

$A = 130$ 区核高自旋态及形状驱动效应*

朱胜江^{1,1)} 禹英男¹ 肖树冬¹ 车兴来¹ 李明亮¹ 甘翠云¹ 许瑞清¹
M. 萨哈伊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 ^{134}Ce , ^{136}La 与 ^{122}Cs 核的高自旋态进行了研究, 实验结果扩展了 ^{134}Ce , ^{136}La 与 ^{122}Cs 的能级纲图. 由于在此区内质子与中子的形状驱动效应, 在这3个核中各自形成了具有显著特点的集体转动带: ^{134}Ce 核的高自旋态结构中呈现出具有不同 γ 形变的形状共存特性; 在 ^{136}La 中, 扩展了 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带, 对其特性进行了讨论, 并发现了两个 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭圆形变带; 在 ^{122}Cs 中发现可能是属于手征二重带的结构. 而对于在最近国外报道的 ^{134}Ce 核中的磁转动带没有被我们的实验所证实.

关键词 核结构 手征二重带 形状共存 扁椭圆形变

1 引言

对 $A = 130$ 缺中子核区的核在高自旋态下形状驱动效应的研究一直引起人们很大的关注. 此区内的核质子的费米面处于 $h_{11/2}$ 亚壳层的底部, 而中子的费米面处于 $h_{11/2}$ 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($\gamma \sim 0^\circ$)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($\gamma \sim -60^\circ$)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 γ 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 γ 形变的结构, 即所谓形状共存. 而在许多核(比如 ^{134}La ^[3], ^{137}Ce ^[4], ^{138}Ce ^[5]等)中, 已发现重要的扁椭圆形变带. 在对双奇核的高自旋态研究中, 除了signature劈裂与反转外, 由手征对称性破裂引起的手征二重带的研究也引起人们很大的关注. 理论预言在此区内的一些双奇核最有可能具有这种特性^[6-8]. 实验上在此区已

发现多个核的手征二重带结构, 其中, 在Cs同位素链的双奇核有: ^{126}Cs ($N = 71$)^[9], ^{128}Cs ($N = 73$)^[10], ^{130}Cs ($N = 75$)^[11], ^{132}Cs ($N = 77$)^[12]. 进一步在相邻同位素中对其进行研究, 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.

本文报道在此核区内对于 $N = 76$ 的偶偶核 ^{134}Ce , $N = 79$ 的双奇核 ^{136}La 及 $N = 67$ 的双奇核 ^{122}Cs 的高自旋态研究结果. 在以前别人发表的文献中, 已对此区内的 ^{134}Ce ^[13-16], ^{136}La ^[17], ^{122}Cs 核^[18-20] 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 ^{134}Ce 中研究形状共存特性, 在 ^{136}La 中研究扁椭圆形变带, 在 ^{122}Cs 中寻找手征二带. 在我们对 ^{134}Ce 核的高自旋态研究完成时, 文献[21]报道了关于此核存在磁转动带的结果, 然而此结果并未被我们的实验所证实.

2 实验、数据处理与结果

实验是在中国原子能科学院 H-13 串行加速器上进行的. 分别用 $^{122}\text{Sn}(^{16}\text{O}, 4n)$, $^{130}\text{Te}(^{11}\text{B}, 5n)$ 与 $^{107}\text{Ag}(^{19}\text{F}, 1p3n)$ 重离子熔合-蒸发反应布居 ^{134}Ce ,

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

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

^{136}La 与 ^{122}Cs 的高自旋态. 由 10—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 比率等的分析, 新建的 ^{134}Ce , ^{136}La 与 ^{122}Cs 部分能级纲图如图 1—3 所示. 在 ^{122}Cs 中仅画出正宇称转动带部分. 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标出.

与以前发表的结果相比, 对于 ^{134}Ce 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 $3208.1\text{keV } 10^+$ 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). 对于 ^{136}La 核, 扩展并重新指定了许多能级以及能级的自旋与宇称. 在带 (1) 的 12^+ 态以上, 对能级与跃迁作了重新认定与排列, 并发现了几条 $\Delta I = 2$ 的 E2 跃迁, 从而使得带 (1) 的高自旋态部分的能级纲图更加可靠. 扩展了集体转动带 (2) 并新建了集体转动带 (3). 对于 ^{122}Cs 的正宇称带部分, 扩展了原有的带结构 (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 $\Delta I = 2$ 边带转动带结构.

