

① 23-30

# 围绕 $Z=56$ 和 $N=88$ 丰中子核区八极形变的研究\*

朱胜江

(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

0571.21

**摘要** 介绍了通过测量重核裂变产生的瞬发  $\gamma$  谱方法,对围绕  $Z=56$ 、 $N=88$  丰中子核区高自旋态八极形变的研究,并对 Xe、Ba、Ce 和 La 等丰中子核链的八极形变特性进行了讨论.

**关键词** 核结构 高自旋态 八极形变

**分类号** O571.21

丰中子核区

## 1 前言

原子核的八极形变反映在内禀坐标系中,为空间反演的不对称性.理论计算<sup>[1~3]</sup>表明,当一对质子与中子所处的单粒子轨道同时具有的轨道量子数之差为  $\Delta n=1$ 、 $\Delta l=3$ 、 $\Delta j=3$  且互相靠近时,将产生大的八极相互作用矩阵元,这样的核有可能在较低的激发态下产生稳定的八极形变.稳定的八极形变有可能在两个区域内产生:其一为围绕  $Z=88$ 、 $N=132$  的锆系区,其八极驱动轨道为  $\pi(i_{13/2} \otimes f_{7/2})$  与  $\nu(j_{15/2} \otimes g_{9/2})$ ,其二为围绕  $Z=56$ 、 $N=88$  的丰中子核区,其八极驱动轨道为  $\pi(h_{11/2} \otimes d_{5/2})$  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.对于偶偶核,  $s=\pm 1$ ;对于奇  $A$  核,  $s=\pm i$ .

实验上所观测到的八极形变带最显著的特征是类似于“准分子”转动带的结构:由一对具有  $\Delta l=2$  的字称相反的 E2 级联跃迁集体带构成,两带间由  $\Delta l=1$  的交叉跃迁相联接.这种交叉跃迁为强的 E1 跃迁.最早是在围绕  $Z=88$ 、 $N=132$  的 Th-Ac-Ra 区发现了八极形变带<sup>[4~8]</sup>,从而引起理论与实验工作者的关注.其后,在围绕  $Z=56$ 、 $N=88$  区域,发现了  $Z \geq 60$  的  $^{146,148}\text{Nd}$  与  $^{150}\text{Sm}$ <sup>[9,10]</sup> 核的八极形变.然而对于  $Z \leq 58$  的 Ce、Ba 及 Xe 等丰中子核,由于实验条件的限制,则研究的较晚.随着实验技术的发展,特别是大规模反

康  $\gamma$  晶体球(如美国的 Gammasphere 与欧洲的 Eurogam)的建成,对这个区域内八极形变的研究已取得突破性进展<sup>[11]</sup>.目前国际上有两个合作组在进行这方面的研究工作:一是围绕 Gammasphere 的合作组,由美、中、俄等国的研究组组成;二是围绕 Eurogam 的合作组,由英、法、美等国的研究组组成.两组的研究相互竞争,相互补充.

在  $Z \leq 58$  区域最早报导的八极形变核为  $^{144,146}\text{Ba}$ <sup>[12]</sup> 与  $^{146}\text{Ce}$ <sup>[13]</sup>.其后,不断有新的结果出现.清华大学研究组长期以来,与国外有关大学与实验室进行合作研究,利用国外先进的实验设备,获取大量的原始数据,然后在校内进行复杂的数据分析,系统地研究了  $A=100$  与  $A=140$  区众多的丰中子核高自旋态结构,取得了一系列重要结果.在围绕  $Z=56$ 、 $N=88$  核区,发现了 Xe、Ba、Ce 及 La 核链的众多的八极形变,从而在此区形成了一个八极形变岛.下面对实验方法及主要结果作一简要介绍.

## 2 实验与数据分析

在目前条件下,难于用通常的重离子熔合-蒸发反应产生此核区内的丰中子核的高自旋态.一种很有效的手段是通过测量重核(如  $^{252}\text{Cf}$  或  $^{248}\text{Cm}$  等)的自发裂变产生的瞬发  $\gamma$  射线谱研究丰中子核的高自旋态<sup>[14]</sup>.重核的裂变可产生上百种丰中子核,测量其瞬发

\* 国家自然科学基金(项目号19375029)和核工业科学基金(项目号J94AY5072)资助.

