

^{135}La 高自旋态的实验研究*

骆鹏^{1,2} 张玉虎^{1;1)} 周小红¹ 柳敏良¹ 郭应祥¹ 刘忠¹ 雷相国¹ 宋立涛¹
郑勇¹ 王华磊¹ 于海萍¹ 谢成营¹ 马英君³
Y. Sasaki⁴ K. Yamada⁴ H. Ohshima⁴ S. Yokose⁴ M. Ishizuka⁴

T. Komatsubara⁴ K. Furuno⁴

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 (吉林大学物理系 长春 130012)

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

摘要 利用在束 γ 谱实验技术,通过 $^{128}\text{Te}(^{10}\text{B}, 3\text{n})^{135}\text{La}$ 反应研究了 ^{135}La 的高自旋态. 基于 γ - γ 符合关系、 γ 射线的相对强度和各向异性度的测量结果,建立了 ^{135}La 的能级纲图. 在 $\hbar\omega \approx 0.40\text{MeV}$ 附近,观测到基于 $\pi h_{11/2}$ 质子轨道上的负宇称带的带交叉. 比较 $N=78$ 同中子素链能级结构的系统性,认为该带交叉是由一对 $h_{11/2}$ 准质子发生转动顺排造成的. 在高自旋态处,观测到具有很强 M1 跃迁、Signature 劈裂很小的 $\Delta I=1$ 负宇称带,根据系统性认为该带是建立在 $\pi h_{11/2} \otimes (\nu h_{11/2})^2$ 组态上的 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭球形变带.

关键词 γ - γ - t 符合测量 高自旋态 能级纲图

1 引言

核质量数为 $A \approx 135$ 的轻稀土区缺中子核处于从大形变核到球形核的过渡区,这些核被预言是 γ 软核^[1,2]. 核实外部的准粒子激发对这些核的形状影响很大,特别是位于高 j 入侵轨道上的准粒子对原子核形状的影响更为重要,它们的形状驱动力在很大程度上依赖于准粒子费米面在支壳层中的位置. 当费米面位于支壳层的底部时,长椭球形状($\gamma \approx 0^\circ$)是有利的,费米面位于支壳层的顶部时,驱动力驱使核向扁椭球形状($\gamma \approx -60^\circ$)变化^[3]. 在这一质量区域,质子的费米能级位于 $h_{11/2}$ 支壳的下半部,而中子的费米能级位于 $h_{11/2}$ 支壳的上半部. 一对质子的顺排驱使原子核向长椭球形状($\gamma \approx 0^\circ$)变化,而

一对中子的顺排驱使原子核向扁椭球形状($\gamma \approx -60^\circ$)变化^[4]. 这一质量区的奇质子核中存在着 $h_{11/2}$ 中子顺排与 $h_{11/2}$ 质子顺排之间的竞争,长椭球形状和扁椭球形状可能在同一核中共存^[5]. 在该质量区的奇质子核中普遍观测到建立在 $\pi h_{11/2}$ 质子轨道低 Ω 能级上的,具有大的 Signature 劈裂($\Delta e' \approx 400\text{keV}$)的长椭球转动带结构,并观测到由一对 $h_{11/2}$ 质子发生顺排而产生的带交叉. 另外,在高自旋处,还观测到建立在 $\pi h_{11/2} \otimes (\nu h_{11/2})^2$ 组态上的,具有强 M1 跃迁,Signature 劈裂非常小的 $\Delta I=1$ 负宇称扁椭球带结构^[4-7].

此前关于 ^{135}La 核的在束研究信息主要来自 J. R. Leigh 和 J. Chiba 等通过 $^{128}\text{Te}(^{11}\text{B}, 4\text{n})^{135}\text{La}$ 和 $^{133}\text{Cs}(\alpha, 2\text{n})^{135}\text{La}$ 反应对 ^{135}La 核高自旋激发态的研

2003-10-16 收稿

* 国家杰出青年科学基金(10025525),国家自然科学基金(10075062, 10275081),日本学术振兴会 JSPS(L00515),国家重点基础研究发展规划(G2000077400),中国科学院资助

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

究^[8,9]. 研究发现, 在 ^{135}La 核及其奇 A 同位素核中, 基于 $(\pi h_{11/2})$ 组态上的 $\Delta I = 2$ 的级联系列, 其能级间隔与邻近偶偶核的基态带的能级间隔非常相似. 为了解释这类带结构特性, F.S. Stephens 等建议, 在核实与奇粒子之间存在一类新型的耦合模式, 即“转动顺排”模式^[10,11]. 在以上研究成果的基础上, 本工作对 ^{135}La 核的高自旋激发态做了进一步的研究. 通过重离子熔合蒸发反应 $^{128}\text{Te}(^{10}\text{B}, 3n)^{135}\text{La}$ 布居了 ^{135}La 的高自旋态, 经过细致的数据分析和处理, 建立了 ^{135}La 的高自旋态能级纲图. 基于邻近奇 A 质量同位素核及 $N = 78$ 同中子素核能级结构的系统性, 对实验中观测到的带交叉和 $\Delta I = 1$ 转动带的结构特性进行了定性讨论.

