

# $^{134}\text{Ba}$ 能级结构的在束 $\gamma$ 谱学研究<sup>\*</sup>

骆鹏<sup>1,2</sup> 柳敏良<sup>1,2</sup> 刘忠<sup>1</sup> 张玉虎<sup>1;1)</sup> 周小红<sup>1</sup> 郭应祥<sup>1</sup> 马英君<sup>3</sup>  
Y. Sasaki<sup>4</sup> K. Yamada<sup>4</sup> H. Ohshima<sup>4</sup> S. Yokose<sup>4</sup> M. Ishizuka<sup>4</sup>  
T. Komatsubara<sup>4</sup> K. Furuno<sup>4</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100039)

3 (吉林大学 长春 130012)

4 (Institute of Physics and Tandem Accelerator Center, University of Tsukuba, Ibaraki 305-006, Japan)

**摘要** 利用在束  $\gamma$  谱学技术,通过  $^{128}\text{Te}(^{10}\text{B}, 1\text{p}3\text{n})^{134}\text{Ba}$  反应研究了  $^{134}\text{Ba}$  的中、高自旋激发态. 实验中采用 9 套 BGO(AC)HPGe 探测器进行了  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  符合测量. 基于  $\gamma$ - $\gamma$  符合关系、 $\gamma$  射线的相对强度和各向异性度的测量结果建立了  $^{134}\text{Ba}$  的能级纲图. 比较  $N = 78$  的同中子素链的负宇称能级结构的系统性,发现激发能位于 4142keV,  $J^\pi$  值为  $11^-$  的能级很可能是与  $^{136}\text{Ce}$  具有相似内禀结构特征的相似态.

**关键词**  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  符合测量 各向异性度 能级纲图

## 1 引言

质量  $A \approx 135$  的轻稀土区过渡核恰好处于  $N = 82$  的中子闭壳的下面,这些核被预言是  $\gamma$  软核<sup>[1-3]</sup>. 该区域  $76 \leq N \leq 80$  的偶偶核被预言会表现出小的四极形变,并伴随着重要的三轴形变<sup>[3,4]</sup>,而且可以根据特定准粒子对的转动顺排得到相应的形状变化<sup>[5]</sup>.  $h_{11/2}$  价质子使原子核保持在  $\gamma \approx 0^\circ$  的近长椭形状,而  $h_{11/2}$  价中子能导致原子核向  $\gamma \approx -60^\circ$  的扁椭形状发生明显的变化<sup>[4,6]</sup>. 对  $N = 78$  同中子素的实验研究表明,在这一区域的核中系统地存在着长寿命的  $10^+$  同核异能态和负宇称旁带<sup>[7-15]</sup>. 在对  $^{136}\text{Ce}$ <sup>[4,16]</sup> 和  $^{142}\text{Gd}$ <sup>[17,18]</sup> 研究中,发现了磁转动带结构. 此前关于  $^{134}\text{Ba}$  的在束研究信息主要来自 T. Morek 等利用  $^{133}\text{Cs}(\alpha, 1\text{p}3\text{n})^{134}\text{Ba}$  反应对  $^{134}\text{Ba}$  同核异能态的研究,发现了两个长寿命的同核异能态( $10^+$  和  $5^-$ ),并指定了它们的组态分别是  $(\nu h_{11/2})^{-2}$ ,

$\nu h_{11/2} \otimes \nu s_{1/2}$  (或  $d_{3/2}$ )<sup>[8]</sup>. 比较其他邻近偶-偶核的丰富的在束能级结构信息,有必要对  $^{134}\text{Ba}$  进行进一步的研究,本工作通过重离子熔合蒸发反应  $^{128}\text{Te}(^{10}\text{B}, 1\text{p}3\text{n})^{134}\text{Ba}$  布局了  $^{134}\text{Ba}$  的中高自旋态,经过细致的数据分析和处理,扩展了  $^{134}\text{Ba}$  的高自旋态能级纲图. 基于  $N = 78$  的同中子素能级结构的系统性,对  $^{134}\text{Ba}$  的负宇称能级进行了定性的讨论.

## 2 实验测量和结果

实验是在日本筑波大学的加速器上完成的. 用  $^{10}\text{B}$  束流轰击丰度为 98% 的同位素  $^{128}\text{Te}$  靶布局了  $^{134}\text{Ba}$  的中、高自旋态. 靶子的厚度为  $2.3\text{mg}/\text{cm}^2$ ,并附有  $3\text{mg}/\text{cm}^2$  的 Au 衬. 用 9 套带有 BGO 反康抑制的高纯锗(HPGe)探测器进行了长时间的  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  符合测量,这里的  $t$  表示任意两条参与符合的  $\gamma$  射线到达探测器的相对时间差. 需要说明的一点是,由于

