

文章编号: 1007-4627(2004)04-0315-05

A=130 区缺中子核¹²²Cs 与¹³⁴Ce 高自旋态研究*

朱胜江¹, 禹英男¹, 甘翠云¹, 朱凌燕¹, M. 萨哈伊¹, 肖树冬¹,
李明亮¹, 车兴来¹, 温书贤², 竺礼华², 吴晓光², 李广生²

(1 清华大学物理系, 北京 100084;

2 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 通过重离子核反应与在束 γ 谱的实验技术, 对 A=130 缺中子核区¹²²Cs 与¹³⁴Ce 核的高自旋态进行了研究, 所用核反应分别为¹⁰⁷Ag(¹⁹F, 1p3n)与¹²²Sn(¹⁶O, 4n). 实验结果扩展了¹²²Cs 与¹³⁴Ce 的能级纲图. 在¹²²Cs 中发现可能是属于手征二重带的结构, 而在¹³⁴Ce 核的高自旋态结构中呈现出重要的具有不同 γ 形变的形状共存特性.

关键词: 核结构; 高自旋态; 手征二重带; 形状共存

中图分类号: O571.2 **文献标识码:** A

1 引言

A=130 缺中子核区核的高自旋态具有重要的结构特性. 核内质子的费米面位于 $h_{11/2}$ 亚壳层的底部, 中子的费米面则位于 $h_{11/2}$ 亚壳层的顶部. 推转壳模型的计算指出^[1], 位于 $h_{11/2}$ 亚壳层下部的粒子将驱动核的形状向长椭圆形变($\gamma \approx 0^\circ$)方向变化, 而位于 $h_{11/2}$ 亚壳层上部的粒子将驱动核的形状向扁椭圆形变($\gamma \approx -60^\circ$)方向变化. 在高自旋态下由多准粒子组态形成的转动带或能态, 可使核形成不同的形状. 对于 Ce 同位素链来说, 在以往的研究中就观测到多条具有不同 γ 形变的长椭、扁椭和三轴形变带, 甚至在一个核, 比如¹³²Ba^[2]中, 就观测到同时存在具有不同 γ 形变的结构, 即所谓形状共存. 另一方面, 最近在高自旋态研究中, 由手征对称性的破裂引起的手征二重带的研究也引起人们很大的关注. 当双奇核满足这样的条件: 具有三轴形变芯, 单质子与单中子分别位于子壳层的下部(单粒子)或顶部(单空穴), 形成核芯运动、单粒子与空穴运动的角动量互相垂直, 这样的核则可能引起手征对称的破缺. 而理论预言, 在此区内的一些双奇核最有可能具有这种特性^[3-5]. 实验上在此区已发现多个双奇核的手征二重带结构, 其中, 在 $N < 82$ 的 Cs

同位素链的双奇核有: ¹²⁴Cs($N=69$)^[6], ¹²⁶Cs($N=71$)^[7], ¹²⁸Cs($N=73$)^[8]和¹³⁰Cs($N=75$)^[9]. 这些手征二重带的发现, 是对核结构理论的重要检验. 另一方面, 进一步在相邻同位素中进行研究, 将对手征二重带存在的条件与范围, 以及理论特征等提供重要的实验依据.

本文报道对于 $N=67$ 的¹²²Cs 与 $N=76$ 的¹³⁴Ce 高自旋态的进一步实验研究结果. 在以前发表的文献中, 已对此区内的¹²²Cs 核^[10-12]和¹³⁴Ce 核^[13-16]的高自旋态实验研究作了报道, 但与相邻核相比, 研究结果尚须继续深入. 本项研究的目的是在¹²²Cs 中寻找手征二重带, 在¹³⁴Ce 中研究形状共存特性.