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. 用能量为 46MeV 的 ^{10}B 束流轰击丰度为 98% 的同位素 ^{128}Te 靶布居了 ^{135}La 的高自旋态. 靶的厚度为 $2.3\text{mg}/\text{cm}^2$, 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 γ - γ - t 符合测量, 这里的 t 表示任意两条参与符合的 γ 射线到达探测器的相对时间差. 实验时将 9 套探测器分为两组, 其中 4 套摆放在与束流线成 79° (101°) 的位置处, 其余 5 套摆放在与束流线成 37° (143°) 的位置处. 需要说明的是, 由于本次实验的主要目的是研究双奇核 ^{134}La 的高自旋态能级结构, 因此实验时通过 γ 射线的激发函数测量将 46MeV 确定为布居 ^{134}La 高自旋态的最佳束流能量. 根据 Alice 激发函数程序进行的理论计算显示, 在 46MeV 的束流能量下, 布居 ^{135}La 高自旋态的 $3n$ 反应道仍具有较大的反应截面, 所以实验中布居到的 ^{135}La 的产额是相当可观的, 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}Co , ^{133}Ba 和 ^{152}Eu 对各个探测器进行了能量和相对效率刻度. 实验中共获取了 95×10^6 个 γ - γ 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 4096×4096 对称化矩阵, 用于分析 γ - γ 符合关系. 基于已知的 ^{135}La γ 射线的符合关系, 指定了来源于 ^{135}La 的新 γ 射线.

为了得到在束 γ 射线的跃迁多极性信息, 将符合数据另外整理成两个不对称的 ADO (Angular distribution of γ rays deexciting the oriented states)^[12] 矩阵: 位于 79° 和 37° 位置处探测器记录到的 γ 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 γ 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 γ 射线开“窗”, 对矩阵向 y 方向投影, 得到与“窗”相符合的 γ 射线在 79° 和 37° 的两个投影谱中的相对强度 $I(79^\circ)$ 和 $I(37^\circ)$, 从而提取出 γ 射线的 ADO 系数. 通过比较已知极性和未知极性 γ 射线的 ADO 系数, 可指定新观测到的 γ 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 ^{135}La 的 γ 射线的 ADO 系数与来自 ^{134}La 的若干已知极性的 γ 射线的 ADO 系数进行比较 (如图 1 所示), 获得未知 γ 射线的跃迁极性, 从而建议了相关能级的自旋值.

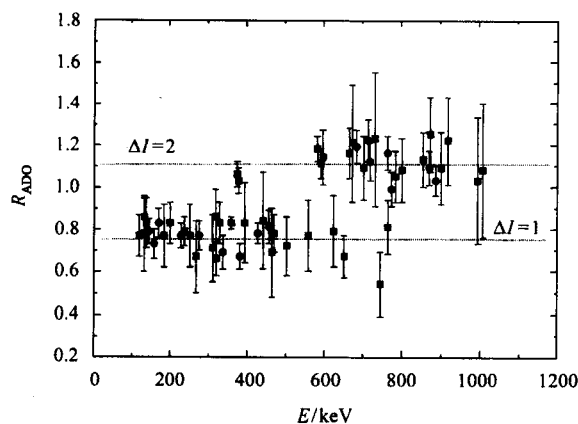


图 1 ^{135}La (■) 和 ^{134}La (●) 的 γ 射线的 ADO 系数

由图 1 可看出, 从实验数据中提取的 ADO 系数比较明显地分为两组, 四极跃迁的 ADO 系数约为 1.10, 偶极跃迁的 ADO 系数约为 0.75. 表 1 给出了本实验观测到的 ^{135}La 的 γ 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.

以 J.R. Leigh 和 J. Chiba 等所报道的结果为参考, 通过仔细分析本次实验数据中各 γ 射线的符合关系, 并结合 γ 射线的相对强度、强度平衡和交叉跃迁等信息, 建立了 ^{135}La 的能级纲图, 如图 2 所示. 纲图中标明了各 γ 射线的能量值, 箭头线的粗细代表其相对强度, 能级的自旋和宇称主要是根据本工作中所提取的 γ 射线的 ADO 系数和已知低位能级的信息建议的. 为了便于以后的讨论, 图 2 中对每个级联跃迁序列给予标注 (1—7). 图 3 给出了用 583.5 和 138.3 keV γ 射线开窗的符合谱, 图中标有 * 的 γ 峰为来自其他反应道的干扰线.