2003-07-30 收稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(10275081, 10075062), 日本学术振兴会 JSPS(L00515), 国家重点基础研究发展规划项目(IG2000077400)和中国科学院资助

1) E-mail: yhzhang@ns.lzb.ac.cn

本次实验的主要目的是研究双奇核  $^{134}\text{La}$  的高自旋态能级结构,因此实验时通过  $\gamma$  射线的激发函数测量将 46MeV 确定为布局  $^{134}\text{La}$  高自旋态的最佳束流能量. 根据理论估计,布局  $^{134}\text{Ba}$  的最佳束流能量约为 48MeV,而采用 Cascade 和 Alice 程序进行的理论计算也显示布局  $^{134}\text{Ba}$  的最佳束流能量应在 45MeV 附近. 所以在 46MeV 的束流能量下,  $^{134}\text{Ba}$  的产额也是相当可观的,离线数据处理也证实了这一点. 在实验开始前和结束后均利用标准源  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  和  $^{152}\text{Eu}$  对每个探测器进行了能量和相对效率刻度. 实验中共获取了  $95 \times 10^6$  个  $\gamma$ - $\gamma$  符合事件. 在离线数据处理中,经过增益匹配的符合数据被整理成一个  $4096 \times 4096$  对称化矩阵,用于分析  $\gamma$ - $\gamma$  符合关系. 基于已知  $^{134}\text{Ba}$  的  $\gamma$  射线的符合关系,指定了来源于  $^{134}\text{Ba}$  的新  $\gamma$  射线.

为了得到在束  $\gamma$  射线的跃迁多极性信息,实验时将 9 套探测器分为两组,其中的 4 套摆放在与束流线成  $79^\circ(101^\circ)$  的位置处,其余 5 套摆放在与束流线成  $37^\circ(143^\circ)$  的位置处. 从  $\gamma$ - $\gamma$  符合数据中可以提取出  $\gamma$  射线的各向异性度 ADO (Angular Distribution of  $\gamma$  rays Deexciting the Oriented states)<sup>[19]</sup>. 为此,将符合数据另外整理成两个不对称的 ADO 矩阵:位于  $79^\circ$  和  $37^\circ$  位置处探测器记录到的  $\gamma$  射线的能量值分别被放到两个矩阵的  $y$  轴上,与之符合的其他  $\gamma$  射线能量值(不论被哪个角度的探测器所记录)都被放到相应矩阵的  $x$  轴上. 选择在  $x$  方向总投影谱中的  $\gamma$  射线为“窗”,对矩阵向  $y$  方向投影,得到与“窗”相符合的  $\gamma$  射线在  $79^\circ$  和  $37^\circ$  的两个投影谱中的相对强度  $I(79^\circ)$  和  $I(37^\circ)$ ,从而提取出  $\gamma$  射线的 ADO 系数

$$R_{\text{ADO}}(\gamma) = \frac{I(37^\circ)/I(79^\circ)}{\epsilon(37^\circ)/\epsilon(79^\circ)}, \quad (1)$$

其中  $\epsilon(37^\circ)$  和  $\epsilon(79^\circ)$  分别表示位于  $37^\circ$  和  $79^\circ$  位置处的探测器组对  $\gamma$  射线的探测效率. 通过比较已知极性和未知极性  $\gamma$  射线的 ADO 系数,可指定新观测到的  $\gamma$  跃迁的多极性,从而建议相应能级的自旋值. 本工作将实验中观测到的来自  $^{134}\text{Ba}$  的  $\gamma$  射线的 ADO 系数与来自  $^{134}\text{La}$  的若干已知极性的  $\gamma$  射线的 ADO 系数进行了比较,如图 1 所示. 由图可以看出,从实验数据中提取的 ADO 系数比较明显地分为两组,已知四极跃迁的  $\gamma$  射线的  $R_{\text{ADO}}$  约为 1.10(平均值为 1.11),偶极跃迁的  $R_{\text{ADO}}$  约为 0.75(平均值为 0.76). 因此,我们认为  $R_{\text{ADO}}$  接近 1.10 的  $\gamma$  射线为四极跃迁,  $R_{\text{ADO}}$  接近 0.75 的  $\gamma$  射线为偶极跃迁. 应该指出的是,由于  $10^+$  长寿命同核异能态的存在,