2 实验及数据处理与结果

实验是在中国原子能科学研究院 H-13 串列加速器上进行的. 在这两个实验中, 分别用¹⁰⁷Ag(¹⁹F, 1p3n)与¹²²Sn(¹⁶O, 4n)重离子核反应布居¹²²Cs与¹³⁴Ce 的高自旋态. 所用同位素¹⁰⁷Ag 与¹²²Sn 靶的厚度都为 2.4 mg/cm², 分别蒸发在厚度为 19 mg/cm²的铅靶衬上. ¹⁹F 束流能量为 86 MeV, 而¹⁶O束流能量为 73 MeV. 由 10 个反康高纯 Ge 探测器组成的联合在束 γ 谱探测装置测量高自旋态退激

收稿日期: 2003 - 08 - 16

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000077405); 国家自然科学基金资助项目(10375032); 教育部博士点基金资助项目(20030003090)

作者简介: 朱胜江(1946-), 男(汉族), 江苏滨海人, 教授, 从事核结构研究; E-mail: zhushj@mail. tsinghua. edu. cn

产生的 γ - γ 符合事件. 在实验中, 还进行相对激发函数的测量, 以识别属于特定反应道的跃迁 γ 谱线. 离线处理建立了二维符合矩阵, 以供 γ - γ 符合数据分析. 为了确定 γ 跃迁的多级性从而推得能级的自旋与宇称, 还分别建立了二维方向关联矩阵, 用以作为取向核态的方向关联强度(DCO)比率的分析. 符合数据分析用移植的 Radware 软件包^[17].

经过 γ - γ 符合、相对跃迁强度和 DCO 比率等的分析, 新建了¹²²Cs 与¹³⁴Ce 部分能级纲图(如图 1 与图 2 所示). 在¹²²Cs 中, 我们仅画出正宇称转动带部分. 为讨论方便, 将能级纲图中的集体转动带或级联跃迁结构用带括号的数字表示在能级纲图的上部或下部.

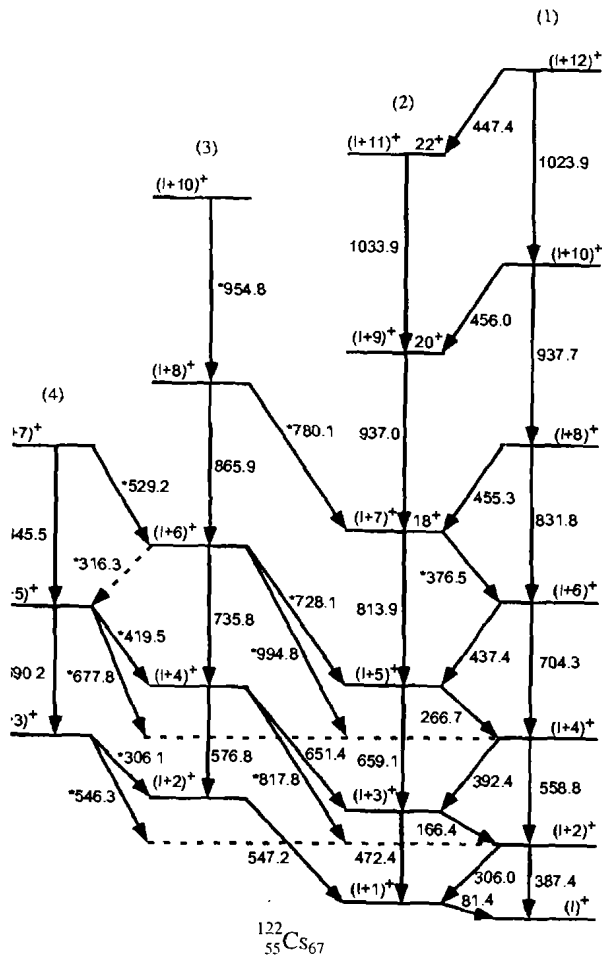


图 1 新建的¹²²Cs 正宇称带的能级纲图

与以前发表的结果相比, 对于¹²²Cs 的正宇称带部分, 扩展了原有的带结构. 在图 1 中, 打星号的跃迁为新发现的, 而重要的是发现了一个弱的边带转动带结构(4). 对于¹³⁴Ce 核, 除在较低激发态验证与扩展许多新的能级与跃迁外, 在高自旋态部

分, 带(1)的自旋态由原来的 18 \hbar 扩展到 22 \hbar , 而在标注为(4)的级联跃迁系列中, 在 3 208.1 keV 10⁺ 态以上也发现多条新能级与跃迁, 将自旋态推到 20 \hbar . 带(5)与带(6)为建立在 7⁻ 与 8⁻ 能级上的两个 $\Delta I=2$ 的新的集体转动带(I 代表能级的自旋值). 此外还发现两个跃迁系列(7)与(8).