$\gamma$  谱可以得到大量丰中子核的高自旋态信息。目前的研究表明,其最高自旋态可以超过 20  $\hbar$ 。应该指出的是,此项研究工作不是一次实验就完成的,而是随着探测技术与数据处理技术的不断发展而反复开展实验研究,实验的精度不断提高,新的结果也不断出现。

第一阶段实验是 1988 年在美国橡树岭实验室的 Holifield 重离子设施 (HHIRF) 上进行的,所用  $^{252}\text{Cf}$  源强度为  $\sim 6 \times 10^4$  裂变/秒,由 20 个反康 Ge 探测器组成的测量装置测量  $\gamma$ - $\gamma$  符合事件,总计记录约  $2 \times 10^7$  个  $\gamma$ - $\gamma$  符合事件。此次实验的目的是研究实验方法及数据处理技术,尽管统计性较差,但仍扩展了 30 多个偶偶核的转晕带结构<sup>[16,16]</sup>。第二阶段实验于 1991~1992 年仍在美国橡树岭实验室进行,实验装置与第一次类似,放射源为  $^{252}\text{Cf}$  与  $^{242}\text{Pu}$ , 分别得到约  $2 \times 10^9$  个  $\gamma$ - $\gamma$  符合事件。我们对此次实验进行了系统的研究,大大扩展了原有的结果,并且第一次报导了  $^{143}\text{Ba}$  的八极形变带<sup>[17]</sup>。第三阶段实验是 1993~1995 年在美国洛仑兹伯克利实验室完成,仍用  $^{252}\text{Cf}$  源。本阶段的实验进行了两次,第一次利用 Gammasphere 早期的实验装置(由 36 个反康 Ge 组成的多探头测量装置),记录三重以上的符合事件,总计得到约  $9.8 \times 10^9$  个折合成两重符合的事件数。第二次则利用

72 个 Ge 探测器,得到约  $2.9 \times 10^{10}$  个折合成两重符合的事件数据。此阶段的实验精度大为提高,使得许多极弱的跃迁得以观察。

数据处理采用通常的  $\gamma$ - $\gamma$  符合法。对于在橡树岭实验室所做的实验,建立二维  $\gamma$ - $\gamma$  符合矩阵,而对于在洛仑兹伯克利实验室所做的实验,则建立三维  $\gamma$ - $\gamma$ - $\gamma$  符合矩阵。由于涉及到上百种丰中子核的退激  $\gamma$  谱线,识别属于特定核的跃迁,尤其是多种核的能量相近的跃迁重迭在一起时,就显得特别困难,所以对于早期的  $\gamma$ - $\gamma$  符合矩阵,只能识别低自旋态的强的跃迁,而三维  $\gamma$ - $\gamma$ - $\gamma$  符合对于消除重峰及其它干扰特别有效。通过反复开门比较可识别出极弱的高自旋态跃迁谱线。

在裂变瞬发  $\gamma$  谱的数据分析中,识别特定核跃迁谱线的一个重要方法是利用互补核。在一次裂变发生时,绝大部分产物为两个丰中子核,蒸发几个中子后各自退激发出  $\gamma$  谱线。所以,当在属于一种丰中子核的  $\gamma$  谱线开门时,除了能够观测到其本身的级联  $\gamma$  跃迁外,对应不同中子发射道的互补核的  $\gamma$  谱线应也能观测到,如文献[23]中图 1 所示。图中为已识别的  $^{141}\text{Ba}$  的部分跃迁的和门谱,除了观测到众多的  $^{141}\text{Ba}$  跃迁峰外,可以清楚的观测到其互补核 Mo 同位素的不同中子发

	N								
	84	85	86	87	88	89	90	91	92
Xe 54		$^{139}\text{Xe}$	$^{140}\text{Xe}$	$^{141}\text{Xe}$					
Cs 55									
Ba 56	$^{140}\text{Ba}$	$^{141}\text{Ba}$	$^{142}\text{Ba}$	$^{143}\text{Ba}$	$^{144}\text{Ba}$		$^{146}\text{Ba}$		$^{148}\text{Ba}$
La 57					$^{145}\text{La}$		$^{147}\text{La}$		
Ce 58			$^{144}\text{Ce}$		$^{146}\text{Ce}$				
Z									

图 1 在  $Z=56$ 、 $N=88$  区域利用裂变瞬发  $\gamma$  谱法发现的具有八极形变的核

射线  $^{198}\text{Mo}(3n)$ 、 $^{107}\text{Mo}(4n)$  和  $^{196}\text{Mo}(5n)$  的  $\gamma$  谱线. 反之, 若对不同互补核 Mo 发射的  $\gamma$  谱线开门, 则可观测到相应的  $^{141}\text{Ba}$  的  $\gamma$  峰.

了较为系统的研究, 新发现或扩展了众多核的八极形变带, 如图 1 所示.