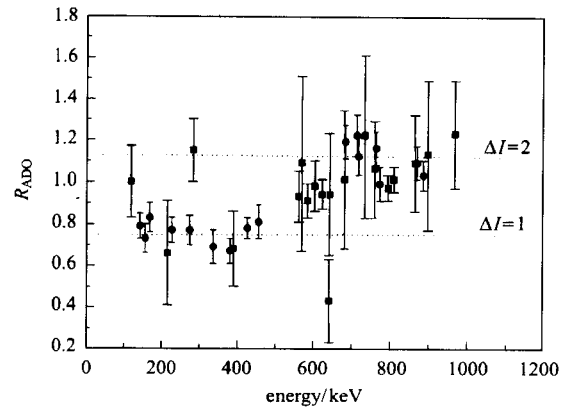


图 1  $^{134}\text{Ba}$ (■)和 $^{134}\text{La}$ (●)的  $\gamma$  射线的 ADO 系数

604.7keV, 795.8keV 等几条基态带的  $\gamma$  射线的  $R_{\text{ADO}}$  的值接近 1. 表 1 给出了本实验观测到的  $^{134}\text{Ba}$  的  $\gamma$  射线的能量、能级位置、相对强度、ADO 系数和相应跃迁初、末态的自旋及宇称.

表 1  $^{134}\text{Ba}$  的  $\gamma$  射线的能量、能级位置、相对强度、ADO 系数和相应跃迁初、末态的自旋及宇称

$E_\gamma/\text{keV}$	$E_{\text{level}}/\text{keV}$	$I_\gamma$	$R_{\text{ADO}}$	$J_i^\pi \rightarrow J_f^\pi$
121.3	2957.3	15(2)	1.00(17)	$(10^+) \rightarrow (8^+)$
189.3	3042.9	5(2)		
217.3	4142.1	3(1)	0.66(25)	$(11^-) \rightarrow (10^-)$
285.1	2271.1	26(3)	1.15(15)	$(7^-) \rightarrow (5^-)$
390.7	2376.7	8(2)	0.68(18)	$(6^-) \rightarrow (5^-)$
474.8	1642.8	2(1)		
563.3	1168.0	<21(2)	0.93(12)	$(2^+) \rightarrow (2^+)$
570.3	1970.8	5(2)	1.09(43)	$(4^+) \rightarrow (4^+)$
585.5	1986.0	31(2)	0.91(8)	$(5^-) \rightarrow (4^+)$
604.7	604.7	>128(12)	0.98(12)	$(2^+) \rightarrow (0^+)$
624.7	2836.0	37(2)	0.94(7)	$(8^+) \rightarrow (6^+)$
641.8	2912.9	6(2)	0.43(21)	
642.3	2853.6	6(2)	0.94(31)	
682.5	3059.2	6(2)	1.01(33)	$(8^-) \rightarrow (6^-)$
736.0	2722.0	2(1)	1.22(41)	$(7^-) \rightarrow (5^-)$
761.2	4001.8	6(1)	1.06(23)	$(11^-) \rightarrow (9^-)$
795.8	1400.5	100	0.97(6)	$(4^+) \rightarrow (2^+)$
802.3	1970.8	2(1)		$(4^+) \rightarrow (2^+)$
810.8	2211.3	47(2)	1.01(6)	$(6^+) \rightarrow (4^+)$
865.6	3924.8	6(1)	1.09(23)	$(10^-) \rightarrow (8^-)$
899.2	2299.7	10(3)	1.13(37)	$(6^+) \rightarrow (4^+)$
969.5	3240.6	12(2)	1.23(26)	$(9^-) \rightarrow (7^-)$
987.5	3900.4	2(1)		
1038.2	1642.8	3(1)		
1381.2	1986.0	4(1)		

通过仔细分析各  $\gamma$  射线的符合关系,并结合  $\gamma$

射线的相对强度、强度平衡和交叉跃迁等信息,图 2 给出了本工作建立的  $^{134}\text{Ba}$  的能级纲图. 纲图中标明了各  $\gamma$  射线的能量值,箭头线的粗细代表其相对强度. 由于实验中来自  $4n$  反应道( $^{134}\text{La}$ )和  $3n$  反应道( $^{135}\text{La}$ )的  $\gamma$  射线的强度相当强,因此  $^{134}\text{Ba}$  的 604.7,682.5,761.2keV 等  $\gamma$  射线受到一定程度的玷污. 并且,由于 Ba 和 La 的 K $\alpha$  射线能量非常接近(分别约为 32 和 33keV),所以在分析时只将那些与已经普遍知道的 604.7keV( $2^+ \rightarrow 0^+$ )和 795.8keV( $4^+ \rightarrow 2^+$ )相符合的  $\gamma$  射线指定给  $^{134}\text{Ba}$ . 文献[8]给出的能量为 544.7keV 的  $\gamma$  射线在本实验中没有观测到. 能量为 736.0 和 761.2keV 两条  $\gamma$  射线在本实验中也观测到,仔细分析它们与其他  $\gamma$  射线的符合关系,确定了它们在能级纲图中的相对位置. 另外,在本实验中也观测到了能量为 641.8keV  $\gamma$  射线,经过认真的分析,确认该  $\gamma$  射线应具有双线成分,见图 2 及下面讨论.

