

A=135 核区近 N=82 满壳附近核的 集体带结构研究*

朱胜江^{1;1)} 李明亮¹ 车兴来¹ 肖树冬¹ 陈永静¹ 禹英男¹ 丁怀博¹
竺礼华² 温书贤² 吴晓光² 李广生² 贺创业² 刘颖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=135核区近N=82满壳附近的奇A核 ^{137}La 与奇奇核 ^{138}Pr 的高自旋态结构进行了研究,所用核反应分别为 $^{130}\text{Te}(^{11}\text{B},4n)$ 与 $^{128}\text{Te}(^{14}\text{N},4n)$.实验结果扩展了这两个核的能级纲图.在 ^{137}La 中,新识别了4个集体转动带,其中,近晕带的转动带为弱的长椭圆形变,而另一集体带为扁椭圆形变;在 ^{138}Pr 中,观测到6个集体带,其晕带也为弱的长椭圆形变,其余5个集体带(其中有两个为我们新识别的)均为扁椭圆形变.对这些集体带的结构特性,如signature反转、组态起源等进行了讨论.

关键词 核结构 signature反转 扁椭圆形变

1 引言

A=135区的奇A核 ^{137}La 与奇奇核 ^{138}Pr 的中子数N分别为80与79,离N=82满壳层相差2—3个,预计其基态的形变很弱,低自旋能级结构将呈现出很强的单粒子性.而在高自旋态下的结构特性则比较复杂,存在所谓形状驱动效应.此区的核质子的费米面处于 $h_{11/2}$ 亚壳层的底部,而中子的费米面处于 $h_{11/2}$ 亚壳层的顶部.推转壳模型的计算指出^[1],一对位于 $h_{11/2}$ 亚壳层下部的粒子顺排将驱动核的形状向长椭圆形变($\gamma \sim 0^\circ$)方向变化,而一对位于 $h_{11/2}$ 亚壳层上部的粒子的顺排将驱动核的形状向扁椭圆形变($\gamma \sim -60^\circ$)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,可形成不同的形状.在以往的研究中,就观测到多条具有不同形变的长椭、扁椭、三轴形变带,甚至在一个核,比如 ^{132}Ba ^[2]中,就观测到同时存在具有不同形变的结构,即所谓形状共存.而在许多核(比如 ^{134}La ^[3], ^{136}La ^[4], ^{137}Ce ^[5], ^{138}Ce ^[6]等)中,已发现重要的扁椭圆形变带.另一方面,在对此区双奇核的高自旋态研究中,signature劈裂与反转也一直是人们感兴趣

的研究课题^[7].

本文报道对 ^{137}La 与 ^{138}Pr 的高自旋态的研究,目的是在近N=82满壳层附近的核中进一步寻找集体转动带,研究其形状驱动等效应.在以前别人发表的文献中,已对 ^{137}La 的低激发态^[8,9]以及 ^{138}Pr 的高自旋态^[10,11]进行了初步研究.然而与相邻核相比,研究结果尚须继续深入,且在 ^{137}La 中未发现任何集体带结构.

2 实验、数据分析与结果

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.分别用 $^{130}\text{Te}(^{11}\text{B},4n)$ 与 $^{128}\text{Te}(^{14}\text{N},4n)$ 重离子熔合-蒸发反应布居 ^{137}La 与 ^{138}Pr 的高自旋态.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.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,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.经过 γ - γ 符合、相对跃迁强度、DCO比率等的

* 国家自然科学基金(10375032,10575057),教育部博士点基金(20030003090)和国家重点基础研究发展规划(G2000077405)项目资助
1) E-mail: zhushj@mail.tsinghua.edu.cn

分析,新建的 ^{137}La 与 ^{138}Pr 能级纲图如图1与2所示.能级纲图中的集体转动带或级联跃迁结构在其上方用带括号的数字标出.