### 3 结果与讨论

迄今为止, 我们已经对处于  $Z=56$ 、 $N=88$  丰中子核区的 Xe、Ba、Ce 和 La 核链进行

#### 3.1 偶偶核 $^{140}\sim^{148}\text{Ba}$ 的八极形变

1986年, Phillips 等<sup>[12]</sup>报导了  $^{144,146}\text{Ba}$  的八极形变带, 最高自旋态为  $15^-$ , 但未观测到  $^{146}\text{Ba}$  核的正负宇称带间的交叉跃迁. 其后, 我们报导了  $^{142}\text{Ba}$ <sup>[16]</sup> 与  $^{140}\text{Ba}$ <sup>[19]</sup> 的八极形变带,

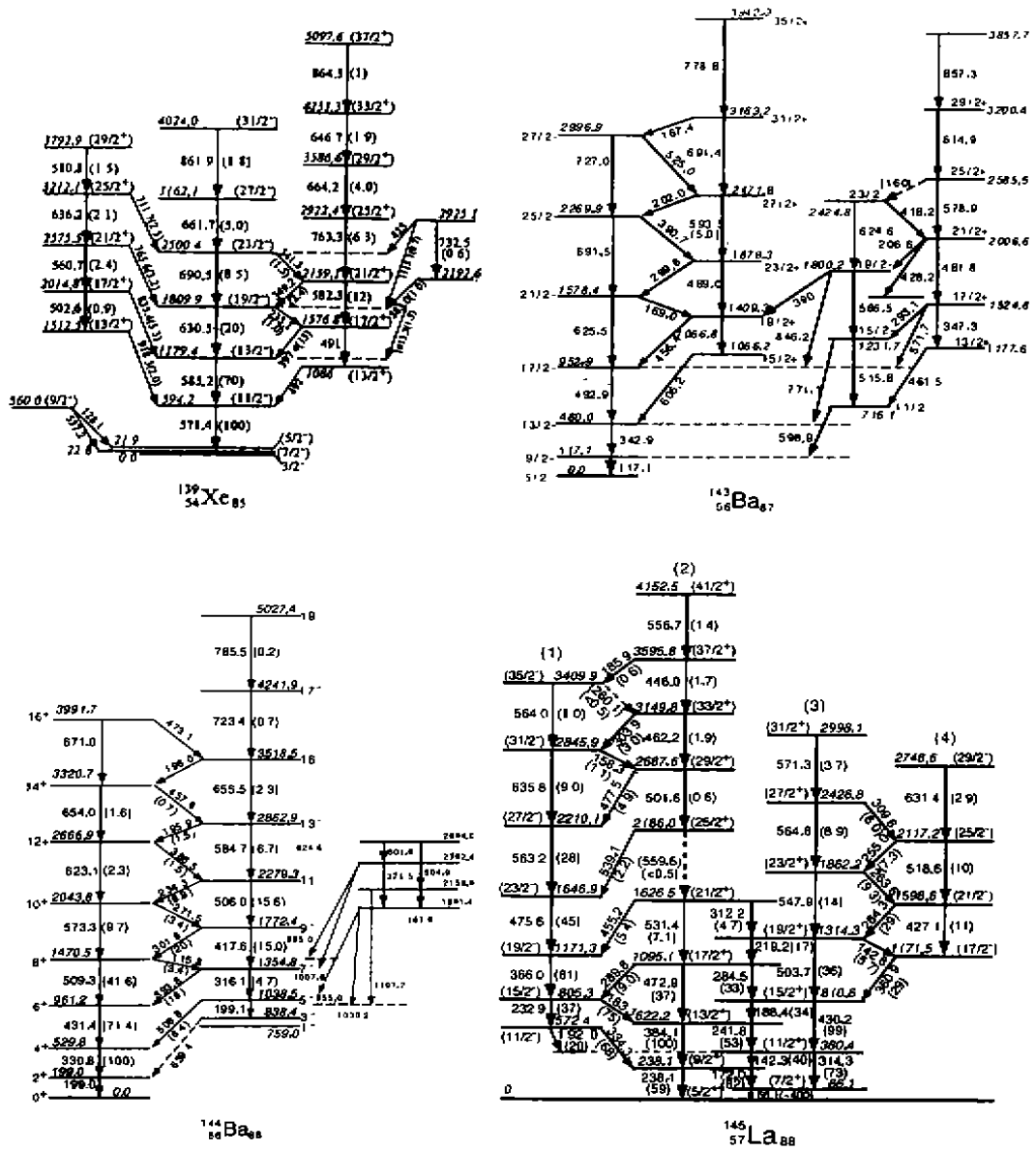


图 2  $^{139}\text{Xe}$ 、 $^{143}\text{Ba}$ 、 $^{144}\text{Ba}$  和  $^{145}\text{La}$  的能级图

并且扩展了<sup>144</sup>Ba 与<sup>146</sup>Ba 的高自旋态结构, 发现了<sup>146</sup>Ba 带间的交叉跃迁. 近来, Urban 等<sup>[20]</sup>发表了在 Eurogam 上取得的新结果, 除证实了我们的结果外, 发现了<sup>148</sup>Ba 的负宇称带. 我们在对 Gammasphere 最新实验数据分析中, 除证实已发表的结果外, 又发现了许多新的跃迁<sup>[21]</sup>.