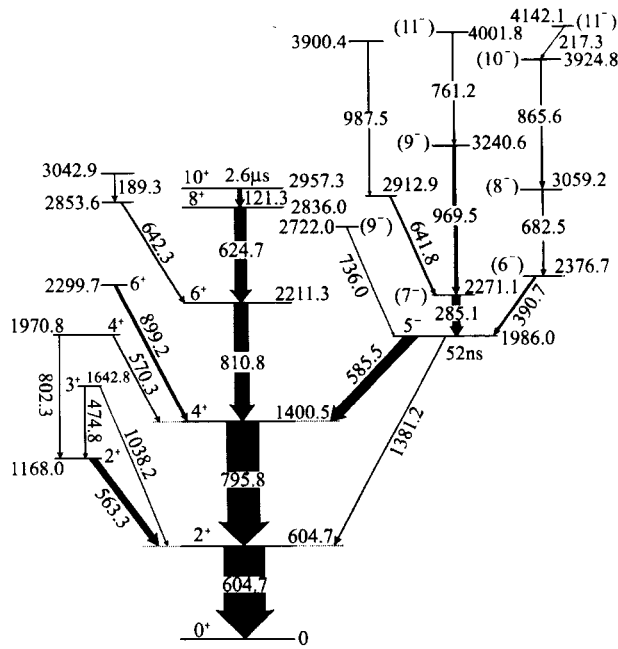


图 2  $^{134}\text{Ba}$  能级纲图

$10^+$  同核异能态以下的基态带序列(604.7, 795.8,810.8,624.7,12.31keV)与文献[8]的结果是一致的,图 3 给出了用 795.8,969.5,390.7keV  $\gamma$  射线开窗的符合谱. 从图 3(b)中可以看出 969.5keV  $\gamma$  射线与 761.2keV  $\gamma$  射线有较强的符合关系,通过分析符合关系和  $\gamma$  射线的相对强度,我们认为 761.2keV  $\gamma$  射线应该是来自激发能为 4001.8keV 的一条新能级的退激跃迁. 从实验数据提取的 ADO 系数表明 761.2keV  $\gamma$  射线为四极跃迁,通过与邻近

核能级结构的系统性比较,建议 4001.8keV 能级的  $J^\pi$  值为( $11^-$ ).

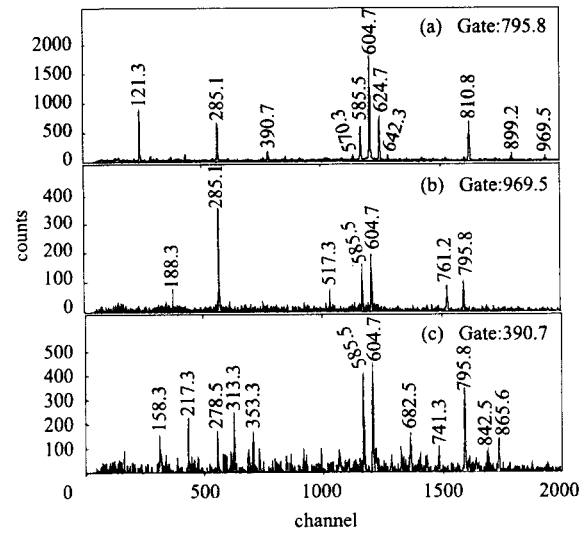


图 3  $^{134}\text{Ba}$  实验的开窗谱

从图 3(c)中可以看出,390.7keV  $\gamma$  射线除了与 585.5,604.7,795.8keV  $\gamma$  射线相符合外,还与 217.3,682.5,865.6keV 的  $\gamma$  射线有较强的符合关系(158.3,278.5,313.3,353.3keV  $\gamma$  射线是来自其他反应道的玷污线),并且从 217.3,682.5,865.6keV 的  $\gamma$  射线的符合谱可以看出它们之间存在着相互符合关系,同时也都跟 585.5,604.7,795.8keV  $\gamma$  射线相符合. 根据它们的相对强度和提取的 ADO 系数,建议它们分别是来自 3059.2,3924.8,4142.1keV 的新能级的退激跃迁. 根据  $^{134}\text{Ba}$  与  $^{136}\text{Ce}$  的比较,建议其能级的  $J^\pi$  值分别是( $8^-$ ),( $10^-$ )和( $11^-$ ). (见下面的具体讨论)

从用 642keV  $\gamma$  射线开窗的符合谱中,可以看出 642keV  $\gamma$  射线不仅与 285.1,585.5,604.7,795.8keV 的  $\gamma$  射线有很强的符合关系,而且与 810.8keV  $\gamma$  射线也有很强的符合关系,另外与 189.3,987.5keV 等  $\gamma$  射线有符合关系,但实验中没有观测到  $7^-$  到第一个  $6^+$  态的连接跃迁. 仔细分析这些  $\gamma$  射线间的符合关系,我们认为该  $\gamma$  射线具有双线成分,应是分别来自 2853.6 和 2912.9keV 两个新能级的跃迁,并且在它们之上分别存在一个能量更高的新能级,一是经由 189.3keV  $\gamma$  射线向 2853.6keV 能级退激的 3042.9keV 能级,另一个是经由 987.5keV  $\gamma$  射线向 2912.9keV 能级退激的 3900.4keV 能级. 另外,本工作将 736.0keV  $\gamma$  射线指定为来自 2722.0keV 新能级的跃迁,并根据其 ADO 系数建议为四极跃迁,相应能级的  $J^\pi$  值为( $9^-$ ).