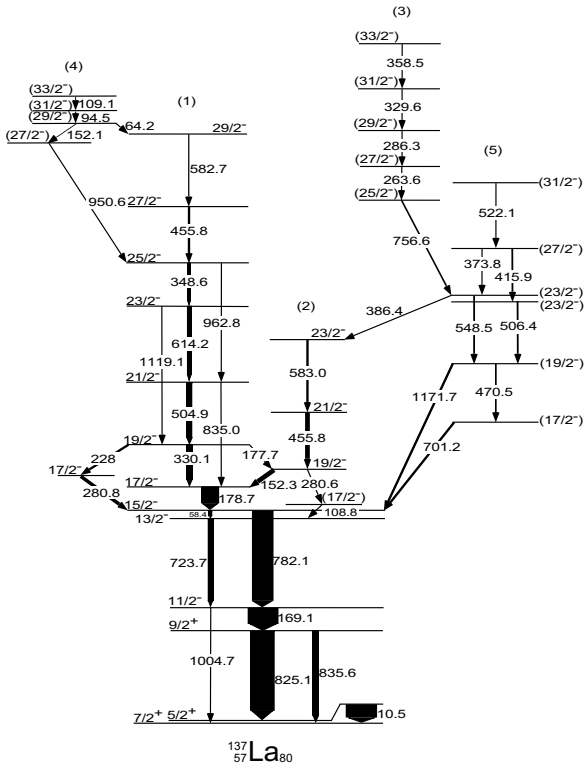


图1 ^{137}La 能级纲图

与以前发表的结果相比,对于 ^{137}La 核,在文献[8,9]中的一些能级和跃迁在本工作中得到了证实,而在图1中 $15/2^-$ 能级以上的所有的能级和跃迁,包括27个能级与38条跃迁都是我们新识别的.能级纲图中包括4个集体带结构(1)—(4)和一个能级序列(5).在 ^{138}Pr 中,与文献[11]相比,验证了原来识别的4个集体带(1), (2), (4), (6),并对其进行扩展,将晕带的自旋态扩展到 $15h$,并校正了原先能级纲图中的一些错误.而带(3)与带(5)则是本工作中新建立的.

3 结果讨论

对于图1中从基态到 $9/2^+$ 的 ^{137}La 的低自旋态能级,主要具有 $g_{7/2}$ 和 $d_{5/2}$ 的单准粒子特性^[9].而较高自旋态部分的晕带 ^{137}La 中的带(1)基于 $17/2^-$ 能级,自旋态扩展到 $29/2h$.为了解 ^{137}La 与 ^{138}Pr 晕带的形变特性,我们进行了推转壳模型的总罗斯面(TRS)的计算,计算的方法见参考文献[12—14],算得的一种TRS图的例子如图3所示.计算结果表明,对于 ^{137}La 核,在 $\hbar\omega=0.3\text{MeV}$ 时,其形变参数为: $\beta_2 \approx 0.12$, $\gamma \approx 10^\circ$.而在对于 ^{138}Pr 的TRS计算中,

在 $\hbar\omega=0.0\text{MeV}$ 时得到 $\beta_2 \approx 0.12$, $\gamma \approx 5^\circ$.可以认为,对于 ^{137}La 与 ^{138}Pr 的晕带(1)都具有小的 γ 形变与弱的 β_2 形变,基本上为弱的长椭圆形变带.

进一步分析 ^{137}La 中带(1)的组态特性,可以预计,带(1)的组态应与 $g_{7/2}$ 或 $d_{5/2}$ 的质子有关,这样的质子与高 K 两准中子组态的耦合可以产生象带(1)这样的强耦合带.这种高 K 包含两准中子组态的能态,有时候为同质异能态,确实已在中子数接近82满壳附近的核中观测到了,比如,在 ^{136}Ba 中就发现基于 $\nu d_{3/2}^{-1} h_{11/2}^{-1}$ 组态的 $K^\pi = 7^-$ 的同质异能态^[15, 16].同样,在文献[9]中也报道了在 ^{137}La 中存在一个1869keV能级的寿命为364ns的同质异能态,其组态为 $\pi g_{7/2} \otimes \nu d_{3/2}^{-1} h_{11/2}^{-1}$,而在我们的在束 γ 谱的瞬时符合测量中观测不到基于这种能级之上的带结构.如果我们用 $d_{5/2}$ 的质子代替以上组态中的 $g_{7/2}$ 质子,形成一个 $\pi d_{5/2} \otimes \nu d_{3/2}^{-1} h_{11/2}^{-1}$ 组态,此组态可以对应于带(1)中的能量为1966keV的 $17/2^-$ 的带头能级.因此, ^{137}La 中带(1)很可能起源于 $\pi d_{5/2} \otimes \nu d_{3/2}^{-1} h_{11/2}^{-1}$ 组态.