图2为几个典型八极形变核的能级图. 由图可见, 所有这些具有八极形变特性的核的能级结构都有类似的特点, 即八极形变带由两个宇称相反的  $\Delta I=2$  的集体带构成, 两带间伴随有强的  $\Delta I=1$  的 E1 跃迁. 从实验所测得的分支比, 可以推得  $B(E1)/B(E2)$  比率, 从而算得标志八极形变强度的电偶极矩  $D_0$ . 所推得的<sup>142,143,144,146</sup>Ba 的  $B(E1)/B(E2)$  比率及  $D_0$  值如表1所示<sup>[17]</sup> (<sup>143</sup>Ba 的特性见下面讨论). 最新实验结果的  $D_0$  值与理论计算的比较如图3所示<sup>[21]</sup>. 实验结果与理论符合很好. 对于  $N=84$  的<sup>140</sup>Ba 核, 其  $D_0$  值较小, 因为此核为过渡性核, 其八极形变尚不稳定. 而对于  $N=86, 88$  与  $92$  的<sup>142, 144, 148</sup>Ba 核, 则具有大的  $D_0$  值, 表明此三个偶偶核具有稳定的

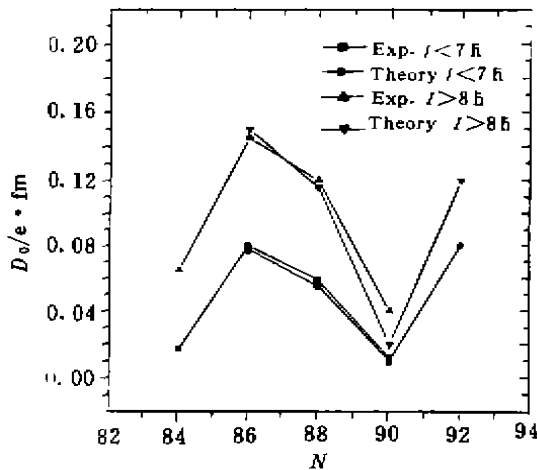


图3 丰中子 Ba 同位素链中, 实验与理论计算的电偶极矩  $D_0$  随中子数的变化. 实验值<sup>142,144,146</sup>Ba 取自图1, <sup>140</sup>Ba 取自文献<sup>[19]</sup>和<sup>148</sup>Ba 取自文献<sup>[20]</sup>; 理论计算数据取自文献<sup>[22]</sup>.

八极形变. 然而对于  $N=90$  的<sup>146</sup>Ba 核, 情况有些特殊, 其  $D_0$  值远比相邻偶偶核小得多. 这种  $D_0$  值异常减小的情况, 理论上成功地解释为在<sup>146</sup>Ba 中, 壳关联项 ( $D_0^{shell}$ ) 与宏观项 ( $D_0^{mac}$ ) 非常小所致<sup>[22]</sup>.

对于 Ba 偶偶核, 一般在自旋态  $I=10 \hbar$  左右, 其  $B(E1)/B(E2)$  比率最大, 表明此时八极形变最稳定. 理论上预言<sup>[3]</sup>, 在  $\hbar\omega=0.3$  附近,  $\pi h_{11/2}$  质子对或  $\nu i_{13/2}$  中子对发生顺排后, 八极形变将逐渐消失 ( $\beta_3 \rightarrow 0$ ). 对于基带, 第一类转动惯量  $J_1$  随转动频率  $\hbar\omega$  的变化如图4所示<sup>[18, 21]</sup>. 由图可以看到, <sup>146</sup>Ba 的回弯发生在  $\hbar\omega \sim 0.25$  MeV 附近, 而<sup>144</sup>Ba 则较高, 约在  $\hbar\omega \sim 0.3$  MeV 附近. 确实, 在<sup>146</sup>Ba 中, 高于自旋态  $10^+$  以上, 未观测到正负宇称带间的交叉跃迁, 表明此时  $\beta_3 \rightarrow 0$ , 八极形变已消失, 与理论上的预言相符. 然而, <sup>144</sup>Ba, 在高自旋态下, 仍能观测到强的交叉跃迁, 表明<sup>144</sup>Ba 核此时仍有强的八极关联效应存在. 此现象需要理论上进一步作出解释.