能级纲图中的第二个  $2^+$ ,  $3^+$  和第二个  $4^+$  能级及相应跃迁的信息主要来自早期的通过  $^{134}\text{Cs}$  和  $^{134}\text{La}$  的衰变对  $^{134}\text{Ba}$  的研究结果<sup>[20-25]</sup>. 在本实验中能够明显地观测到 563.3, 570.3, 1038.2keV 等  $\gamma$  射线与 604.7keV  $\gamma$  射线有符合关系, 因此将这部分能级添加到本工作所建立的能级纲图中.

### 3 讨论

实验研究表明,  $N = 78$  同中子素核  $^{134}\text{Ba}$ ,  $^{136}\text{Ce}$ ,  $^{138}\text{Nd}$ ,  $^{140}\text{Sm}$ ,  $^{142}\text{Gd}$  的能级纲图很相似, 都存在着长寿命的  $10^+$  同核异能态, 而且这些  $10^+$  同核异能态的寿命随质子数的增加而减小 ( $2.6\mu\text{s}$ ,  $2.2\mu\text{s}$ ,  $0.41\mu\text{s}$ ,  $17\text{ns}$ ,  $3.4\text{ns}$ )<sup>[11, 18, 26]</sup>. 基态带和负宇称旁带也表现出一定的系统性.

对于  $^{134}\text{Ba}$  中的, 由 604.7, 795.8, 810.8, 624.7 和 121.3keV 级联  $\gamma$  射线组成的基态带序列, S. G. Rohozinski 等根据四极集体模型 (quadrupole collective model) 的理论计算预言,  $8^+$  态以下的能级是由核的集体激发形成的, 而由集体激发形成的  $10^+$  能级的理论值比实验观测到的  $10^+$  态高得多<sup>[27, 28]</sup>. Müller-Veggian 等根据 VMI (variable moment of inertia) 模型对同中子素核  $^{136}\text{Ce}$ ,  $^{138}\text{Nd}$ ,  $^{140}\text{Sm}$  的理论计算也得到了类似的结论<sup>[9, 11]</sup>, 因此, 这些  $N = 78$  同中子素核的  $10^+$  态能级不是由集体激发产生的, 并建议它们的组态为  $(\nu h_{11/2})^{-2}$ . E. S. Paul 等还认为, 由于  $h_{11/2}$  顺排价中子的形状驱动力对  $\gamma$  软核的作用, 这些  $10^+$  态应具有一个接近  $\gamma \approx -60^\circ$  的集体转动的扁椭形状<sup>[4]</sup>.

图 4 给出了  $N = 78$  同中子素核  $^{134}\text{Ba}$ ,  $^{136}\text{Ce}$ ,  $^{138}\text{Nd}$ ,  $^{140}\text{Sm}$ ,  $^{142}\text{Gd}$  的  $5^-$ ,  $7^-$  能级等部分负宇称能级纲图. 除了  $^{134}\text{Ba}$ , 还在  $^{136}\text{Ce}$  中观测到自旋为偶数的  $6^-$ ,  $8^-$ ,  $10^-$  的级联序列<sup>[4, 9]</sup>, 由图可以看出  $^{136}\text{Ce}$  的  $6^-$ ,  $8^-$ ,  $10^-$  能级与  $^{134}\text{Ba}$  的 2376, 3059 和 3924keV 能级位于类似的激发能上. 而且从实验数据提取的相应能级间  $\gamma$  跃迁的 ADO 系数均显示为四极跃迁特性, 基于以上考虑, 我们指定上述 3 个能级  $J^\pi$  值分别是  $(6^-)$ ,  $(8^-)$  和  $(10^-)$ .