而对于双奇核 ^{138}Pr ,其晕带(1)的组态已被指定为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ ^[10, 11].而在文献[11]中,其带头能级的自旋宇称(I^π)被指定为 8^+ .基于此区内的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的系统学原理^[7],我们将带(1)的带头能级的 I^π 指定为 9^+ .相应的较高自旋有关能级的自旋值也增加一个单位.这样重新指定其自旋后,其结构特性既符合能级的系统学变化,也符合signature反转的系统学性质.图4为Pr同位素链的双奇核 $^{130-136}\text{Pr}$ 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带能级的系统学比较,可以看出,在将 ^{138}Pr 的自旋值修改以后,就非常符合系统学的变化规律了.

在此区内双奇核的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的signature反转现象一直引起人们很大的关注.而 ^{138}Pr 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的识别为系统研究此区的signature反转随中子数的变化得以进一步向中子数 $N=82$ 的满壳方向延伸.图5给出了在此区内La与Pr核链的奇奇核中的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的能量差 $[E(I-1) - E(I)]/2I$ 随自旋 I 的变化图.图中,实芯圆圈代表 $\alpha=1$ 的优惠带,而空芯圆圈则代表 $\alpha=0$ 的非优惠带.从图中可以看出,在我们重新指定了自旋值以后, ^{138}Pr 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带在低自旋区发生了signature反转,这与 $A \sim 130$ 区 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带signature反转的系统学规律^[7]相符合.倘若按照文献[11]指定的自旋,将不发生signature反转,这和系统学规律不符.从图5可以看出,在La与Pr核链中的双奇核的晕带在低自旋区都有signature反转.对La同位素链,从 ^{132}La 到

^{136}La , 随中子数的增加, 反转点的自旋值降低, 而在文献[7]中指出, 从 ^{124}La 到 ^{128}La , 随中子数增加, 反转点的自旋却是升高的. 对于 Pr 同位素链, 5 个核中只有两个核的反转点被观测到, 但从 signature 劈裂幅度的变化趋势似乎可以看出: 随中子数增加, 在 Pr 同位素的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带 signature 反转点也是先升高后降

低, 这似乎与 La 核的情况类似. 当然, 还需要在实验上观测到包含更高自旋态的晕带数据之后, 才能做出精确的结论. 可以肯定的是, $^{134}, ^{136}, ^{138}\text{Pr}$ 反转点的自旋值分别比中子数相同的 $^{132}, ^{134}, ^{136}\text{La}$ 核反转点自旋值高.