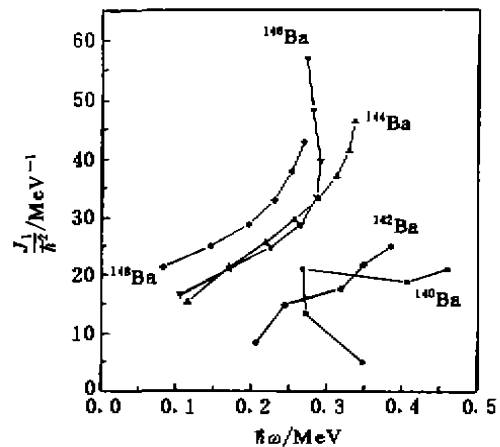


图4 丰中子 Ba 偶偶核中, 基带转动惯量  $J_1$  随转动频率  $\hbar\omega$  变化图<sup>[21]</sup>

### 3.2 丰中子 Ba 奇 A 核的八极形变

奇 A 核的研究要比偶偶核困难得多, 原因是其跃迁谱线非常复杂. 我们最早报导了此区内第一个奇 A 核的八极形变——<sup>143</sup>Ba

以及  $^{146}\text{Ba}$  的高自旋态<sup>[17,18]</sup>, 随后又报导了  $^{143}\text{Ba}$  的新结果<sup>[19, 21]</sup>. 在此期间, Jones  $^{141}\text{Ba}$  的八极形变<sup>[23]</sup>, 接着又扩展了高自旋态等<sup>[24]</sup>也发表了在 Eurogam 上做的结果.

表 1  $^{143, 144, 144, 146}\text{Ba}$  的  $B(E1)/B(E2)$  比率以及电偶极跃迁强度  $D_0$

$E_\gamma(\text{keV})$	$I_{\text{ini}}$	$\rightarrow$	$I_{\text{fin}}$	$I_\gamma$	$\frac{B(E1)}{B(E2)}$ ( $10^{-6}\text{fm}^{-2}$ )	$\frac{B(E1)}{B(E1)_{\text{w.u.}}}$	$D_0$ (e fm)
$^{142}\text{Ba}^{(a)}$							
411	7 <sup>-</sup>		5 <sup>-</sup>	1.5(4)	0.4(1)	$0.4(1)\times 10^{-3}$	0.08(1)
487	7 <sup>-</sup>		6 <sup>+</sup>	7.1(6)			
693	8 <sup>+</sup>		6 <sup>+</sup>	11.6(7)	1.0(4)	$1.0(4)\times 10^{-3}$	0.13(2)
207	8 <sup>+</sup>		7 <sup>-</sup>	0.8(3)			
561	9 <sup>-</sup>		7 <sup>-</sup>	4.5(5)	1. (2)	$1.6(3)\times 10^{-3}$	0.16(2)
354	9 <sup>-</sup>		8 <sup>+</sup>	7.3(6)			
$^{144}\text{Ba}^{(a)}$							
317	7 <sup>-</sup>		5 <sup>-</sup>	4.7(6)	0.17(2)	$0.22(3)\times 10^{-3}$	0.059(4)
394	7 <sup>-</sup>		6 <sup>+</sup>	19.4(12)			
509	8 <sup>+</sup>		6 <sup>+</sup>	41.6(23)	1.4(2)	$1.8(2)\times 10^{-3}$	0.16(1)
116	8 <sup>+</sup>		7 <sup>-</sup>	3.4(3)			
418	9 <sup>-</sup>		7 <sup>-</sup>	18.8(12)	0.38(3)	$0.49(4)\times 10^{-3}$	0.088(4)
302	9 <sup>-</sup>		8 <sup>+</sup>	19.8(10)			
573	10 <sup>+</sup>		8 <sup>+</sup>	8.7(10)	0.9(2)	$1.2(3)\times 10^{-3}$	0.14(2)
272	10 <sup>+</sup>		9 <sup>-</sup>	3.4(7)			
506	11 <sup>-</sup>		9 <sup>-</sup>	15.6(11)	0.88(12)	$1.1(2)\times 10^{-3}$	0.13(1)
234	11 <sup>-</sup>		10 <sup>+</sup>	6.9(8)			
623	12 <sup>+</sup>		10 <sup>+</sup>	2.3(5)	0.4(2)	$0.6(2)\times 10^{-3}$	0.09(2)
389	12 <sup>+</sup>		11 <sup>-</sup>	0.8(3)			
584	13 <sup>-</sup>		11 <sup>-</sup>	6.7(8)	0.8(3)	$1.0(5)\times 10^{-3}$	0.12(3)
196	13 <sup>-</sup>		12 <sup>+</sup>	0.74(20)			
$^{146}\text{Ba}^{(a)}$							
203	5 <sup>-</sup>		3 <sup>-</sup>	15.0(14)	0.003 0(4)	$4.8(6)\times 10^{-5}$	0.009 0(6)
511	5 <sup>-</sup>		4 <sup>+</sup>	22.5(17)			
324	7 <sup>-</sup>		5 <sup>-</sup>	20.0(16)	0.008(2)	$13.9(8)\times 10^{-6}$	0.015(2)
391	7 <sup>-</sup>		6 <sup>+</sup>	3.7(9)			
429	9 <sup>-</sup>		7 <sup>-</sup>	13.1(1)	0.007(3)	$1.9(9)\times 10^{-5}$	0.004(1)
295	9 <sup>-</sup>		8 <sup>+</sup>	0.2(1)			
$^{143}\text{Ba}^{(a)}$							
626	21/2 <sup>-</sup>		17/2 <sup>-</sup>	14.9(6)	1.8(3)	$2.0(3)\times 10^{-3}$	0.18(2)
169	21/2 <sup>-</sup>		19/2 <sup>+</sup>	1.8(3)			
469	23/2 <sup>+</sup>		19/2 <sup>+</sup>	8.2(5)	0.99(7)	$1.1(1)\times 10^{-3}$	0.13(1)
300	23/2 <sup>+</sup>		21/2 <sup>-</sup>	12.5(5)			