表 1 本实验观测到的¹³⁵La 的 γ 射线的信息

E_γ/keV	$E_{\text{level}}/\text{keV}$	$J_i^\pi \rightarrow J_f^\pi$	I_γ^1	R_{ADO}
119.3	119.3	(7/2 ⁺) \rightarrow (5/2 ⁺)	31	0.77(10)
119.3	2628.9	(21/2 ⁺) \rightarrow (19/2 ⁺)	2	
132.4	2628.9	(21/2 ⁺) \rightarrow (19/2 ⁺)	3	0.78(18)
133.5	2266.3	(21/2 ⁻) \rightarrow (19/2 ⁻)	29	0.86(9)
138.3	3641.3	(27/2 ⁻) \rightarrow (25/2 ⁻)	7	0.83(12)
185.2	2814.1	(23/2 ⁺) \rightarrow (21/2 ⁺)	4	0.77(15)
201.1	785.6	(11/2 ⁻) \rightarrow (9/2 ⁺)	71	0.83(10)
238.1	2974.5	(25/2 ⁻) \rightarrow (23/2 ⁻)	18	0.79(7)
252.4			3	0.77(15)
268.6	3082.7	(25/2 ⁺) \rightarrow (23/2 ⁺)	3	0.67(17)
311.1			2	0.71(16)
319.9	1757.3	(15/2 ⁻) \rightarrow (13/2 ⁻)	5	0.86(13)
320.5	3961.8	(29/2 ⁻) \rightarrow (27/2 ⁻)	10	0.66(9)
329.5	3065.9	\rightarrow (23/2 ⁻)	7	0.83(10)
359.9	4321.7	(31/2 ⁻) \rightarrow (29/2 ⁻)	5	0.83(12)
375.5	2132.8	(19/2 ⁻) \rightarrow (15/2 ⁻)	39	1.06(6)
379.4	1757.3	(15/2 ⁻) \rightarrow (15/2 ⁻)	41	1.03(6)
386.1			1	
394.6	3502.0	(25/2 ⁻) \rightarrow (23/2 ⁻)	2	0.83(19)
443.3	3526.0	(27/2 ⁺) \rightarrow (25/2 ⁺)	2	0.84(23)
464.0	583.5	(9/2 ⁺) \rightarrow (7/2 ⁺)	5	
464.6	3439.7	(27/2 ⁻) \rightarrow (25/2 ⁻)	4	0.69(21)
470.1	2736.4	(23/2 ⁻) \rightarrow (21/2 ⁻)	33	0.78(9)
502.8	4824.5	(33/2 ⁻) \rightarrow (31/2 ⁻)	4	0.72(14)
559.2	3533.7	(27/2 ⁻) \rightarrow (25/2 ⁻)	3	0.77(17)
583.5	583.5	(9/2 ⁺) \rightarrow (5/2 ⁺)	100	1.18(6)
592.3	1377.9	(15/2 ⁻) \rightarrow (11/2 ⁻)	57	1.11(7)
597.3	716.6	(11/2 ⁺) \rightarrow (7/2 ⁺)	26	1.14(13)
615.3 ²⁾			8	0.73(10)
624.3 ²⁾			3	0.79(17)
652.0	1437.6	(13/2 ⁻) \rightarrow (11/2 ⁻)	12	0.67(10)
666.5	3641.0	(29/2 ⁻) \rightarrow (25/2 ⁻)	11	1.16(12)
674.0	2796.4	(21/2 ⁻) \rightarrow (17/2 ⁻)	3	1.21(28)
684.5	2122.4	(17/2 ⁻) \rightarrow (13/2 ⁻)	1	
703.3	3439.7	(27/2 ⁻) \rightarrow (23/2 ⁻)	6	1.09(15)
705.8	3502.0	(25/2 ⁻) \rightarrow (21/2 ⁻)	< 1	
732.5	3839.9	(27/2 ⁻) \rightarrow (23/2 ⁻)	1	1.23(32)
744.5	2122.4	(17/2 ⁻) \rightarrow (15/2 ⁻)	7	0.54(15)
764.8	3502.0	(25/2 ⁻) \rightarrow (23/2 ⁻)	4	0.81(13)
767.3 ²⁾			6	1.27(19)
785.2	1501.8	(15/2 ⁺) \rightarrow (11/2 ⁺)	11	1.05(12)
802.1	1385.6	(13/2 ⁺) \rightarrow (9/2 ⁺)	6	1.08(15)
855.8	2233.7	(19/2 ⁻) \rightarrow (15/2 ⁻)	14	1.13(13)
873.7	3107.4	(23/2 ⁻) \rightarrow (19/2 ⁻)	8	1.25(18)
901.3	2403.1	(19/2 ⁺) \rightarrow (15/2 ⁺)	4	1.09(17)
919.3	2304.9	(17/2 ⁺) \rightarrow (13/2 ⁺)	4	1.22(21)
948.2 ²⁾			2	
994.8	2496.6	(19/2 ⁺) \rightarrow (15/2 ⁺)	3	1.03(30)
1007.8	2509.6	(19/2 ⁺) \rightarrow (15/2 ⁺)	3	1.08(32)
1126.3 ²⁾			2	

1) 强度不确定度为 5%—25% ; 2) 能级纲图中没有给出对应 γ 射线的相关信息.