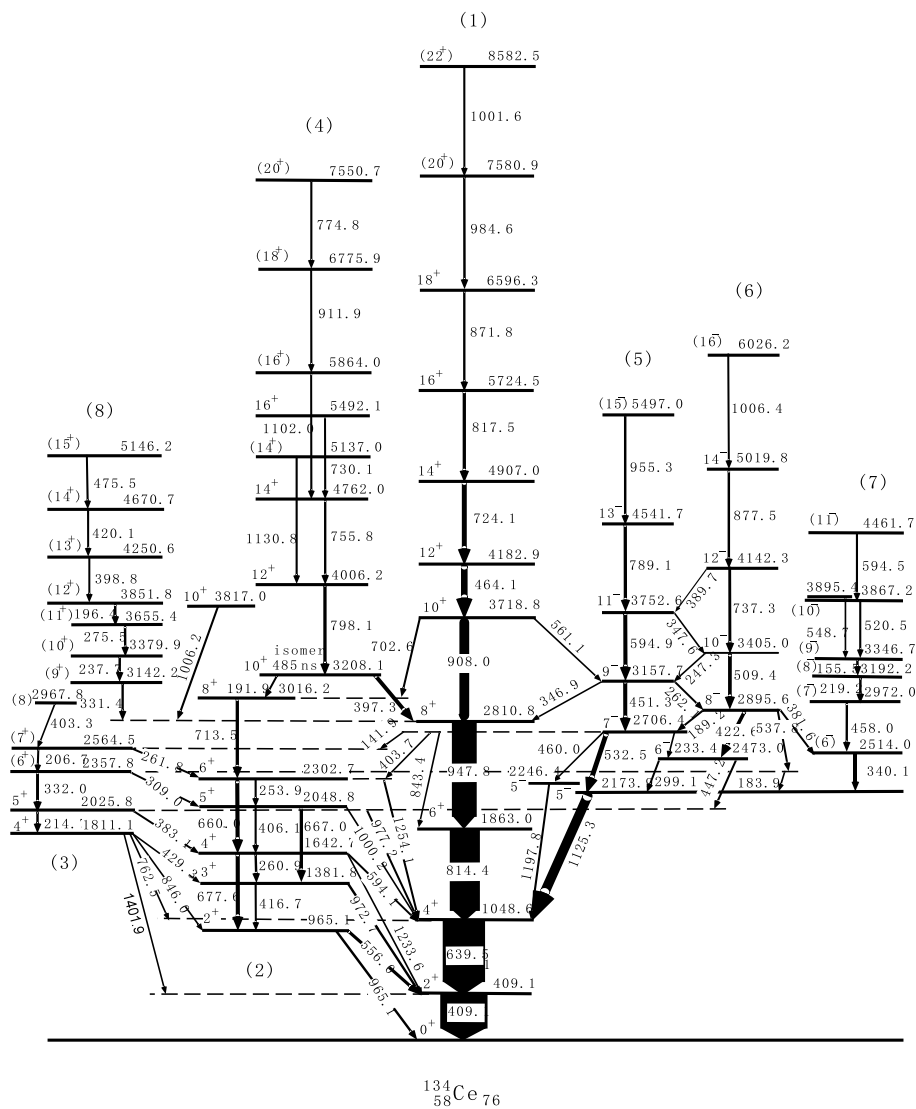


图 1 ^{134}Ce 能级纲图

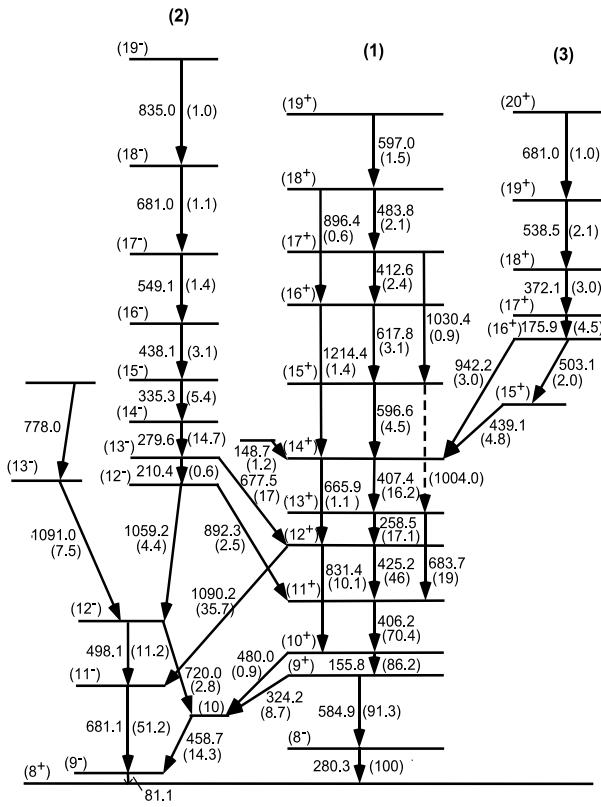


图 2 ^{136}La 能级纲图

3 结果讨论

对于 ^{134}Ce 核, 我们的实验结果与国外刚发表的结果^[21]存在很大的差异. 所谓在 ^{134}Ce 中发现的两个磁转动带{文献[21]中的带B4与B5}不能被我们的实验所证实. 仔细观察可发现, 在文献[21]中的带B4与B5内的 γ 跃迁分别对应本文图1中的跃迁系列(8) 与(7)中的 γ 跃迁, 但能级顺序不一样. 我们的实验观测不到在文献[21]中的带B4与B5向下退激的关键的 γ 谱线; 我们所测得的带B4与B5内的 γ 跃迁的强度关系也不符合 γ 退激的规律性. 基于仔细的 γ - γ 符合关系及强度关系的分析, 我们认为本文图1的结果是正确的. 图4给出了一个符合门谱的例子, 开门能量为 196.4keV {相当于文献[21]中的带B4的一个跃迁成员或本工作在图1中跃迁系列(8)的跃迁成员}. 从图中可以看出, 文献[21]中的带B4的强的退激跃迁, 如, $1030, 783, 894, 532$ keV 等, 根本观测不到或非常弱, 从这种符合关系看搭建文献[21]中的磁转动带结构是不可理解的. 而在图4中可以看到能级纲图中下面的退激跃迁峰, 如 $947.8, 814.4, 639.5, 409.1\text{keV}$ 等非常强, 这些强 γ 线的符合关系正好证实了我们的结果.