<sup>(a)</sup> $B(E2; 2^+ \rightarrow 0^+) \approx 0.18 \times 10^4 \text{ e}^2 \text{ fm}^4$ ,

<sup>(b)</sup> $B(E2; 2^+ \rightarrow 0^+) \approx 0.23 \times 10^4 \text{ e}^2 \text{ fm}^4$ ,

<sup>(c)</sup> $B(E2; 2^+ \rightarrow 0^+) \approx 0.29 \times 10^4 \text{ e}^2 \text{ fm}^4$ ,

<sup>(d)</sup> $B(E2; 13/2^- \rightarrow 9/2^-) \approx 0.20 \times 10^4 \text{ e}^2 \text{ fm}^4$ ; constant Q assumed.

对于 $^{143}\text{Ba}$ 核,自旋态扩展到 $35/2\pi$ ,除发现 $s = -\frac{1}{2}$ 带外,还发现了此区内不多见的 $s = +\frac{1}{2}$ 带(见图2).实验测得的 $B(E1)/B(E2)$ 比率以及偶极矩 $D_0$ 值(见表1)表明, $^{143}\text{Ba}$ 与相邻偶偶核 $^{144}\text{Ba}$ 相类似,具有稳定的八极形变,说明单中子的作用并没有减弱八极关联效应.而对于 $^{141}\text{Ba}$ 核,其 $B(E1)/B(E2)$ 比率要比 $^{143}\text{Ba}$ 的弱<sup>[23]</sup>,其结构更加复杂,此核的特性将连同 $^{139}\text{Xe}$ 一起讨论.理论预言<sup>[26]</sup>, $^{145}\text{Ba}$ 应为最可能具有八极形变的核.然而,实验的结果却与理论预言相反,并未发现相反宇称的交叉跃迁集体带结构,而是表现为强耦合带与单中子的闯入带<sup>[18,21,24]</sup>的四极形变.对这个核的高自旋态特性,我们仍在研究之中.

### 3.3 丰中子 Xe 核链的八极形变

迄今为止,在丰中子 Xe 核链发现有八极形变集体带的核为 $^{139}\text{Xe}$ <sup>[23]</sup>、 $^{140}\text{Xe}$ <sup>[21]</sup>、 $^{141}\text{Xe}$ <sup>[26]</sup>.其中, $^{140}\text{Xe}$ 与 $^{141}\text{Xe}$ 核中已发现正负宇称带,虽然带间的交叉跃迁尚未观察到,但仍表现明显的八极形变特征.我们在文献<sup>[23]</sup>中详细地讨论了 $N = 85$ 的 $^{139}\text{Xe}$ 与 $^{141}\text{Ba}$ 的集体带特征,指出在这两个核中,三个高自旋集体带具有非常类似的特征,即为“准 $f_{7/2}$ ”带.晕带为 $\nu(f_{7/2})^3$ 的组态混合,两个边带分别为 $\nu(f_{7/2})^3 \times 3^-$ 与 $\nu i_{13/2}(f_{7/2})^2$ 的组态混合. $\nu(f_{7/2})^3$ 带分别与 $\nu(f_{7/2})^3 \times 3^-$ 和 $\nu i_{13/2}(f_{7/2})^2$ 带组成八极关联,其 $B(E1)/B(E2)$ 比率也相当强.并且系统地比较了在 $N = 85$ 同中异位素核中这些“准 $f_{7/2}$ ”带的能级变化规律,为研究此区内核结构提供了重要信息.

### 3.4 丰中子 Ce 核的八极形变

$^{146}\text{Ce}$ 为此区内较早发现的八极形变核之一<sup>[13]</sup>.随后,我们<sup>[16,21]</sup>报导了 $^{144}\text{Ce}$ 的八极形变带.因为 $^{144}\text{Ce}$ 的裂变相对产额较低,自旋态测得不高,但仍发现正负宇称带及其交叉

跃迁,并且扩展了 $^{146}\text{Ce}$ 的高自旋态结构<sup>[18,22]</sup>.这两个核的 $B(E1)/B(E2)$ 比率相当强,表明其八极形变相当稳定.而对于 $^{148}\text{Ce}$ 核,情形要复杂得多.并未发现基带有明显的八极形变特征,但观测到两个边带之间的交叉跃迁<sup>[11,21]</sup>,这两个边带是否形成一个八极形变带,需要进一步加以研究.