从图 2 可看出,¹³⁵La 的能级纲图分为两大部分,一部分是基于 $\pi h_{11/2}$ 质子轨道之上的负宇称态成分,另一部分是基于 $\pi d_{5/2}$ 和 $\pi g_{7/2}$ 质子轨道之上的正宇称态成分.两部分间通过 202.1keV γ 跃迁相连接.仔细分析 592.3,855.8 和 873.7keV γ 射线符合谱发现,592.3,855.8,873.7 和 732.5keV γ 射线构成一级联跃迁序列(带 1),从数据中提取的这几条 γ 射线的 ADO 系数均显示它们具有四极跃迁特性.根据 J.Chiba^[9] 的建议,我们认为带 1 应是 $\pi h_{11/2}$ 带的“优先(favored)”带($\alpha = -1/2$)成分.分析发现,由强度很弱的 684.5 和 674.0keV γ 射线构成的级联跃迁序列(带 2),经由 652.0keV γ 跃迁向 11/2⁻ 态退激,在该级联跃迁序列与带 1 之间观测到能量为 744.5keV 的连接 γ 跃迁.根据 652.0,744.5keV 等 γ 射线的 ADO 系数及不同带间的交叉跃迁信息,建议带 2 中各级联跃迁所对应的 2122.4 和 2796.4keV 能级的 J^π 值分别为 17/2⁻ 和 21/2⁻.从图 3(a)中可以看出,带 2 中的各 γ 射线的强度明显比带 1 中的 γ 射线的强度要低.基于以上考虑,我们认为带 2 是 $\pi h_{11/2}$ 带的“非优先(unfavored)”带($\alpha = +1/2$)成分.同 J.R. Leigh 和 J.Chiba 等观测到的结果一样,在¹³⁵La 核中,激发能为 1377.9keV 的 15/2⁻ 态以上,直至激发能为 3502.0keV 的 25/2⁻ 态,实验中所布居到的负宇称晕态并不像¹³⁷Pr^[5],¹³⁹Pm^[4] 和¹⁴¹Eu^[6] 等核中所观测到的那样($\pi h_{11/2}$ 带的“优先”态为相应的晕态).此时在¹³⁵La 核中的晕态是由 379.4,375.5,133.5,470.1 和 238.1keV 等级联 γ 射线所组成的带 4 中的各对对应激发态.从图 3(a)可明显看出带 4 中的 379.4,375.5,133.5,470.1 和 238.1keV 等级联 γ 射线与 583.5keV 射线有着相当强的符合关系.根据 γ 射线的 ADO 系数和低位能级的信息,建议带 4 中的 1757.3,2132.8,2266.3,2736.4 和 2974.5keV 能级的 J^π 值分别为 15/2⁻,19/2⁻,21/2⁻,23/2⁻ 和 25/2⁻.该能谱呈现出单粒子激发的特征.

从图 3(b)可以看到,138.3keV γ 射线除了与 202.1,592.3 和 583.5keV 等低位 γ 射线有很强的符合关系外,与 320.5,359.9 和 502.8keV γ 射线也有较强的符合关系,仔细分析它们之间的符合关系,确认 138.3,320.5,359.9 和 502.8keV γ 射线构成一系列新的级联跃迁序列(带 3),它建立在激发能为 3502.0keV 能级之上.该级联跃迁系列经由 394.6,705.8 和 764.8keV 等 γ 跃迁向带 1,2 和带 4 退激.实验提取的带 3 内各级联 γ 射线的 ADO 系数显示