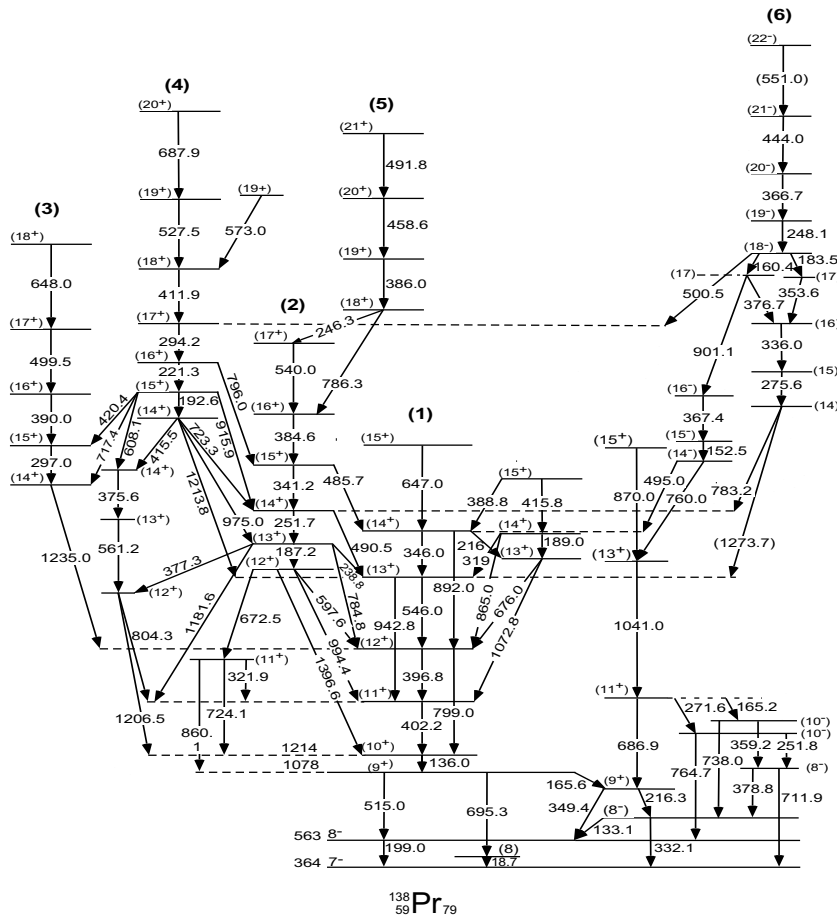


图 2 ^{138}Pr 能级纲图

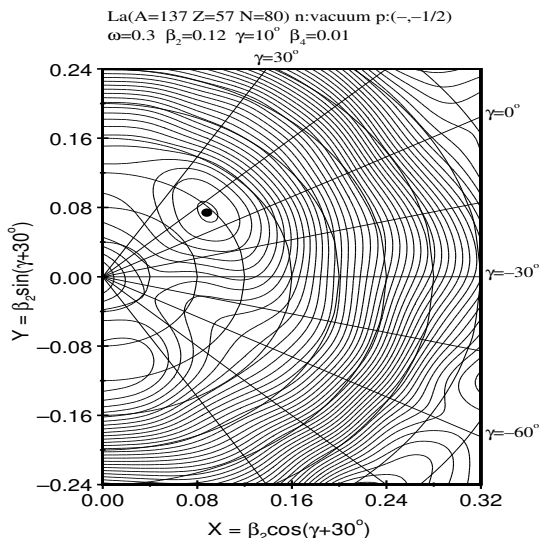


图 3 用推转壳模型计算得到的 ^{137}La 的 TSR 的图

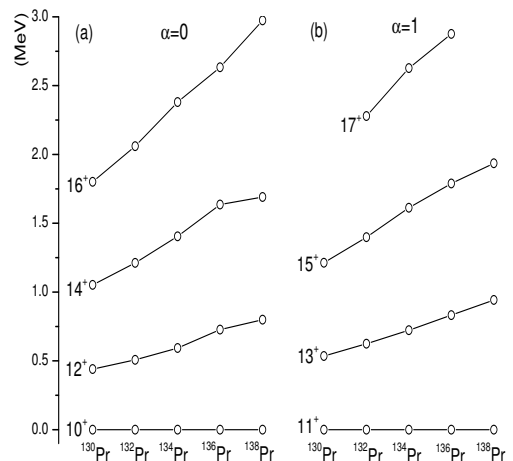


图 4 在 $^{130}\text{Pr}^{[17]}$, $^{132}\text{Pr}^{[17]}$, $^{134}\text{Pr}^{[18]}$, $^{136}\text{Pr}^{[19]}$, ^{138}Pr 双奇核中的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的激发能的系统学比较