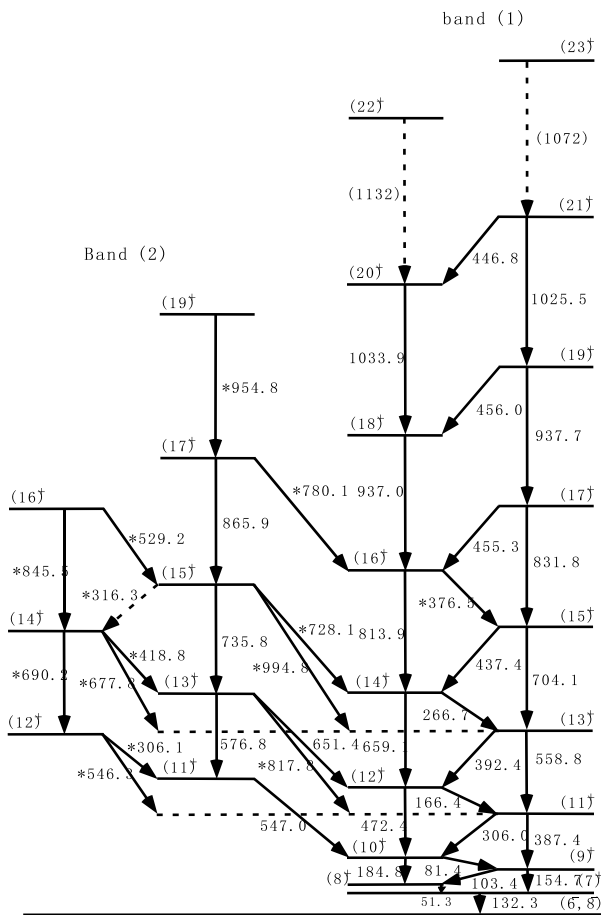


图 3 ^{122}Cs 能级纲图

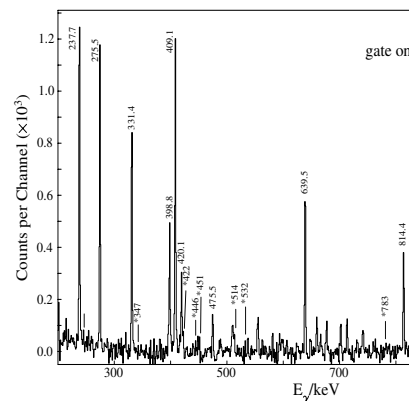


图 4 对 ^{134}Ce 的 196.4keV γ 跃迁开门的符合门谱

从图1可以看出, ^{134}Ce 能级结构是很复杂的. 带(1)为基带, 在带(1)的 8^+ 态以上, 其能级结构发生明显的变化: (1) 10^+ 以上的能级变成了非yrast态, 而另一个能量为 3208.1keV 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5为带(1), (5),(6)的顺排角动量 i_x 随转动频率 $h\omega$ 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 $h\omega \sim 0.34\text{MeV}$. 文献[16]中的g因子的测量结果指出, 带(1)中的 10^+ 态起源于一对 $h_{11/2}$ 中子的顺排, 而根据推壳模型的计算, 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 $\gamma \sim -60^\circ$ 的扁椭圆形变^[13]. 而能量为 3208.1keV 的 yrast 10^+ 态为一半衰期为 485ns 的同质异能态^[13]. 在此 10^+ 同质异能态以上, 在图3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. 根据 γ 因子的测量^[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 $\gamma \sim -120^\circ$ 的长椭圆形变, 此种长椭圆形变与 $\gamma \sim 0^\circ$ 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. ^{134}Ce 的负宇称带(5),(6)为一对 signature partner 带, 其带头为 7^- 能级. 考察图5中的带(5),(6)的顺排角动量特性: 与相邻奇质子核 ^{133}La 相比较^[22], 带(5)和带(6)的顺排角动量 i_x 正好为 ^{133}La 核中的中子的 $h_{11/2}$ 与 $g_{7/2}$ 转动带的顺排角动量之和. 基于顺排角动量相加性原理, 我们指定这个带的组态为 $\nu h_{11/2} \otimes \nu g_{7/2}$. 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 ($\gamma \sim 0^\circ - 30^\circ$)^[1,2]. 考虑到在 ^{134}Ce 核中的两个准质子带的伙伴带之间的 signature 劈裂较小, 带内的能级规律性更强, 我们认为, 新观测到的 ^{134}Ce 核中的两个准质子带具有 $\gamma \sim 0^\circ$ 的形状, 即为正常的长椭圆形变带.

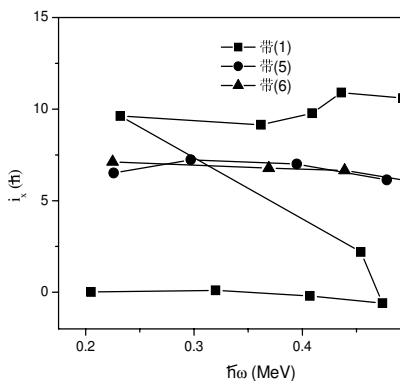


图5 从实验提取的 ^{134}Ce 中带(1), (5), (6)的顺排角动量 i_x 随转动频率 $\hbar\omega$ 变化图

通过以上的分析可以看到, 测得的 ^{134}Ce 的高自旋态显示出3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 $\gamma \sim -60^\circ$ 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 $\gamma \sim -120^\circ$ 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组态, 为 $\gamma \sim 0^\circ$ 的长椭圆形变.