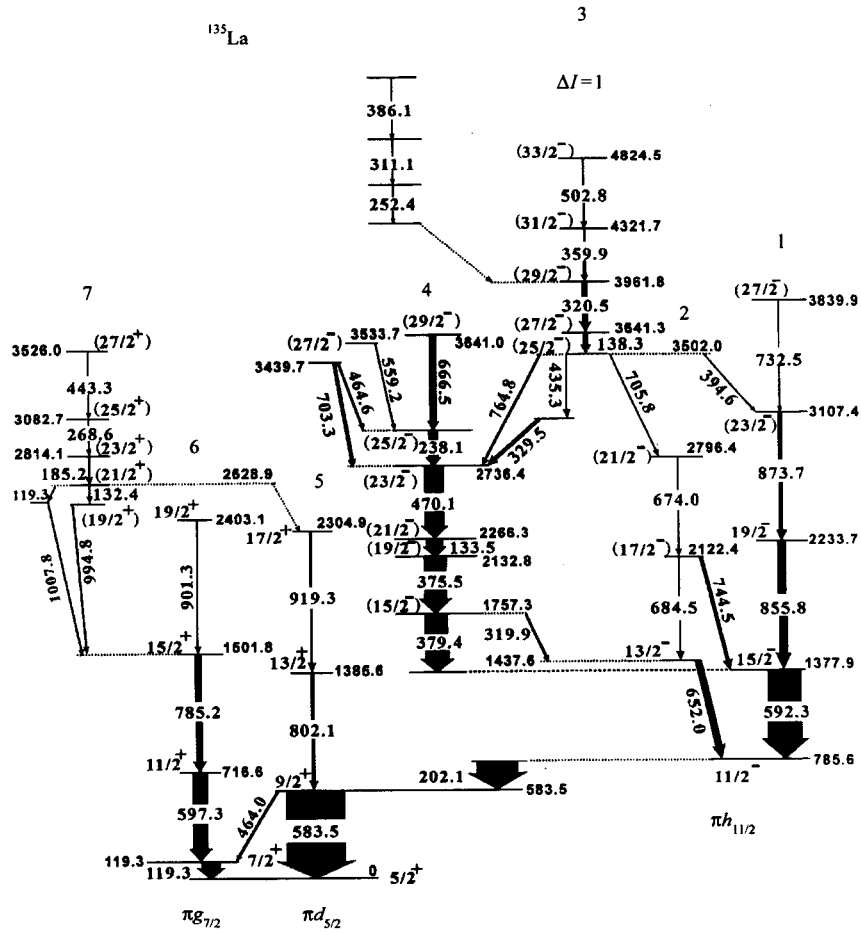


图 2 ^{135}La 能级纲图

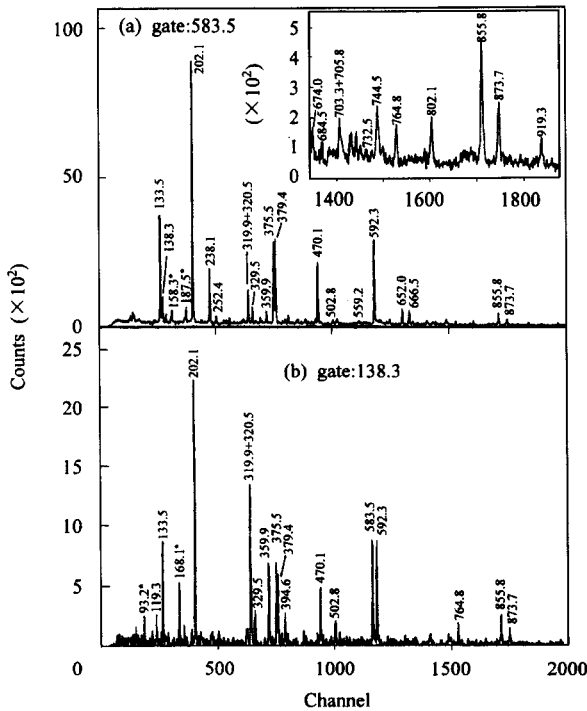


图 3 ^{135}La 实验的开窗谱

它们具有偶极跃迁特性, 根据纲图中已经确认的低位激发能级的自旋、宇称值, 并比较邻近同中子素核能级结构的系统性, 建议带 3 中相应的 3502.0, 3641.3, 3961.8, 4321.7 和 4824.5 keV 能级的 J^π 值分别为 $25/2^-$, $27/2^-$, $29/2^-$, $31/2^-$ 和 $33/2^-$, 这是一个 $\Delta I = 1$ 带. 实验中没有观测到该带内的 E2 跨接跃迁. 实验上还观测到另一列由 252.4, 311.1 和 386.1 keV γ 射线组成的级联序列, 它们在实验中布居到的强度很弱, 根据从实验数据中提取的 252.4 和 311.1 keV γ 射线的 ADO 系数判断, 这是一列偶极跃迁序列. 分析这些射线与其他 γ 射线的符合关系, 我们认为该级联序列应位于比 3961.8 keV 能级 ($29/2^-$) 更高的激发能处, 但因为缺乏更多的信息支持, 没能在纲图中确定其确切位置.

基于 $\pi d_{5/2}$ 和 $\pi g_{7/2}$ 质子轨道之上的两个 $\Delta I = 2$ 正宇称带(带 5, 6)与 J. Chiba^[9] 的观测结果一致. 在这两个带上方的更高激发能处, 观测到一列由 132.4, 185.2, 268.6 和 443.3 keV γ 射线组成的级联序列(带 7), 实验观测到带 7 经由 994.8 和

1007.8keV γ 射线向带 6 退激,分析这些 γ 射线的拉门谱,发现带 7 中的各 γ 射线也与带 5 中的 γ 射线有一定的符合关系,但实验中没有观测到它们之间的连接跃迁. 相应的 ADO 系数显示这是一列偶极跃迁,据此,我们尝试性地建议该级联跃迁所对应的 2628.9,2814.1,3082.7 和 3526.0keV 能级的 J^π 值分别为 $21/2^+$, $23/2^+$, $25/2^+$ 和 $27/2^+$.