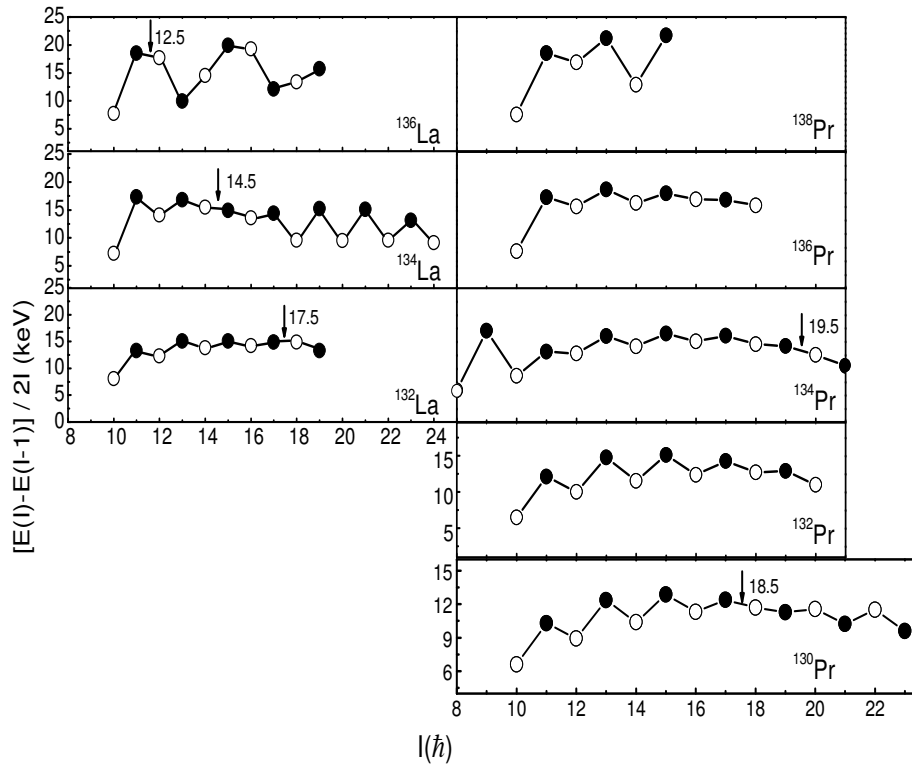


图 5 ^{132}La ^[20], ^{134}La ^[21], ^{136}La ^[4] 以及 ^{130}Pr ^[17], ^{132}Pr ^[17], ^{134}Pr ^[18], ^{136}Pr ^[19], ^{138}Pr 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的能量差 $[E(I) - E(I-1)]/2I$ 随自旋 I 的变化图

在 ^{137}La 中的负宇称带 (3) 以及在 ^{138}Pr 中的 5 个集体带 (2)–(6) 具有非常相似的特性: 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 signature 劈裂; 与一般的长椭圆形变带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 6 给出 ^{138}Pr 中的带 (2)–(6) 以及在相邻核 ^{135}La ^[22], ^{136}La ^[4], ^{137}Ce ^[5], ^{138}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, 与一般的长椭圆形变带正好相反. 所以我们认为这些带都是属于具有 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭圆形变带. 对于这些扁椭圆形变带的组态指定比较复杂, 根据 Nilsson 能级图以及与相邻核的系统学比较, 以及带头激发能的情况, 我们认为, ^{137}La 中的带 (3) 可能属于 5 准粒子带, 其可能的组态为: $\pi g_{7/2} d_{5/2} h_{11/2} \otimes (\nu h_{11/2})^2$, 在 ^{138}Pr 中的带 (2)–(4) 可能属于 4 准粒子带, 其可能的组态为, 带 (2): $\pi g_{7/2} \otimes \nu d_{3/2} (h_{11/2})^2$; 带 (3): $\pi d_{5/2} \otimes \nu d_{3/2} (h_{11/2})^2$; 带 (4): $\pi h_{11/2} \otimes \nu (h_{11/2})^3$. ^{138}Pr 中的带 (5)、带 (6) 可能属于 6 准粒子带, 可能的组态为, 带 (5): $\pi g_{7/2} (d_{5/2})^2 \otimes \nu d_{3/2} (h_{11/2})^2$; 带 (6): $\pi g_{7/2} d_{5/2} h_{11/2} \otimes \nu d_{3/2} (h_{11/2})^2$. 精确指定以上各扁椭

形变带的组态需要做更多的实验与理论工作. 然而在以上的建议的组态中, 均包含一对 $h_{11/2}$ 中子是合理的, 因为与 La 与 Pr 核链中的其他同位素相比, 这两个核的中子费米面处于 $h_{11/2}$ 子壳的更上部的轨道, 所以, 中子的形状驱动效应更明显, 即在高自旋态下核更趋向于形成 $\gamma \approx -60^\circ$ 的长椭圆形变. 我们的实验同时在 ^{138}Pr 核中观测到 5 条长椭圆形变带, 在此区的原子核

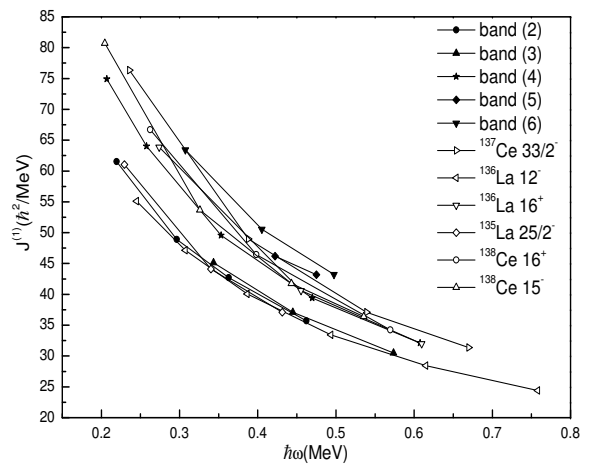


图 6 ^{138}Pr 中的带 (2)–(6) 与相邻的核 ^{135}La , ^{136}La , ^{137}Ce , ^{138}Ce 中的扁椭圆形变带 (其带头的自旋宇称值在相应的核素符号后标出) 的第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 的变化图

高自旋态结构的研究中还是第一次. 对于在 ^{137}La 中观测到的另外两个弱跃迁的转动带(2)与(4), 其结构特性尚不是很清楚, 带(2)的特性可能与带(1)相类似, 而带(4)也可能是一个扁椭圆形变带, ^{137}La 中跃迁系列(5)的各能级具有单粒子特性.

