

双奇核 ^{136}La 的集体带结构*

朱胜江^{1;1)} 肖树冬¹ 车兴来¹ 禹英男¹ 李明亮¹ 陈永静¹
竺礼华² 温书贤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 $A = 130$ 缺中子核区的双奇核 ^{136}La 的高自旋态进行了研究, 所用核反应为 $^{130}\text{Te}(^{11}\text{B}, 5\text{n})$. 实验结果扩展了 ^{136}La 的能级纲图, 包括 3 个集体转动带, 最高自旋态达 $20\hbar$. 对于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带, 观测到了旋称反转与集体回弯现象. 通过系统学比较, 对旋称反转特性进行了讨论. 由推转壳模型的计算指出, 此集体回弯是由一对中子的角动量顺排引起的. 另外两个集体带为具有 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭圆形变带, 其可能的组态为: $\pi h_{11/2} \otimes \nu g_{7/2} h_{11/2}^2$ 与 $\pi g_{7/2} \otimes \nu g_{7/2}^2 d_{5/2} h_{11/2}^2$.

关键词 核结构 旋称反转 集体回弯 扁椭圆形变

1 引言

双奇核 ^{136}La 位于核质量数 $A = 130$ 区, 其中子数 $N = 79$ 距 $N = 82$ 满壳层只相差 3 个, 预计其基态的 β 形变较小, 且具有软的 γ 形变. 然而在高自旋态下其结构特性则比较复杂, 因为位于此区内的核质子的费米面处于 $h_{11/2}$ 亚壳层的底部, 而中子的费米面则处于 $h_{11/2}$ 亚壳层的顶部. 推转壳模型的计算指出^[1], 随着转动频率的增加, 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, 甚至在一个核, 比如 ^{132}Ba ^[2], ^{134}Ce ^[3] 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. 而在许多核中, 比如 ^{134}La ^[4], ^{135}La ^[5], ^{137}Ce ^[6], ^{138}Ce ^[7] 等, 都发现了重要的扁椭圆形变带. 另一方面, 在对双奇核的高自旋态研究中, 旋称劈裂与反转以及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. 为了系统研究此区内双奇核的重要特性, 有必要对质子数较多的重同位素核进行进一步的高自旋态研究.

本文报道对于 ^{136}La 核高自旋态的实验研究结果.

在以往的研究中, 曾报道过用 $(p, 3n)$ 轻离子核反应对于 ^{136}La 低自旋态的实验结果^[8], 而在最近的一篇会议文稿中, 则简要报道了用重离子核反应研究其高自旋态的一些结果^[9].

2 实验、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. 用 $^{130}\text{Te}(^{11}\text{B}, 5\text{n})$ 重离子熔合-蒸发反应布居 ^{136}La 的高自旋态, 所用同位素 ^{130}Te 靶的厚度为 $1.6\text{mg}/\text{cm}^2$, 蒸发在厚度为 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 的铅靶衬上. ^{11}B 束流的能量为 60MeV . 由 14 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产生的 γ - γ 符合事件. Ge 探测器相对于 1.333MeV γ 射线的能量分辨率在 1.8 与 2.4keV 之间. 在实验中, 还进行了相对激发函数的测量, 所用能量为 $50, 55, 60, 65$ 和 70MeV , 以识别属于特定反应道的跃迁 γ 谱线. 离线处理建立了两维符合矩阵, 得到约 5×10^7 个(去除本底后)符合事件数的两维符合矩阵, 以供 γ - γ 符合数据分析. 为了确定 γ 跃迁的多极性, 从而推得能级的自旋与宇称, 还分别建立了两维方向关联矩阵, 用以作为

2005 - 02 - 02 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077405), 国家自然科学基金(10375032)和国家教育部博士点专项基金(20030003090)资助

1) E-mail: zhushj@mail.tsinghua.edu.cn

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了的Radware软件包^[10].