应该指出的是,根据核数据图表^[13]中所收录的 ¹³⁵La 核的数据信息,我们获悉,在本工作之前,N. Xu 做博士论文工作期间也曾通过 ¹²⁸Te(¹¹B, 4n) ¹³⁵La 反应研究了 ¹³⁵La 核的高自旋态能级结构,但相关的实验结果和物理分析讨论等详细信息却没有发表到任何刊物上. 根据我们的工作,他的实验结果得到了进一步证实.

3 讨论

为了便于分析 ¹³⁵La 核中转动带的性质和系统比较 $N = 78$ 同中子素奇 A 核的能级结构特性,提取了 ¹³⁵La 核中各转动带的实验顺排 i_x (准粒子角动量沿转动方向的顺排量)和实验 Routhians e' (准粒子在转动坐标系中的激发能)^[14,15], 作为转动频率 ($\hbar\omega$)的函数分别绘在图 4(a)和(b)中. 顺排 i_x 和实验 Routhians e' 分别由下面的公式给出:

$$i_x = I_x(\omega) - I_{x,ref}(\omega), \quad (1)$$

$$e'(\omega) = E'(\omega) - E'_{ref}(\omega), \quad (2)$$

其中 $I_x(\omega)$ 是总角动量沿转动轴的分量, $E'(\omega)$ 是转动坐标系中的总 Routhian, $I_{x,ref}(\omega)$ 和 $E'_{ref}(\omega)$ 为参照量.

在本工作中,提取参照量时所用的 Harris 参数 J_0, J_1 值是根据 Harris^[16] 公式

$$J = J_0 + J_1 \omega^2 \quad (3)$$

分别拟合 ¹³⁴Ba^[17] 和 ¹³⁶Ce^[18] 基态带实验数据所得的平均值, $J_0 = 3.91 \hbar^2 \text{MeV}^{-1}$, $J_1 = 38.25 \hbar^4 \text{MeV}^{-3}$.

从图 4 可看出,带 1 在低频率时有一个近似为常量的顺排, $i_x \approx 4.5 \hbar$, 在 $\hbar\omega \approx 0.40 \text{MeV}$ 附近观测到回弯. 实验上观测到基于 $\pi h_{11/2}$ 质子轨道上的带 1 (“优先(favored)”带)与带 2 (“非优先(unfavored)”带)之间的 Signature 劈裂在所观测到频率范围内近似为常量,在 $\hbar\omega = 0.34 \text{MeV}$ 处, $\Delta e' \approx 400 \text{keV}$. 关于以上实验所观测到的 $\pi h_{11/2}$ 带的特性,N. Xu 等已经在该质量区 $N = 78$ 同中子素 ¹³⁷Pr^[5], ¹³⁹Pm^[4] 和 ¹⁴¹Eu^[6] 核中系统地观测到. N. Xu 等认为在 $\pi h_{11/2}$ 带中所观测

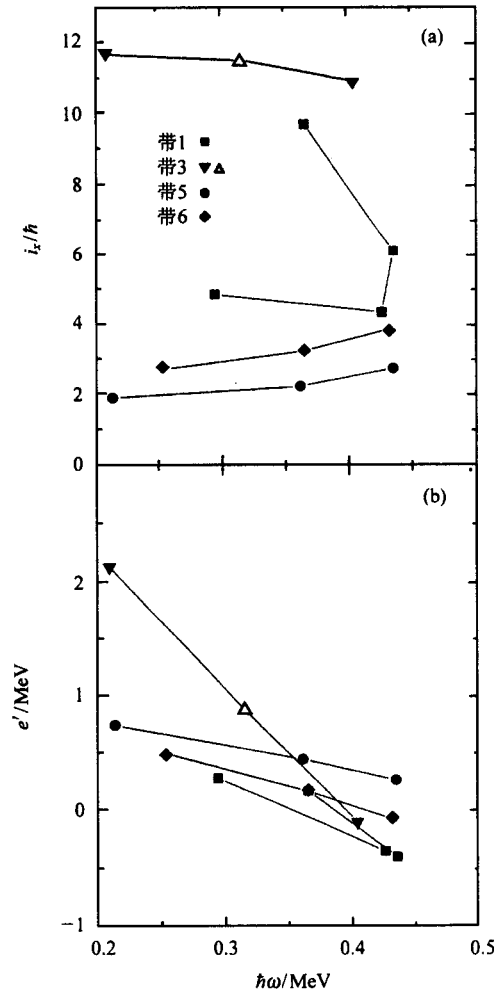


图 4 ¹³⁵La 中各带的顺排 i_x 和 Routhians e'

到的带交叉是由一对 $\pi h_{11/2}$ 质子转动顺排造成的,但由于奇质子已经占据 $h_{11/2}$ 单粒子轨道, $h_{11/2}$ 准质子的 [AB] 交叉被阻塞,因此实验观测到的带交叉是由能量较高的一对 $h_{11/2}$ 准质子发生转动顺排造成的 [BC] 带交叉. 基于 $N = 78$ 同中子素核中 $\pi h_{11/2}$ 带能级结构的系统性,我们建议在 ¹³⁵La 观测到的带交叉也是由 $h_{11/2}$ 准质子发生转动顺排造成的 [BC] 带交叉. 由于一对 $\pi h_{11/2}$ 准质子的顺排,很强的 γ 驱动力使原子核趋向于 $\gamma = 0^\circ$ 的长椭球形状.