在  $^{136}\text{Ce}$  核中,  $10^-$  态的上面还观测到来自  $J^\pi$  值为  $11^-$  能级的退激跃迁,  $\gamma$  射线的能量为 254keV, 并观测到建立在该  $11^-$  能级之上的转动带. 文献<sup>[4]</sup>的作者认为该转动带的结构特性有以下两种可能: 一是建立在  $\nu s_{1/2} \otimes [\nu h_{11/2}]^3$  四准中子组态上的扁椭带, 二是建立在  $\pi h_{11/2} \otimes \pi g_{7/2}$  双准质子组态上的

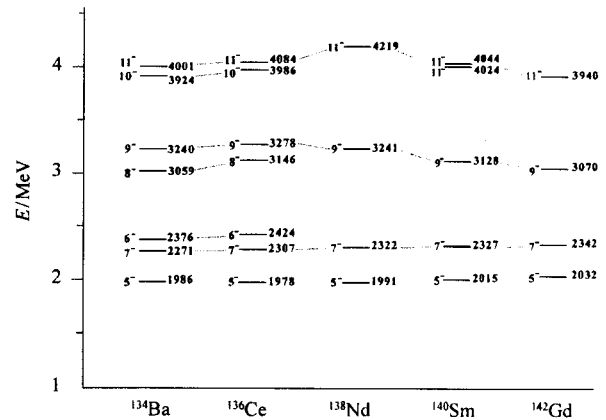


图 4  $^{134}\text{Ba}$  及邻近核部分负宇称能级

长椭退耦带. 在本工作中也在  $^{134}\text{Ba}$  的  $10^-$  态上面观测到一条能量为 217.3keV 的退激跃迁, 与  $^{136}\text{Ce}$  的情况极为相似, 这意味着 217.3keV  $\gamma$  射线同 254keV  $\gamma$  射线一样, 是退激自一个相似的内禀激发态 ( $11^-$ ). 其 ADO 系数显示 217.3keV 应为偶极跃迁特性. 因此, 我们建议相应的 4142.1keV 能级的  $J^\pi$  值为  $(11^-)$ . 但我们在实验中并没有观测到相应的建立在  $\nu s_{1/2} \otimes [\nu h_{11/2}]^3$  四准粒子组态上的扁椭带结构或建立在  $\pi h_{11/2} \otimes \pi g_{7/2}$  双准质子组态上的长椭退耦带结构, 这可能是实验中所布局的  $^{134}\text{Ba}$  激发态还未能达到对应的高度.

从图 4 可看出,  $^{134}\text{Ba}$  中的 2271, 3240, 4001keV 能级与  $^{136}\text{Ce}$  等邻近偶偶核中的  $7^-$ ,  $9^-$ ,  $11^-$  能级也位于相似的激发能处, T. Morek<sup>[8]</sup> 等基于这种系统性, 建议了 2271keV 和 3240keV 能级的  $J^\pi$  值分别为  $(7^-)$  和  $(9^-)$ . 本工作中提取的 285.1 和 969.5keV  $\gamma$  射线的 ADO 系数确认了 T. Morek 等人的观点, 并根据系统性和 761.2keV  $\gamma$  射线的 ADO 系数建议 4001keV 能级的  $J^\pi$  值为  $(11^-)$ . 这些同中子素核的  $5^-$ ,  $7^-$  能级处于几乎相同的激发能上, 并不随质子数的增加发生明显的变化, 这表明  $5^-$ ,  $7^-$  能级的激发能可能来自中子激发. 在  $N = 77$  的同中子素链  $^{131}\text{Xe}$ <sup>[7]</sup>,  $^{133}\text{Ba}$ <sup>[29]</sup>,  $^{135}\text{Ce}$  和  $^{137}\text{Nd}$ <sup>[30]</sup> 核中, 位于类似激发能上的  $19/2^+$  同核异能态的系统性也同样显示  $19/2^+$  态可能来自中子激发. 而且, 在假定邻近偶偶核的  $5^-$  态已经含有一个  $h_{11/2}$  中子空穴时, 用一个  $h_{11/2}$  中子空穴与相应核实的耦合能够很好地解释  $19/2^+$  能级. 基于以上原因, Müller-Veggian<sup>[9, 12]</sup> 等指定  $5^-$ ,  $7^-$  态的组态分别为  $[\nu h_{11/2}^{-1} \nu s_{1/2}^{-1}] 5^-$  或  $[\nu h_{11/2}^{-1} \nu d_{3/2}^{-1}] 5^-$  和  $[\nu h_{11/2}^{-1} \nu d_{3/2}^{-1}] 7^-$ . 另外, Müller-Veggian 认为  $\nu s_{1/2}$  和  $\nu d_{3/2}$  有着很大程度的混合, 并有可

能具有大的负  $\gamma$  形变 ( $\gamma \ll 0^\circ$ ), 对于  $\gamma$  软核来说,  $h_{11/2}$  价中子容易诱发一个接近于  $\gamma \approx -60^\circ$  的显著的集体扁椭圆  $\gamma$  形变.