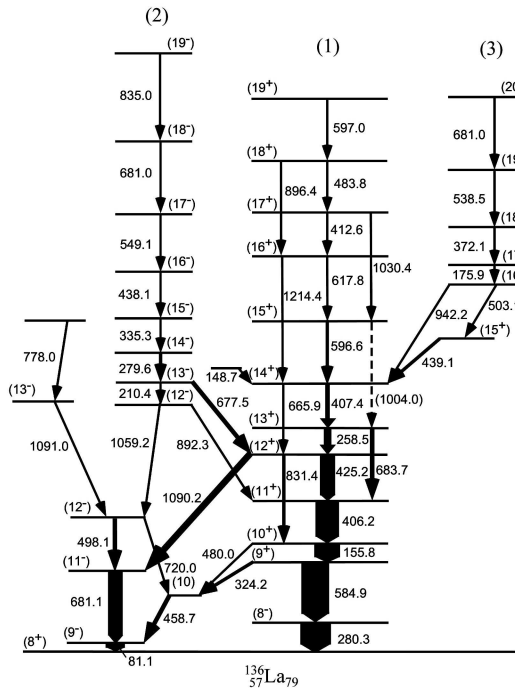


图 1 新建的 ^{136}La 能级纲图

通过 γ - γ 符合、相对跃迁强度、DCO 比率等的分析, 新建的 ^{136}La 能级纲图如图 1 所示. 为讨论方

便, 将集体带结构用带括号的数字表示在能级纲图的上部. 图 2 与图 3 分别给出对 584.9, 596.6, 438.1 与 175.9 keV γ 射线开门所得符合门谱的例子. 从每个门谱中, 我们可以清楚地看到在图 1 的能级纲图中与开门的 γ 峰相对应的符合 γ 峰.

本文所给出的 ^{136}La 的能级纲图不是建立在基态能级之上. 在以前发表的用轻离子核反应给出的研究结果中^[8], 指定了 ^{136}La 的基态的自旋宇称(I^π)为 1^+ , 并观测到一个半衰期为 115ms 的同质异能态, 且推测其 I^π 为 8^- 或 7^- . 但在文献[9]用重离子核反应所构建的能级纲图中, 认为其最低能级即为以上所发现的同质异能态, 并指定其 I^π 为 8^+ . 我们倾向于后者的指定, 即将图 1 中最低能级的 I^π 暂定为 8^+ . 基于与以前发表文献的比较^[8, 9]、DCO 比率的分析以及与相邻 La 双奇核的系统学比较, 推得了其他能级的 I^π . 在能级纲图的低自旋态部分, 证实了在文献[8]中的报道: 324.2 keV 的 γ 跃迁位于 458.7 keV 之上, 而不是在文献[9]中给出的两者的上下位置互换. 而本工作中所观测到的新的 480.0 与 720.0 keV γ 跃迁给予前者的指定以有力的支持. 此外, 还发现一条新的较强的 1090.2 keV γ 连接跃迁. 对于带(1), 在文献[8]中已观测到 12^+ 态, 而文献[9]则将它上推到较高的自旋态. 在我们现在的结果中, 对其 13^+ 以上的高自旋态能级