### 3.5 奇 Z 核 $^{145,147}\text{La}$ 的八极形变

我们已经研究了 $^{145,147}\text{La}$ 的高自旋态,发现了重要的八极形变带<sup>[27]</sup>.在此工作即将完成时,Eurogam 组的 Urban 等<sup>[28]</sup>发表了这两个核的部分结果.然而我们的结果除了包含他们的绝大部分结果外,还大大扩展了高自旋态结构.这两个核表现为强的八极形变特性,且与建立在单质子 $\pi h_{11/2}$ 组态上的八极形变带非常相似,在自旋值为 $31/2\pi$ 附近,八极形变最强.尤其值得注意的是,在 $^{146}\text{La}$ 中,表现为对称的四极形状与不对称的八极形状之间的共存与竞争(见图2的能级图).在低自旋态时,主要表现为强耦合的四极形变,为对称转子的形状.随着自旋的增加,四极形变逐渐减弱,八极形变增强,并且基带四极形变的两个 $\Delta I = 2$ 的 signature partner 带分别与两个边带形成了两个八极形变集体,其带头分别为 $K = 11/2^-$ 与 $K = 7/2^+$ ,表明了单质子的耦合使八极关联得以加强,并且展示了此核随自旋态的变化产生的丰富多彩形状变化特性.

## 4 结束语

通过与国外多年的合作,对围绕 $Z = 56$ 、 $N = 88$ 的丰中子核区进行了较为系统的研究,除了证实与扩充了已有的结果外,新发现了众多核的八极形变带,从而在此区形成了一个八极形变岛,在国际上引起广泛关注.目前新的实验数据仍在分析中,可望得到更丰富而深入的结果.与此同时,对一些结构特性更需要理论工作者加以研究,以加深对此区核结构的理解.