对于  $7^-$  态和  $(6^-)$  态以上能级, 表现出类似基态带的特性. 相似的负宇称带在偶质量数的 Hg 和 Pt 中也被观测到<sup>[31,32]</sup>, Neergård 等<sup>[33]</sup> 利用无相互作用两准粒子耦合的一个轴对称转动核实, 并引入一个表面  $\Delta\delta$  相互作用再现了 Hg 同位素核负宇称带的特性, 但对于 Pt 同位素核的解释并不理想, 其原因可能是没有找到一个更接近 Pt 同位素核实际情况的表面  $\Delta\delta$  相互作用. 借鉴 Müller-Veggian 的方法<sup>[9]</sup>, 我们对  $N = 78$  同中子素偶偶核及 Pt 和 Hg 同位素核的负宇称带能级结构进行了系统比较, 结果

见表 2. 从表 2 可看出,  $^{134}\text{Ba}$ ,  $^{136}\text{Ce}$ ,  $^{138}\text{Nd}$ ,  $^{140}\text{Sm}$ ,  $^{142}\text{Gd}$  的不同负宇称能级的激发能之比近似相等, 而且与 Pt 同位素核的相应值几乎是相同的, 只是与 Hg 同位素核的相应值相差稍大一些. 这意味着  $^{134}\text{Ba}$  等同位素核与 Pt 和 Hg 同位素核具有相似的负宇称带能级结构. 相比较而言,  $^{134}\text{Ba}$  的  $E_{7,9^- \rightarrow 7^-} / E_{7,7^- \rightarrow 5^-}$  比值更接近 Pt 同位素核的相应值,  $^{136}\text{Ce}$  等同中子素核的  $E_{7,9^- \rightarrow 7^-} / E_{7,7^- \rightarrow 5^-}$  值随质子数的增加平缓地减小, 并逐渐趋同于 Hg 同位素核的相应值. 因此我们认为  $^{134}\text{Ba}$  负宇称带的产生机制与 Pt 和 Hg 的负宇称带的产生机制相似, 它的能级结构特性与 Pt 核的更相似.

表 2  $^{134}\text{Ba}$  及邻近偶偶核的负宇称态与 Pt, Hg 同位素核中相似负宇称态激发能的比较

	$^{134}\text{Ba}$	$^{136}\text{Ce}$	$^{138}\text{Nd}$	$^{140}\text{Sm}$	$^{142}\text{Gd}$	$^{190}\text{Pt}$	$^{192}\text{Pt}$	$^{192}\text{Hg}$	$^{194}\text{Hg}$
$E_{7^-} / E_{5^-}$	1.14	1.17	1.17	1.15	1.15	1.11	1.10	1.07	1.05
$E_{9^-} / E_{7^-}$	1.43	1.42	1.40	1.34	1.31	1.36	1.39	1.12	1.12
$E_{11^-} / E_{7^-}$	1.76	1.77	1.82	1.73	1.68	1.69	1.78	1.39	1.41
$E_{7,9^- \rightarrow 7^-} / E_{7,7^- \rightarrow 5^-}$	3.40	2.95	2.78	2.57	2.35	3.54	4.36	1.85	2.40

## 4 小结

本工作通过  $^{128}\text{Te}(^{10}\text{B}, 1\text{p}3\text{n})^{134}\text{Ba}$  反应, 利用在束  $\gamma$  谱学技术研究了  $^{134}\text{Ba}$  高自旋态, 建立了包括 3 个新的级联能级在内的  $^{134}\text{Ba}$  的高自旋态能级纲图. 基于  $^{134}\text{Ba}$  的  $\gamma$  跃迁的 ADO 系数,  $\gamma$  射线的强度以及

这一核区邻近偶偶的系统性比较, 在  $(\nu h_{11/2}^{-1} s_{1/2}^{-1})5^-$  上建立了  $(8^-)$ ,  $(10^-)$  和  $(11^-)$  的级联能级序列. 通过与缺中子 Pt 和 Hg 同位素核中相似负宇称带能级结构的比较, 认为  $^{134}\text{Ba}$  及邻近偶偶核的负宇称带也具有类似的产生机制. 即: 由一个  $h_{11/2}$  中子和一个邻近轨道的低  $j$  中子 ( $s_{1/2}$  或  $d_{3/2}$ ) 组成的双准粒子与转动核实耦合而形成的退耦带.