3 结果讨论

从图 1 可以看出, 对于¹²²Cs 正宇称带, 我们设带(1)的带头为 I , 此带头的自旋值对于确定其他能级的自旋是非常重要的. 然而现有的实验证据对 I 的确定尚有争论, 文献[11]基于系统学比较, 将 I 值指定为 9 \hbar , 而文献[12]则指定为 11 \hbar , 两者相差 2 \hbar . 基于下面的系统学比较, 我们倾向于 $I=9 \hbar$ 的指定. 从图中可以看出, ¹²²Cs 正宇称带由 4 个 $\Delta I=2$ 的转动带(1)–(4)组成, 其中, 带(1)与带(2)为 signature partner 带, 为晕带, 它的组态已被指定为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ ^[11, 12]. 这个组态的转动带在此区内其它奇奇核中已被系统地发现. 而带(3)与带(4)也为 signature partner 带, 为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 的边带结构. 这两对 signature partner 带之间具有非常相似的结构特性, 而这种结构特性与相邻的奇奇核¹²⁴⁻¹³⁰Cs^[6-9]中观测到的基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的手征二重带结构非常相似, 所以我们观测到的¹²²Cs 中的带(1)–带(4)很可能也属于具有 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的手征二重带结构. 图 3 给出在已报道的^{124, 126, 128, 130}Cs^[6-9]的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的手征二重带的晕带与边带以及在本实验中我们观测到的¹²²Cs 中建议的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的手征二重带的晕带与边带的激发能随自旋态的变化. 可以看出, 它们有非常类似的特性, 非常符合系统学的变化规律. 然而对于在^{124, 126}Cs 观测到的手征二重带, 与理论预言相比, 还有矛盾之处. 这两个核的中子数已位于 $h_{11/2}$ 子壳层的中部, 而不是上部, 与形成手征二重态的条件有差距, 这点需要进一步研究.

对于¹³⁴Ce 核, 从图 2 可以看出, 其能级结构是很复杂的. 带(1)的低激发态部分, 从 0⁺ 态到 8⁺ 态, 为基带或 yrast 带. 带(2)建立在 956.1 keV 2⁺ 能级上, 属于 1 声子 γ 振动-转动带. 带(3)带头为 1 811.1 keV 的 4⁺ 能级, 这个带可能属于 2 γ 带. 对于¹³⁴Ce 的高激发态部分, 在带(1)的 8⁺ 态以上, 其能级结构发生明显的变化:(1) 10⁺ 以上的能级变