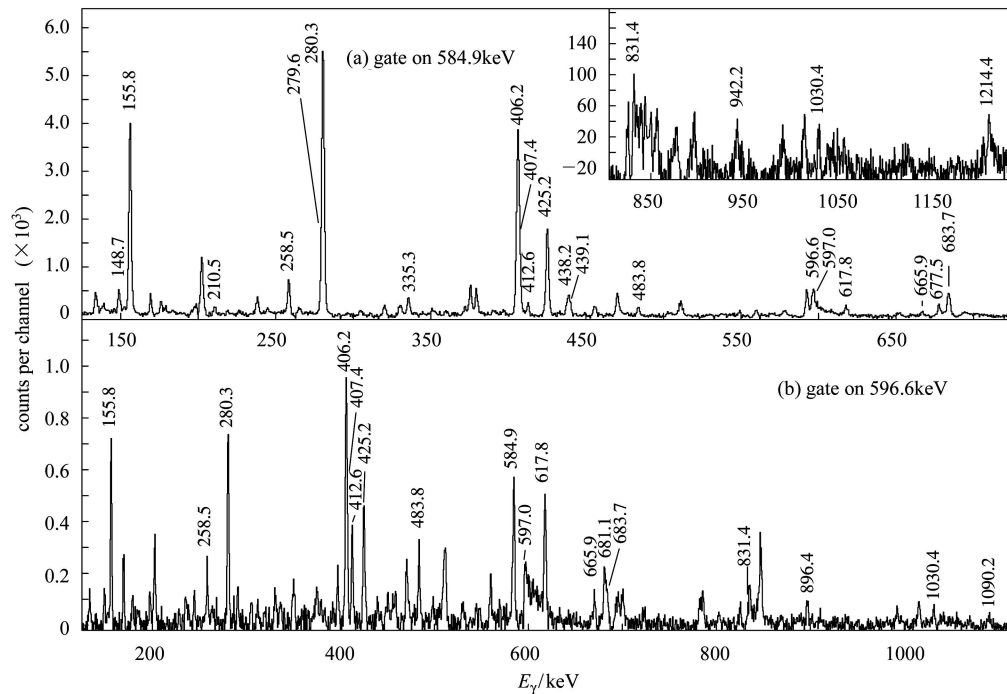


图 2 对 ^{136}La 数据分析的符合门谱

进行了重新构建, 自旋态观测到 19^+ . 在此带中, 几个 $\Delta I = 2$ 的跃迁的识别也给予这样的构建提供进一步的实验证据. 带(2)在文献[9]中已给出, 我们对其进行扩展, 在高自旋态部分新加了一个能级与跃迁. 而

文献[9]中, 带(3)仅给出两个能级与两个跃迁, 我们新观测到另外两个能级与两个跃迁, 使此带完全建立起来. 此外, 根据符合关系, 我们对带(1)与带(3)之间的连接跃迁也做了重新指定.

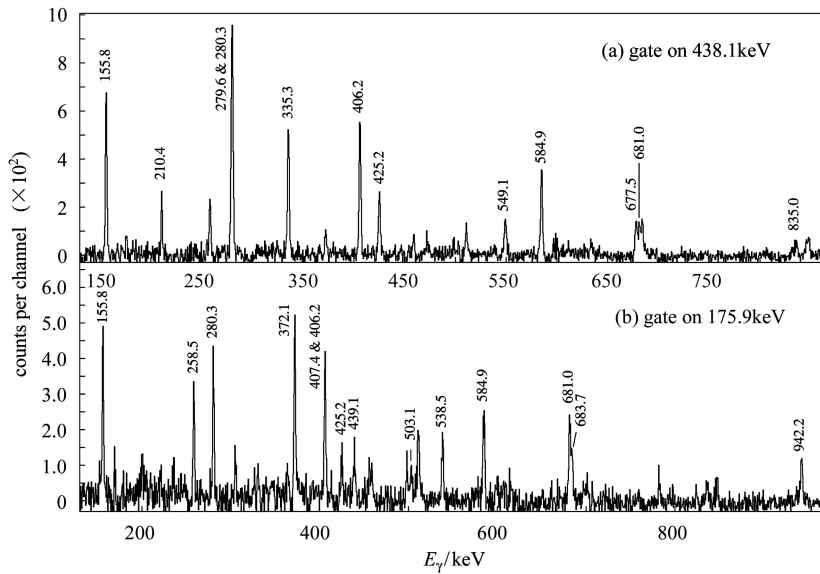


图 3 对 ^{136}La 数据分析的符合门谱

3 结果讨论

因为双奇核 ^{136}La 的中子数 $N = 79$ 离 $N = 82$ 的满壳很近, 形变参量较小, 其低激发态能级的单粒子性较强. 在文献[9]中, 带(1)被指定为建立在 8^+ 能级上的正宇称带, 其组态为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$. 然而, 根据与相邻核的系统学比较, 我们认为此带的带头能级的 I^π 应为 9^+ . 图 4 为实验测得的相邻 La 双奇核 $^{132}\text{La}^{[11]}$, $^{134}\text{La}^{[4]}$ 与现在的 ^{136}La 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的能级的系统性比较. 根据刘运祚教授等提出的在 $A = 130$ 区双奇核的自旋指定的系统学方法^[12], 我们认为, 指定 ^{136}La 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的带头能级的 I^π 为 9^+ 应是合理的.