## 参考文献 (References)

- Ragnarsson I, Sobiczewski A et al. Nucl. Phys., 1974, **A233**:329
- CHEN Y S, Frauendorf S, Leander G A. Phys. Rev., 1983, **C28**: 2437
- Kern B D, Mlekodaj R L et al. Phys. Rev., 1987, **C36**:1514
- Paul E S, Fossan D B, LIANG Y et al. Phys. Rev., 1990, **C41**:1576
- Frauendorf and May F R. Phys. Lett., 1983, **B125**:245
- Andersson G, Larsson S E et al. Nucl. Phys., 1976, **A268**:205
- Kerek A, Luukko A, Grecescu M et al. Nucl. Phys., 1971, **A172**: 603
- Morek T, Beuscher H, Bochev B et al. Z. Phys., 1980, **A298**:267
- Müller-Veggian M, Gono Y, Lieder R M et al. Nucl. Phys., 1978, **A304**:1
- Yoshikawa N. Nucl. Phys., 1975, **A243**:143
- Müller-Veggian M, Beuscher H et al. Z. Phys., 1979, **A290**:43
- Müller-Veggian M, Beuscher H et al. Nucl. Phys., 1980, **A344**:89
- Angelis G D, Cardona M A, Poli M D et al. Phys. Rev., 1994, **C49**: 2990
- Starzecki W, Angelis G D, Rubio B et al. Phys. Lett., 1988, **B200**: 419
- Lunardi S, Bazzacco D, Nardelli G et al. Phys. Rev., 1990, **C42**:174
- Lakshmi S, Jain H C, Joshi P K et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 041303
- Sugawara M, Kusakari H, Igari Y et al. Z. Phys., 1997, **A358**:1
- Lieder R M, Rzaca-Urban T, Brands H et al. Eur. Phys. J., 2002, **A13**:297
- ZHENG Yong, ZHOU Xiao-Hong, LIU Min-Liang et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, **26**(9):909 (in Chinese) (郑勇, 周小红, 柳敏良等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(9):909)
- Taylor H W, Singh B et al. Can. J. Phys., 1969, **47**:2873
- Raesele D E, Reidy J J, Wiedenbeck M L et al. Nucl. Phys., 1967, **A98**:54
- Abdul-Malek A, Naumann R A. Nucl. Phys., 1968, **A106**:225
- Singh B, Taylor H W. Nucl. Phys., 1970, **A145**:561
- Reuland D J. Nucl. Phys., 1971, **A176**:657

- 25 Behar M, Steffen R M, Telesco C. Nucl. Phys., 1972, **A192**:218
- 26 Bell C, Raghavan P et al. Bull. Am. Phys. Soc., 1982, **27**(1):27, DF10
- 27 Rohozinski S G, Dobaczewski J et al. Nucl. Phys., 1977, **A292**:66
- 28 Dobaczewski J, Rohozinski S G et al. Z. Phys., 1977, **A282**:203
- 29 Gizon J, Gizon A, Horen D J et al. Nucl. Phys., 1975, **A252**:509
- 30 Gizon J, Gizon A, Maier M R et al. Nucl. Phys., 1974, **A222**:557
- 31 Lieder R M, Beuscher H et al. Nucl. Phys., 1975, **A248**:317
- 32 Cunnane J C, PiiParinen M, Daly P J et al. Phys. Rev., 1976, **C13**:2197
- 33 Neergård K, Vogel P, Radomski M. Nucl. Phys., 1975, **A238**:199

## In-beam $\gamma$ -Ray Spectroscopy of Level Structure in $^{134}\text{Ba}$ \*

LUO Peng<sup>1,2</sup> LIU Min-Liang<sup>1,2</sup> LIU Zhong<sup>1</sup> ZHANG Yu-Hu<sup>1;1)</sup> ZHOU Xiao-Hong<sup>1</sup>  
 GUO Ying-Xiang<sup>1</sup> MA Ying-Jun<sup>3</sup> Y. Sasaki<sup>4</sup> K. Yamada<sup>4</sup> H. Ohshima<sup>4</sup> S. Yokose<sup>4</sup>  
 M. Ishizuka<sup>4</sup> T. Komatsubara<sup>4</sup> K. Furuno<sup>4</sup>

1 (Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

3 (Jilin University, Changchun 130012, China)

4 (Institute of Physics and Tandem Accelerator Center, University of Tsukuba, Ibaraki 305-006, Japan)

**Abstract** Excited states of  $^{134}\text{Ba}$ , populated up to medium and high spins via the heavy-ion induced  $^{128}\text{Te}(^{10}\text{B}, 1\text{p}3\text{n})$   $^{134}\text{Ba}$  reaction at 46 MeV beam energy, have been studied using in-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy techniques. Nine anti-Compton HPGe detectors were employed for the measurements of  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  coincidences. Based on the results of the  $\gamma$ - $\gamma$  coincidence relationships, relative intensities and ADO ratios, a level scheme of  $^{134}\text{Ba}$  has been established. Comparing with the systemic features of the negative bands of  $N = 78$  isotones, the  $11^-$  state at the excitation energy of 4142 keV, is analogous to the one in  $^{136}\text{Ce}$ .

**Key words**  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  coincidence, ADO ratio, level scheme

Received 30 July 2003

\* Supported by NSFC(10275081, 10075062), JSPS Invitation Fellowship (L00515), Major State Basic Research Development Program (TG2000077400) and The Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: yhzhang@ns.lzb.ac.cn