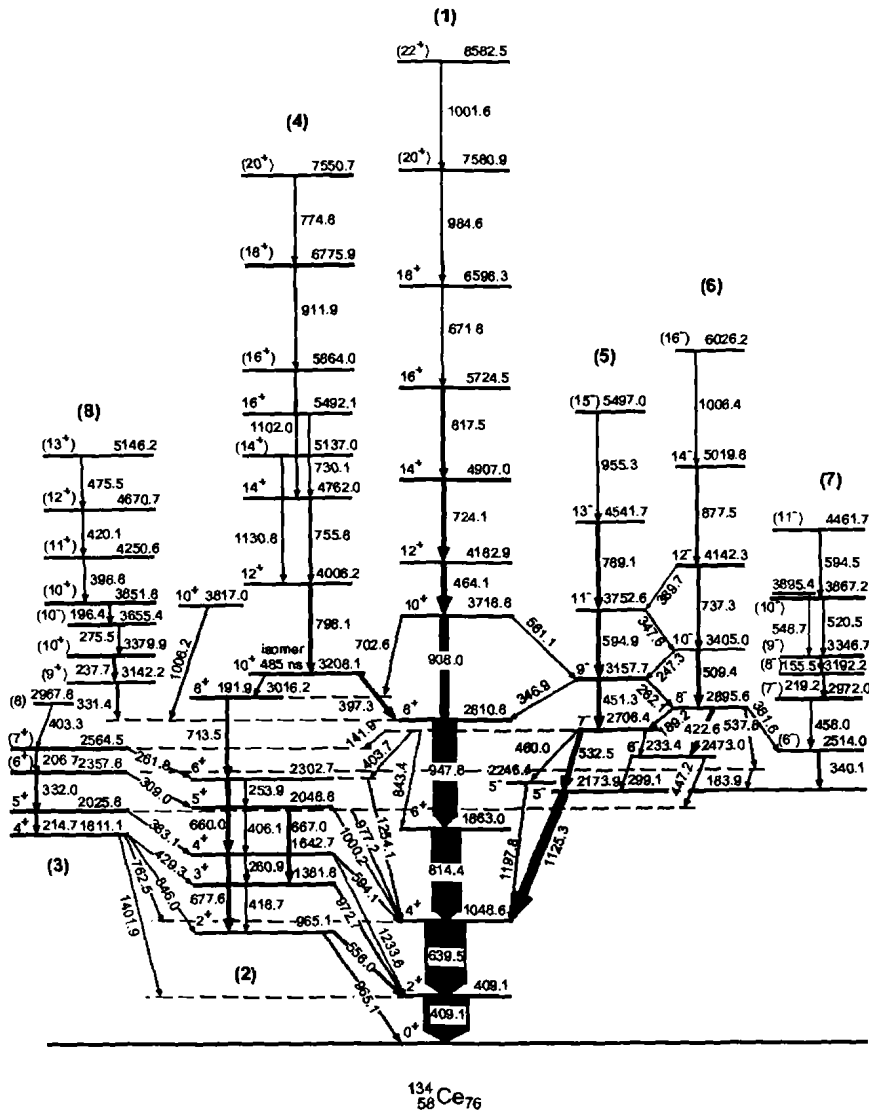


图 2 本实验建立的 ^{134}Ce 核的部分能级纲图

成了非 yrast 态, 而另一个能量为 3 208. 1 keV 的 10^+ 能级变成了 yrast 态; (2) 能级间距脱离原来的规律性, 发生了带交叉或集体回弯现象. 图 4 为带 (1), (5) 和 (6) 的顺排角动量 i_x 随转动频率 $\hbar\omega$ 的变化关系. 从图中可以看到, 对于带 (1), 带交叉发生在转动频率 $\hbar\omega \approx 0. 34$ MeV. 然而, ^{134}Ce 的回弯曲线比正常核来得激烈, 文献[16]中的 g 因子的实验对 3 718. 18 keV (10^+ 态) 能级的组态进行的研究指出, 带 (1) 中的 10^+ 态起源于一对 $h_{11/2}$ 中子组态, 或者说, 带交叉是由一对 $h_{11/2}$ 中子的顺排引起的. 这种解释也得到推转壳模型理论计算的支持^[13]. 另一方面, 根据推转壳模型的计算, 由于一对 $h_{11/2}$ 中子角动量顺排的形状驱动作用, 使建立在此 10^+ 态上的转动带形成具有 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭圆形变^[13].

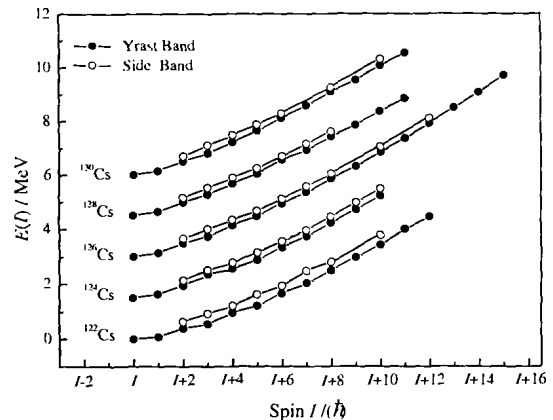


图 3 实验得到的双奇核 $^{122-126}\text{Cs}$ 的基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的晕带与边带的激发能随能量的系统性变化. 图中以 ^{122}Cs 为基准, 其它核相应于前一个核的能量分别抬高 1. 5 MeV.