另一方面, 对于此区内双奇核的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的旋称反转的系统学研究一直是一个比较重要的问题^[12], 而 ^{136}La 为目前 La 链双奇核中发现 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带结构的中子数最多的核, 此带的建立对于旋称反转随中子数变化的系统学研究提供新的实验数据. 图 5 给出本实验所测的 ^{136}La 以及相邻双奇核 $^{132}\text{La}^{[11]}$, $^{134}\text{La}^{[4]}$ 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带中的 signature partner 带的能量差 $[E(I) - E(I - 1)]/2I$ 随自旋值 I 的变化. 从图中可以看出, 在低自旋态下这 3 个 La 双奇核的旋称都是反转的, 然而, 随着中子数的增加其反

转点急剧下降: ^{132}La 为 $17.5h$, ^{134}La 为 $14.5h$, 而 ^{136}La 为 $12.5h$. 在过了反转点以后, 其特性则各不相同: 在 ^{132}La 中转为正常的旋称劈裂, 在 ^{134}La 中则继续反转, 而在 ^{136}La 中则现出无规律性. 这种现象需要理论上继续探讨.

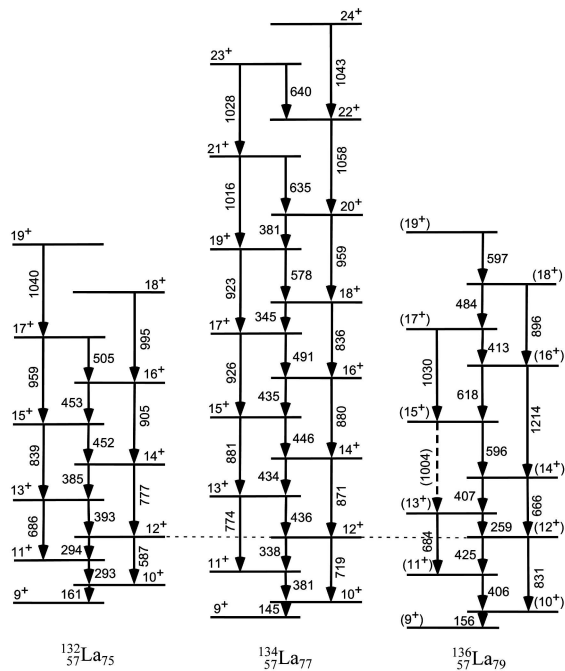


图 4 $^{132,134,136}\text{La}$ 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的系统学比较 (取 12^+ 作为参考能级)

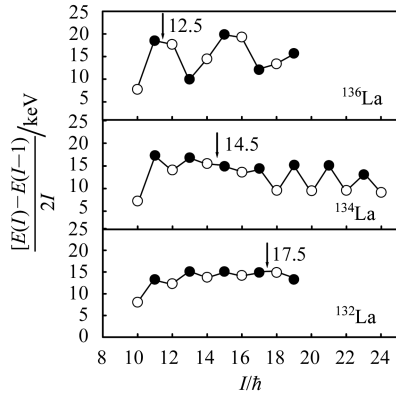


图 5 $^{132,134,136}\text{La}$ 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的能量差 $[E(I) - E(I-1)]/2I$ 随自旋值 I 的变化

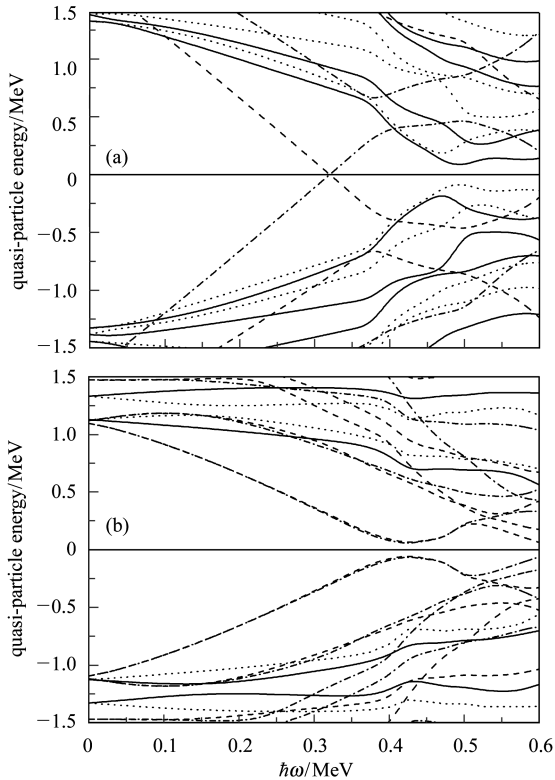


图 6 用推转壳模型算得的 ^{136}La 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的准质子(a)与准中子(b)的能级
能级的宇称与旋称 (π, α) 用不同的连线表示:
—为 $(+1/2, +1/2)$, \cdots 为 $(1/2, -1/2)$, $- \cdot -$ 为 $(-1/2, +1/2)$, $---$ 为 $(-1/2, -1/2)$.