需要指出的是,分析带 1 和带 2 的能级间隔发现,它们的能级间隔很相似,具有振动能级的特征. 这可能是原子核的集体运动中混入一定的振动成分所造成的,此时的核芯已不是一个好的转子. 因此,在选用理论模型对 ¹³⁵La 核能级结构进行理论分析时,应考虑集体运动中混入的振动成分,那么 CSM 模型可能不是最理想的选择.

开始于 $\frac{25^-}{2}$ 态的 $\Delta I = 1$ 负宇称带(带 3)具有自

己特殊的结构特性. 在该 $\Delta I = 1$ 带内偶极跃迁很强, 没有观测到 E2 跨接跃迁. 从图 4 看到, 该带的两个 Signature 成分间的劈裂非常小, 两个 Signature 成分都具有大的顺排 ($i_x \approx 11\hbar$), 说明该带的准粒子组态中含有一对顺排高 j 准粒子. 类似的 $\Delta I = 1$ 带结构在这一质量区的其他奇质子核也被系统地观测到^[4-7, 19]. E. S. Paul 等^[7]首先在 ^{131}La 核观测到此类 $\Delta I = 1$ 带结构并对此进行了详细的讨论. 这类带结构的显著特性就是 Signature 的两个成分间几乎没有劈裂, 带内的 $\Delta I = 1$ 偶极跃迁很强, 其 $B(M1)/B(E2)$ 值比其他带的相应值大一个数量级, 这说明核的形状发生了变化. 比较实验观测值和相应的 CSM 模型的理论计算结果, E. S. Paul 等建议此类 $\Delta I = 1$ 带是建立在 $\pi h_{11/2} \otimes (\nu h_{11/2})^2$ 的三准粒子组态之上, 此时一对 $\nu h_{11/2}$ 中子破对, 发生转动顺排. 由于一对顺排 $h_{11/2}$ 中子有很强的驱使原子核向 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭形状变化的驱动力作用, 所以此时的原子核具有 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭形状. 根据该质量区奇质子核中 $\Delta I = 1$ 负宇称带结构的系统性, 我们建议 ^{135}La 核中观测到的 $\Delta I = 1$ 负宇称带是建立在 $\pi h_{11/2} \otimes (\nu h_{11/2})^2$ 的三准粒子组态之上的一个扁椭球转动带, 与具有长椭球形状的 $\pi h_{11/2}$ 带共存于同一核中.

对于实验观测到的两列 $\Delta I = 2$ 正宇称转动带 (带 5 和带 6), J. R. Leigh^[8] 建议其组态分别为 $\pi d_{5/2}$ 和 $\pi g_{7/2}$. 他认为尽管带 5 和带 6 的能级结构看起来很简单, 但由于 $\pi d_{5/2}$ 和 $\pi g_{7/2}$ 轨道靠得很近, 它们可能会有一定程度的混合, 所以在实际情况下, 带 5 和带 6 可能具有更复杂的组态结构. 本工作中在这两个带上方的更高激发能处, 观测到一系列 $\Delta I = 1$ 正宇称级联序列 (带 7), 该序列经由 994.8 和 1007.8 keV

γ 射线向 $\pi g_{7/2}$ 带退激, 但没有观测到向 $\pi d_{5/2}$ 带退激的 γ 跃迁. 根据 J. R. Leigh 的观点, $g_{7/2}$ 和 $d_{5/2}$ 轨道可能是混合的, 那么 $\Delta I = 1$ 正宇称带向 $\pi d_{5/2}$ 带退激也是可能的, 分析 $\Delta I = 1$ 正宇称带和 $\pi d_{5/2}$ 带内各 γ 射线的符合谱, 发现两个带内的 γ 射线有一定的符合关系. 没有观测到两个带间的连接跃迁, 可能是因为在实验中布居到的强度很弱而被本底湮没. 对于 $\Delta I = 1$ 正宇称带的组态结构, 由于观测到的实验信息相对较少, 因此其组态结构不能确定. 类似的带结构在 ^{133}La 核中被观测到^[3], 文献 [3] 的作者建议它们是建立在三准粒子组态之上, 组态中包含一对顺排的 $h_{11/2}$ 准中子.