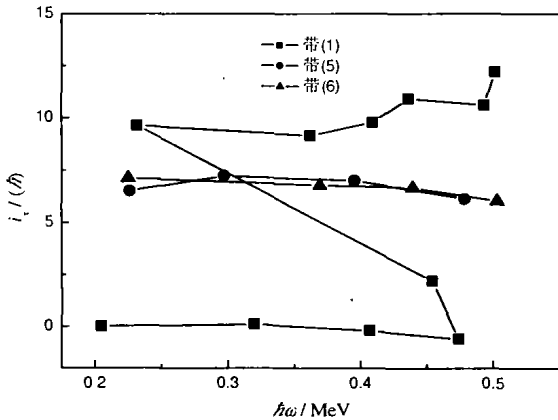


图 4 从实验提取的¹³⁴Ce 中带(1)、(5)和(6)的顺排角动量 i_x 随转动频率 $\hbar\omega$ 变化

而能量为 3 208.1 keV 的 yrast 10^+ 态为一半衰期为 485 ns 的同质异能态^[13]。在此 10^+ 同质异能态以上, 在图中标注为(4)的一系列能级具有单粒子跃迁特性. 这种同质异能态称为 yrast 陷阱. 从 g 因子的实验测量结果^[16]可以看出, 此 10^+ 同质异能态也是起源于一对 $h_{11/2}$ 准中子的组态. 而根据推转壳模型的计算^[13], 它为 $\gamma \approx -120^\circ$ 的长椭圆形变, 而此种长椭圆形变与 $\gamma \approx 0^\circ$ 的绕对称椭球的短轴转动的长椭圆形变不同, 为绕对称椭球的长轴转动的长椭圆形变^[1], 其能级结构是单粒子跃迁, 如在图 2 中 10^+ 同质异能态以上标注为(4)的一系列能级那样; 而后者为典型的集体转动能谱.

对于负宇称带(5)和(6), 这两个 $\Delta I=2$ 的转动带非常相似, 两带之间由 $\Delta I=1$ 的跃迁相连, 这两个带为一对 signature partner 带, 其带头为 7^- 能级. 在文献^[18]中报道了在相邻 $N=76$ 的同中子核 ¹³²Ba 的高自旋态中发现类似的 signature partner 带结构, 它起源于质子的 $h_{11/2}$ 与 $g_{7/2}$ 组态. 基于统计学原理的比较, 我们认为 ¹³⁶Ce 核中这个强耦合带也应具有质子的 $h_{11/2}$ 与 $g_{7/2}$ 组态, 即 $(\pi h_{11/2} \otimes \pi g_{7/2})$. 再考察图 4 中的带(5)和(6)的顺排角动量特性: 与相邻奇质子核 ¹³³La 相比较^[19], 带(5)和带(6)的顺排角动量 i_x 正好为 ¹³³La 核中的 $h_{11/2}$ 与 $g_{7/2}$

转动带的顺排角动量之和. 基于多准粒子组态中的顺排角动量相加性原理, 对 ¹³⁴Ce 核中这个带组态的指定是合理的. 而推转壳模型的计算指出, 由于质子的形状驱动效应, 两个准质子带应具有正的 γ 形变 ($\gamma \approx 0^\circ - 30^\circ$)^[1, 2]. 而在 ¹³²Ba 核中的两个准质子带被认为是 $\gamma \approx 30^\circ$ 的形状. 考虑到在 ¹³⁴Ce 核中的两个准质子带的伙伴带之间的 signature 劈裂较 ¹³²Ba 核中的要小, 带内的能级规律性更强, 我们认为, 新观测到的 ¹³⁴Ce 核中的两个准质子带具有 $\gamma \approx 0^\circ$ 的形状, 即为正常的长椭圆形变带.

通过以上的分析可以看到, 测得的 ¹³⁴Ce 的高自旋态显示出三种不同 γ 形变的形状共存结构: 在基带以上的带交叉处的 10^+ 态起源于两个 $h_{11/2}$ 准中子的组态, 为 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭圆形变; yrast 10^+ 同质异能态也起源于两个 $h_{11/2}$ 准中子的组态, 为 $\gamma \approx -120^\circ$ 的长椭圆形变; 而基于 7^- 态的强耦合带则起源于两个准质子 $h_{11/2}$ 与 $g_{7/2}$ 组态, 为 $\gamma \approx 0^\circ$ 的长椭圆形变. 对于两个新的跃迁系列(7)与(8)的结构特性尚不清楚, 需做进一步的研究.