进一步考察 ^{136}La 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的结构, 可以看出, 在能级为 9^+ 到 13^+ 的较低自旋态部分, 能级间距随自旋的变化很不规则, 旋称劈裂较大, 而在 13^+ 以上, 能级间距显示出通常转动带的规律性, 在 16^+ — 17^+ 的地方, 观测到集体回弯(带交叉)特性, 其交叉频率 $\hbar\omega \approx 0.45\text{MeV}$. 为了对此集体回弯的机制作出解释, 我们进行了推转壳模型的计算, 其原理与方法见文献[13—15]. 首先进行总罗斯面(TRS)的计算, 得到 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的形变极小值: $\beta_2 = 0.123$, $\gamma = 13^\circ$.

用以上的形变参数, 计算了准单粒子能级(罗斯量). 图 6 给出计算得到的准单质子与准单中子的能级图. 从图中可以看到, 由一对中子角动量顺排所引起的集体回弯发生在转动频率 $\hbar\omega \approx 0.44\text{MeV}$ 处, 这个数值与实验观测值 $\hbar\omega \approx 0.45\text{MeV}$ 相接近, 而算得的准单中子的能级图则比较复杂, 看不出有规律的集体回弯发生. 所以我们认为, 在 ^{136}La 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 中观测到的集体回弯是由一对中子的角动量顺排所致, 这与相邻核 ^{134}La [4] 的集体回弯具有相同的起源.

在图 1 中的负宇称带(2)与正宇称带(3)的特性非常相似: 在带内存在非常强的 $\Delta I = 1$ 的 M1 跃迁, 而 $\Delta I = 2$ 的 E2 跃迁则非常弱, 往往观测不到; 偶极跃迁的能量随自旋的增加而有规则地增加, 没有旋称劈裂; 与一般的长椭圆形变相比具有不同的转动惯量特性. 这些正是此区内的扁椭圆形变带的特性. 图 7 画出 ^{136}La 的带(2)与带(3)以及在 ^{134}La [4] 与 ^{137}Ce [6] 中观测到的扁椭圆形变带的第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 变化图. 可以看到, 它们都有类似的特点: 转动惯量随转动频率的增加而减少, 而与一般的长椭圆形变带正好相反. 所以在 ^{136}La 中的这两个带正是属于扁椭圆形变带. 文献[9]中, 将带(2)的组态定为 $\pi[413]_{5/2} h_{11/2}^2 \otimes \nu h_{11/2}$, 我们认为这样的指定是不正确的. 因为对于这样指定的组态, 根据推转壳模型的计算 [1], 一对 $h_{11/2}$ 质子的角动量顺排将驱动核形成长椭圆形变, 这与带(2)的结构特性是不符的. 而进一步通过与相邻核 ^{134}La [4] 类似的扁椭圆带相比较, ^{136}La 中带(2)可能属于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu g_{7/2} h_{11/2}^2$ 四准粒子的组态, 而不是文献[9]中所指定的 $\pi[413]_{5/2} h_{11/2}^2 \otimes \nu h_{11/2}$ 组态. 而带(3)带头的激发能比带(2)高得多, 可能属于六准粒子组态, 因其宇称为正, 其可能的组态为 $\pi g_{7/2} \otimes \nu g_{7/2}^2 d_{5/2} h_{11/2}^2$. 根据推转壳模型的计算 [1, 16], 具有这样组态的转动带, 一对中子占据 $h_{11/2}$ 轨道, 将驱动核的形状向 $\gamma \approx -60^\circ$ 的方向变化, 形成扁椭圆形变带.