4 小结

通过 $^{128}\text{Te}(^{10}\text{B}, 3n)^{135}\text{La}$ 反应研究了 ^{135}La 的高自旋激发态, 建立了 ^{135}La 核的基于 $\pi h_{11/2}$ 质子轨道之上的“优先”带和“非优先”带两个 Signature 成分, 在 $\hbar\omega \approx 0.40\text{MeV}$ 附近, 观测到随一对 $h_{11/2}$ 准质子发生转动顺排而出现的 [BC] 带交叉. 一对 $h_{11/2}$ 准质子的转动顺排驱使原子核具有 $\gamma \approx 0^\circ$ 的长椭形状. 在高自旋处, 观测到具有很强 M1 跃迁, 没有 E2 跨接跃迁的, 旋称劈裂非常小的 $\Delta I = 1$ 负宇称带, 比较该质量区奇质子核中相似能级结构的系统性, 建议该 $\Delta I = 1$ 是建立在 $\pi h_{11/2} \otimes (\nu h_{11/2})^2$ 三准粒子组态上的具有 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭球转动带. 在带 5 和带 6 上方的更高激发能处, 观测到一系列 $\Delta I = 1$ 正宇称带 (带 7), 该带可能是建立在包含一对顺排的 $h_{11/2}$ 准中子的三准粒子组态之上.

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
- Hildingson L, Klamra W, Lindblad Th et al. Z. Phys., 1991, **A338**:125
- Xu N, Beausang C W, Paul E S et al. Phys. Rev., 1987, **C36**:1649
- Xu N, Beausang C W, Ma R et al. Phys. Rev., 1989, **C39**:1799
- Xu N, Beausang C W, Hughes J R et al. Phys. Rev., 1991, **C43**:2189
- Paul E S, Beausang C W, Fossan D B et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**:984
- Leigh J R, Nakai K, Maier K H et al. Nucl. Phys., 1973, **A213**:1
- Chiba J, Hayano R S, Sekimoto M et al. Journal of The Physical Society of Japan, 1977, **43**:1109
- Stephens F S, Diamond R M, Leigh J R. Phys. Rev. Lett., 1972, **29**:438
- Stephens F S, Diamond R M, Nilsson S G. Phys. Lett., 1973, **B44**:429
- 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)
- Sergeenkov Y V, Singh B. Nucl. Data Sheets., 1998, **84**:115
- Bengtsson R, Frauendorf S. Nucl. Phys., 1979, **A314**:27
- Bengtsson R, Frauendorf S. Nucl. Phys., 1979, **A327**:139

16 Harris S M. Phys. Rev., 1965, **B509**:13818 Paul E S, Fossan D B, LIANG Y et al. Phys. Rev., 1990, **C41**:157617 Morek T, Beuscher H, Bochev B et al. Z. Phys., 1980, **A298**:26719 Beausang C W, Fossan D B, Ma R et al. Phys. Rev., 1989, **C39**:471

Experimental Observation of High Spin States in ^{135}La Nucleus *

LUO Peng^{1,2} ZHANG Yu-Hu^{1,1)} ZHOU Xiao-Hong¹ LIU Min-Liang¹
 GUO Ying-Xiang¹ LIU Zhong¹ LEI Xiang-Guo¹ SONG Li-Tao¹ ZHENG Yong¹
 WANG Hua-Lei¹ YU Hai-Ping¹ XIE Cheng-Ying¹ MA Ying-Jun³ Y. Sasaki⁴
 K. Yamada⁴ H. Ohshima⁴ S. Yokose⁴ M. Ishizuka⁴ T. Komatsubara⁴ K. Furuno⁴

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 (Department of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

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

Abstract High spin states of ^{135}La have been experimentally studied by using $^{128}\text{Te}(^{10}\text{B}, 3n)^{135}\text{La}$ reaction at 46 MeV beam energy. Based on the γ - γ coincidence relationships, relative intensities and ADO ratios, a level scheme of ^{135}La has been established. Both signature components of the $\pi h_{11/2}$ negative-parity band and a band crossing at $\hbar\omega \approx 0.40\text{MeV}$ were observed. In view of the systematics of the $N = 78$ isotones, this backbending is proposed to be caused by the alignment of a pair of $\pi h_{11/2}$ protons. The $\pi h_{11/2}$ protons drive the nuclear core towards $\gamma \approx 0^\circ$, the collective prolate shape. In addition, a $\Delta I = 1$ negative-parity band with strong M1 transitions and a very small signature splitting was observed. Comparing with the systematic features of $\Delta I = 1$ bands in neighboring odd-proton nuclei in this mass region, the $\pi h_{11/2} \otimes (\nu h_{11/2})^2$ configuration was assigned to the $\Delta I = 1$ bands of ^{135}La . The alignment of the $h_{11/2}$ neutron pair drives the nuclear core towards $\gamma \approx -60^\circ$, the collective oblate shape.

Key words γ - γ - t coincidence, high spin state, level scheme

Received 16 October 2003

* Supported by National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (10025525), NSFC(10075062, 10275081), JSPS Invitation Fellowship (L00515), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), and The Chinese Academy of Sciences

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