup>Cf. Many new levels and  $\gamma$  transitions have been identified. The highest spin states in both nuclei were expanded up to  $(41/2^+)$  and  $(43/2^-)$  respectively. The alternating parity band structures and strong E1 transitions between negative- and positive-parity bands show strong octupole deformation. The collective bands observed in<sup>145</sup>La give evidence for co-existence and competition between symmetric and asymmetric shapes. From the systematic comparison with the neighboring isotones, the  $s = +i$  bands in both nuclei most probably originate from the single-particle  $\pi h_{11/2}$  orbital coupling with the neighboring even-even cores, respectively. Band crossing of the  $\pi h_{11/2}$  bands was found around  $\hbar\omega \approx 0.26$ — $0.30$  MeV and these backbends are related to the alignment of two  $i_{13/2}$  neutrons from cranked shell model calculations.

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

Received 2 March 1999

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(19775026), Science Foundation of Chinese Nuclear Industry (Y7197AY509) and U. S. Department of Energy (DE-FG05-88ER40407 and DE-FG03-87ER40323)