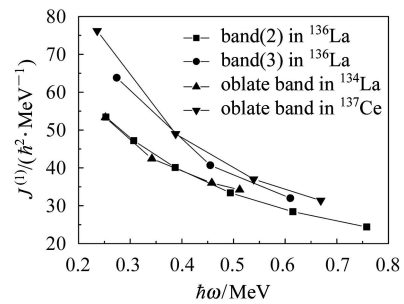


图 7 从 ^{136}La 的带(2),(3)以及 ^{134}La , ^{137}Ce 中的扁椭圆形变带提取的第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 变化图

4 结论

用重离子核反应和在束 γ 谱的实验技术, 研究了 ^{136}La 的高自旋态, 建立了 ^{136}La 新的能级纲图, 最高自旋态达 $20\hbar$. 着重对所建立的 3 个集体带结构进行了讨论. 对于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带, 观测到了旋称反转与集体回弯现象. 用系统学比较的方法, 发现其旋称反转的反常性. 用推转壳模型进行了计算, 结果表明,

^{136}La 中的集体回弯是由一对中子的角动量顺排引起的. 观测到的另外两个集体带被指定为具有 $\gamma = -60^\circ$ 的扁椭圆形变带, 其可能的组态为: $\pi h_{11/2} \otimes \nu g_{7/2} h_{11/2}^2$ 与 $\pi g_{7/2} \otimes \nu g_{7/2}^2 d_{5/2} h_{11/2}^2$.

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、吴哲英博士生等指导推转壳模型的计算.

参考文献(References)

- 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**: 1255
- 3 ZHU Sheng-Jiang, GAN Cui-Yun, ZHU Ling-Yan et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2005, **29**: 130 (in Chinese)
(朱胜江, 甘翠云, 朱凌燕等. 高能物理与核物理, 2005, **29**: 130)
- 4 Bark R A, Baxter A M, Byrne A P et al. Nucl. Phys., 2001, **A691**: 577
- 5 LUO Peng, ZHANG Yu-Hu, ZHOU Xiao-Hong et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28**: 495 (in Chinese)
(骆鹏, 张玉虎, 周小红等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 495)
- 6 ZHU S J, ZHU L Y, LI M et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 044310
- 7 ZHU S J, LI M, ZHU L Y et al. Chin. Phys. Lett., 1999, **16**: 635
- 8 Morek T, Beuscher H, Bochev B et al. Nucl. Phys., 1985, **A433**: 159
- 9 Cybulska E W, Oliveira J R B, Rizzutto M A et al. Acta Phys. Polonica, 2001, **B32**: 929
- 10 Radford D C. Nucl. Instrum. Methods, 1995, **A361**: 297
- 11 Kumar V, Das P, Singh R P et al. Eur. Phys. J., 2003, **A17**: 153
- 12 LIU Y, LU J B, MA Y J et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 719
- 13 Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1972, **A237**: 139
- 14 Frauendorf S et al. Phys. Lett., 1981, **B100**: 219
- 15 Frauendorf S et al. Phys. Lett., 1983, **B125**: 219
- 16 Hauschild K, Wadsworth R, Clark R M et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 613

Collective Band Structures in Doubly Odd ^{136}La Nucleus*

ZHU Sheng-Jiang^{1,1)} XIAO Shu-Dong¹ CHE Xing-Lai¹ YU Ying-Nan¹ LI Ming-Liang¹
CHEN Yong-Jing¹ ZHU Li-Hua² WEN Shu-Xian² 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 Using heavy-ion nuclear reaction and in-beam γ -ray spectroscopy technique, high spin states of ^{136}La have been studied. The nuclear reaction used is $^{130}\text{Te}(^{11}\text{B}, 5n)$ with a beam energy 60MeV. The level scheme with three collective band structures has been updated with spin up to $20\hbar$. The collective backbending has been observed in $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ band. According to the TRS calculations, this backbending is due to the alignment of a pair of $h_{11/2}$ neutrons. The signature splitting and inversion for the $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ band were also discussed. Other two bands based on 12^- and 16^+ levels were proposed as oblate deformation with $\gamma \approx -60^\circ$. They most probably originate from four- and six- quasiparticle configurations, that is, $\pi h_{11/2} \otimes \nu g_{7/2} h_{11/2}^2$ and $\pi g_{7/2} \otimes \nu g_{7/2}^2 d_{5/2} h_{11/2}^2$ respectively.

Key words nuclear structure, signature inversion, collective backbending, oblate deformation

Received 2 February 2005

*Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077405), National Natural Science Foundation of China (10375032) and Doctoral Fund of Ministry of Education of China (20030003090)

1) E-mail: zhushj@mail.tsinghua.edu.cn