## 参 考 文 献

- 1 Nazarewicz W, Olanders P, Ragnarsson *et al.* Analysis of Octupole Instability in Medium-mass and Heavy Nuclei. *Nucl Phys*, 1984, A429: 269~295
- 2 Butler P A, Nazarewicz W. Intrinsic Reflection Asymmetry in Atomic Nuclei. *Rev Modern Phys*, 1996, 68 (2): 349~412
- 3 Nazarewicz W, Tabor S. Octupole Shapes and Shape Changes at High Spin States in the  $Z\sim 58$ ,  $N\sim 88$  Nuclei. *Phys Rev*, 1992, C46: 2 226~2 236
- 4 Gai M, Ennis J F, Russev M *et al.* Molecular Alpha-particle Clustering in  $^{218}\text{Ra}$ ; Dipole Collectivity in the Vicinity of Nuclear Shell Closures. *Phys Rev Lett*, 1983, 51: 646~649
- 5 Ward D, Dracoulis G D, Leigh J R *et al.* High Spin States in  $^{222}\text{Th}$ . *Nucl Phys*, 1983, A406: 591~612
- 6 Schuler P C, Decman D, Nybo K *et al.* Evidence for Near-stable Octupole Deformation in  $^{225}\text{Ra}$ . *Phys Lett* 1986, B174: 341~346
- 7 Cottle P D, Gain M, Ennis J F *et al.* Intermediate and Weak Coupling in  $^{219}\text{Ra}$ . *Phys Rev*, 1986, C33: 1 855~1 858
- 8 Dahlinger M, Kankleit E, Habs D *et al.* Alternating Parity Bands and Octupole Effects in  $^{221}\text{Th}$  and  $^{223}\text{Th}$ . *Nucl Phys*, 1988, A484: 337~375
- 9 Urban W, Lieder R M, Gast W *et al.* Octupole Instability Induced by Rotation in the Nuclei  $^{146,148}\text{Nd}$ . *Phys Lett*, 1988, B200: 424~428
- 10 Urban W, Lieder R M, Gast W *et al.* Evidence of Coexistence of Reflection Asymmetric and Symmetric Shapes in  $^{150}\text{Sm}$ . *Phys Lett*, 1987, B186: 331~336
- 11 Hamilton J H, Ramayya A V, Zhu S J *et al.* New Insights from Studies of Spontaneous Fission with Large Detectors Arrays. *Prog Part Nucl Phys*, 1996, 36: 365~740
- 12 Phillips W R, Ahmad I, Emling H *et al.* Octupole Deformation in Neutron-rich Barium Isotopes. *Phys Rev Lett*, 1986, 57: 3 257~3 260
- 13 Phillips W R, Janssens R V F, Ahmad I *et al.* Octupole Correlation Effects Near  $Z=56$ ,  $N=88$ . *Phys Lett*, 1988, B212: 402~406
- 14 朱胜江. 裂变产物丰中子核素的瞬发  $\gamma$  谱的实验研究. *核物理动态*, 1992, 9(2): 8~12
- 15 朱胜江, Lee I Y. 丰中子核素能级结构研究及  $A\sim 100$  与  $A\sim 150$  区丰中子核形状相变讨论: 高能物理与核物理, 1993, 17: 353~361
- 16 Zhu S J, Zhao X W, Hamilton J H *et al.* Higher Spin States in Neutron Rich Nuclei. *Revista Mexica de Fisica*, 1992, 38: 53~56
- 17 Zhu S J. Octupole Deformation and Hole-core Coupling in Neutron-rich Odd-A Ba Isotopes. *Sym on Latest Topic in Nucl Structure*, Oct. 1993, Beijing
- 18 Zhu S J, Lu Q H, Hamilton J H *et al.* Octupole Deformation in  $^{142,143}\text{Ba}$  and  $^{144}\text{Ce}$ ; New Band Structures in Neutron-rich Ba-isotopes. *Phys Lett*, 1995, B357: 273~280
- 19 Zhu S J, Wang M G, Hamilton J H *et al.* Reflection Asymmetric Shapes in the Neutron-rich  $^{146,148}\text{Ba}$  Isotopes. *Chin Phys Lett*, 1997, 14: 589~592
- 20 Urban W, Jones M A, Durell J L *et al.* Octupole Correlation in Neutron-rich Even-even Barium Isotopes. *Nucl Phys*, 1997, A613: 107~131
- 21 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V *et al.* Static Octupole Deformation in Mo, Xe, Ba and Ce. *Proc Int Conf on Fission and Properties of Neutron-rich Nuclei*, Florida, USA, World Scientific, Eds, J. H. Hamilton, A. V. Ramayya, 1998, 234~248
- 22 Butler P A, Nazarewicz W. Intrinsic Dipole Moments in Reflection-asymmetric Nuclei. *Nucl Phys*, 1991, A633: 249~268
- 23 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V *et al.* High Spin Octupole Correlations in the  $N=85$ ,  $^{136}\text{Xe}$  and  $^{141}\text{Ba}$  Isotopes. *J Phys*, 1997, G23: L77~83
- 24 Jones M A, Urban W, Durell J L *et al.* Parities and Multiplicities of Gamma Rays in Neutron-rich Odd-mass Ba Nuclei. *Nucl Phys*, 1996, A606: 133~169
- 25 Leander G A, Nazarewicz W, Olanders P *et al.* A New Region of Intrinsic Reflection Asymmetry in Nuclei Around  $^{146}\text{Ba}$ ? *Phys Lett*, 1985, B162: 284~289
- 26 朱胜江, 王社歌, 邓景康. 丰中子核  $^{141}\text{Xe}$ ,  $^{162}\text{Ce}$ ,  $^{163}\text{Nd}$  及  $^{160}\text{Sm}$  能级图的建立. *高能物理与核物理*, 1997, 21: 104~109
- 27 王社歌.  $^{145,147}\text{La}$  高自旋态研究. 清华大学硕士毕业论文, 1996, 7
- 28 Urban W, Phillips W R, Durell J L *et al.* Octupole Correlation in Neutron-rich, Odd-A Lanthanum Nuclei. *Phys Rev*, 1997, C54: 946~948

## Research on Octupole Deformation in Neutron-rich Nuclei around $Z=56$ , $N=88$ Region

Zhu Shengjiang

(Department of Modern Applied Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Through study of the prompt  $\gamma$ -rays in spontaneous fission, the octupole deformation in neutron-rich Xe, Ba, Ce and La isotopes around  $Z=56$ ,  $N=88$  region was assigned. The properties of the octupole deformation in these nuclei were also discussed.

**Key words** nuclear structure high spin state octupole deformation

**Classifying number** O571.21

(上接第15页)

## $O(N) \supset O(N-1)$ Reduction Factors

Ruan Dong<sup>1,2</sup> Sun Hongzhou<sup>1,2,3</sup>

1 (Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

2 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of  
Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000)

3 (Institute of Theoretical Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** The algebraic expressions for all  $O(N) \supset O(N-1)$  reduction factors for  $(m_{1N} m_{2N} \cdots m_{[N/2]N}) \otimes (1\ 0 \cdots 0)$  are given by using the concept of irreducible tensor basis and the properties of irreducible tensor operator.

**Key words**  $O(N)$  group reduction factor irreducible tensor basis method

**Classifying number** O152.5, O152.6