4 结论

用重离子核反应与在束 γ 谱的实验技术, 对 $A=135$ 核区的近 $N=82$ 满壳附近的奇 A 核 ^{137}La 与奇

核 ^{138}Pr 的高自旋态进行了研究, 在这两个核中各自识别了多条集体转动带. 它们的晕带具有近长椭圆形变的弱形变带, 并且识别了多条扁椭圆形变带, 对这些转动带的特性进行了讨论. 对这两个核的高自旋态结构研究结果, 对于加深此核区内的形状驱动效应以及其它结构特性的理解将是非常有益的.

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对于推转壳模型计算提供的帮助.

参考文献(References)

- 1 Paul E S et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**: 984
- 2 Paul E S et al. Phys. Rev., 1989, **C40**: 1255
- 3 Bark R A et al. Nucl. Phys., 2001, **A691**: 577
- 4 ZHU S J et al. Eur. Phys. J., 2005, **A24**: 199
- 5 ZHU S J et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 044310
- 6 ZHU S J et al. Chin. Phys. Lett., 1999, **16**: 635
- 7 LIU Y et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 71
- 8 Nakai K et al. Phys. Lett., 1973, **B44**: 443
- 9 Kortelahti M et al. Nucl. Phys., 1982, **A376**: 1
- 10 Rizzutto M A et al. Z. Phys., 1992, **A344**: 221
- 11 Gangopadhyay G et al. Eur. Phys. J., 2005, **A24**: 173
- 12 Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1972, **A237**: 139
- 13 Frauendorf S et al. Phys. Lett., 1981, **B100**: 219
- 14 Frauendorf S et al. Phys. Lett., 1983, **B125**: 219
- 15 Müller-Veggian M et al. Nucl. Phys., 1978, **A304**: 1
- 16 Ludziejewski J et al. Z. Phys., 1976, **A277**: 357
- 17 Petrache C M et al. Nucl. Phys., 1988, **A635**: 361
- 18 Petrache C M et al. Nucl. Phys., 1996, **A597**: 106
- 19 Petrache C M et al. Nucl. Phys., 1996, **A603**: 50
- 20 Kumar V et al. Eur. Phys. J., 2003, **A17**: 153
- 21 Bark R A et al. Nucl. Phys., 2001, **A691**: 577
- 22 LUO P et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28**: 495 (in Chinese)
(骆鹏等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 495)

Collective Band Structures of the Nuclei near $N=82$ Closed Shell in $A=135$ Region*

ZHU Sheng-Jiang^{1,1)} LI Ming-Liang¹ CHE Xing-Lai¹ XIAO Shu-Dong¹ CHEN Yong-Jing¹

YU Ying-Nan¹ DING Hui-Bo¹ XU Qiang¹ ZHU Li-Hua² WEN Shu-Xian²

WU Xiao-Guang² LI Guang-Sheng² HE Chuang-Ye² LIU Ying²

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

2 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract Through heavy-ion nuclear reactions and in-beam γ -ray spectroscopy technique, the high spin states of odd A ^{137}La and odd-odd ^{138}Pr nuclei which are located near the $N=82$ closed shell on $A=135$ region, have been studied. The $^{130}\text{Te}(^{11}\text{B},4n)$ and $^{128}\text{Te}(^{14}\text{N},4n)$ reactions were used to populate the level states for ^{137}La and ^{138}Pr respectively. The level schemes of these two nuclei have been extended. In ^{137}La , four collective bands have been newly identified. Among them, the near-yrast band is with weak prolate deformation, and another one belongs to a oblate band. In ^{138}Pr , six collective bands have been observed. The yrast band is with weak prolate deformation also, and all the other five bands, two of which are newly identified by the present work, are assigned as the oblate bands. The characteristics for these collective bands, such as the signature inversion, the configuration origination etc. have been discussed.

Key words nuclear structure, signature inversion, oblate deformation

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10375032, 10575057), Special Program of Higher Education Science Foundation (20030003090) and Major State Basic Research Development Program (G2000077405)

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