4 总结

用重离子核反应与在束 γ 谱的实验技术, 对 ¹²²Cs 与 ¹³⁴Ce 核的高自旋态进行了研究, 扩展了 ¹²²Cs 与 ¹³⁴Ce 的能级纲图. 分析表明, 在 ¹²²Cs 中发现了可能是基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的手征二重带结构, 而在 ¹³⁴Ce 核的高自旋态结构中呈现出重要的具有不同 γ 形变的形状共存特性. 这种丰富多彩的形状共存结构对于理解原子核结构特性以及系统研究此区内单粒子轨道的形状驱动效应提供有意义的实验证据, 而对于在 $A=130$ 区中子数较少的奇奇核中观测到手征二重带的现象, 对其更深入的理解仍需做进一步的理论与实验工作.

致谢 作者感谢中国原子能科学研究院提供实验束流、靶以及在实验期间提供的各种帮助, 感谢北京大学许甫荣教授非常有益的指导与讨论.

参 考 文 献:

[1] Paul E S, Beausang C W, Fossan D B, et al. Phys Rev Lett, 1987, 58: 984.
 [2] Paul E S, Fossan D B, Liang Y, et al. Phys Rev, 1989, C40:

1 255.
 [3] Frauendorf S, Meng J. Nucl Phys, 1997, A617: 13.
 [4] Dimitrov V D, Frauendorf S, Döau F. Phys Rev Lett, 2000,

- 84: 5 732.
- [5] Starosta K, Koik T, Chiara C J, *et al.* Nucl Phys, 2001, **A682**: 375c.
- [6] 李险峰, 陆景彬, 刘运柞等. 第九届全国核结构学术会议报告, 2002 年, 合肥.
- [7] Li X F, Ma Y J, Liu Y Z, *et al.* Chin Phys Lett, 2002, **19**: 1 779.
- [8] Koik T, Starosta K, Chiara C J Z, *et al.* Phys Rev, 2001, **C63**: 061304(R).
- [9] Starosta K, Koik T, Chiara C J Z, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**: 971.
- [10] Smith J F, Chiara C J, Fossan D B, *et al.* Phys Rev, 1998, **C58**: 3 237.
- [11] Lu J B, Liu Y Z, Ma Y J, *et al.* J Phys, 1999, **G25**: 573.
- [12] Moon C B, Komatsubara T, Furuno K. Nucl Phys, 2000, **A674**: 343.
- [13] Müller-Veggian M, Beuscher H, Haenni D R, *et al.* Nucl Phys, 1984, **A417**: 189.
- [14] Ward D, Diamond R M, Stephens F S. Nucl Phys, 1968, **A117**: 309.
- [15] Goldberg M B, Broude C, Dafni E, *et al.* Phys. Lett, 1980, **97B**: 351.
- [16] Zemel A, Broude C, Dafni E, *et al.* Nucl Phys, 1982, **A383**: 165.
- [17] Radford D C. Nucl Instr and Meth in Phys Res, 1995, **A361**: 297.
- [18] Juutinen S, Törmänen S, Ahonen P, *et al.* Phys Rev, 1995, **C52**: 2 946.
- [19] Hildingson L, Klamra W, Lindblad Th, *et al.* Z Phys, 1991, **A338**: 125.

High Spin-states of ^{122}Cs and ^{134}Ce in $A=130$ Neutron-deficient Region*

ZHU Sheng-jiang¹, YU Ying-nan¹, GAN Cui-yun¹, ZHU Ling-yan¹, M. Sakhaee¹,
XIAO Shu-long¹, LI Ming-liang¹, CHE Xing-lai¹, WEN Shu-xian², ZHU Li-hua²,
WU Xiao-guang², LI Guang-sheng²

(¹ Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
² China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Through heavy ion nuclear reaction and in-beam γ -ray spectroscopy technique, the high spin states of neutron-deficient ^{122}Cs and ^{134}Ce nuclei in $A=130$ region have been studied. The $^{107}\text{Ag}(^{19}\text{F}, 1\text{p}3\text{n})$ and $^{122}\text{Sn}(^{16}\text{O}, 4\text{n})$ reactions were used. The previous level schemes of ^{122}Cs and ^{134}Ce have been extended. Possible chiral doublet bands in ^{122}Cs have been observed and a shape coexistence with different γ values in ^{134}Ce are suggested.

Key words: nuclear structure; high spin state; chiral doublet band; shape coexistence

* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program (G2000077405); National Natural Science Foundation of China (10375032); Special Program of Higher Education Science Foundation (20030003090)