因为双奇核 ^{136}La 的中子数 $N = 79$ 离 $N = 82$ 的满壳很近, 其形变参量很小, 其低激发态能级的

单粒子性较强. 在图2中, 带(1)基于 9^+ 能级, 其自旋态观测到 19^+ . 在 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, signature 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, 显示出集体回弯(带交叉)的特性, 其交叉频率 $\hbar\omega \approx 0.5\text{MeV}$. 通过与相邻的 La 双奇核 ^{132}La ^[23], ^{134}La ^[3] 的系统学比较, 我们指定带(1)的组态为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$. 对于此区内双奇核的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的 signature 反转的系统学研究一直是比较重要的问题^[24], ^{136}La 核为目前 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 signature 反转随中子数变化的系统学研究提供了新的实验证据. 图6给出本实验所测的 ^{136}La 以及相邻双奇核 ^{132}La ^[23], ^{134}La ^[3] 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带中的 signature partner 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 signature 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 $17.5\hbar$, ^{134}La 为 $14.5\hbar$, 而 ^{136}La 为 $12.5\hbar$. 然而在过了反转点以后, 其特性则各不相同: 在 ^{132}La 中转为正常的 signature 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. 通过推转壳模型的计算, 在 ^{136}La 中 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的集体回弯起源于一对 $\nu h_{11/2}$ 中子的顺排, 这与相邻核 ^{134}La ^[3] 具有相同的起源.

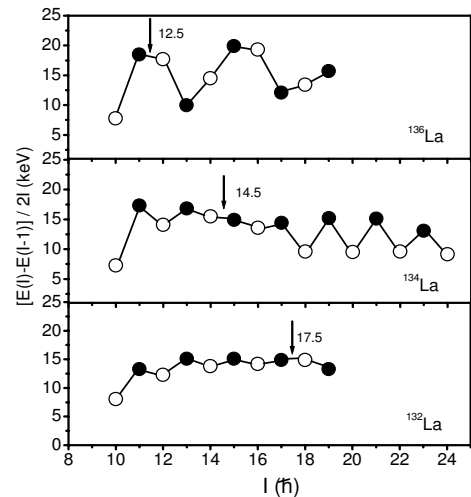


图6 ^{136}La 以及 ^{132}La , ^{134}La 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带中的 signature partner 带的能量差 $[E(I) - E(I - 1)]/2I$ 随自旋值 I 的变化

图2中的带(2)与带(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

加而有规则的增加, 没有signature劈裂; 与一般的长椭圆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为 ^{136}La 的带(2)与带(3)以及在 ^{134}La ^[3]与 ^{137}Ce ^[5]中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: 随转动频率的增加而减少, 与一般的长椭圆变带正好相反. 所以在 ^{136}La 中的这两个带正是属于扁椭圆形变带. 通过与相邻核 ^{134}La ^[3]的比较, ^{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[10]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)高的多, 可能属于六准粒子组态, 因其属于正宇称带, 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^[1,25], 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 $\gamma \sim -60^\circ$ 的方向变化, 形成扁椭圆形变带.

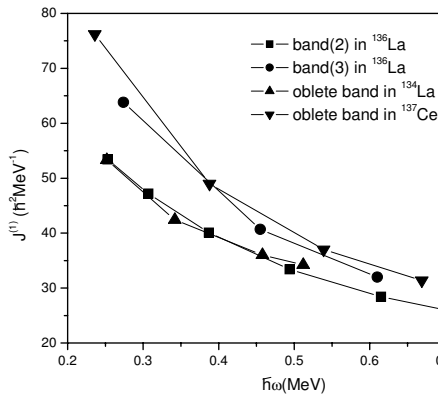


图7 ^{136}La 的带(2)与带(3)以及在 ^{134}La 与 ^{137}Ce 中扁椭圆形变带的第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 变化图

从图3可以看出, 对于 ^{122}Cs 的正宇称带(1)的带头自旋值的指定对于确定其他能级的自旋是很重要的. 然而现有的实验证据对其确定尚有争议, 文献[19]基于系统学比较, 将带头自旋值指定为 $7\hbar$, 而文献[20]则指定为 $9\hbar$, 两者相差 $2\hbar$. 基于下面的系统学比较, 我们认为其带头应为 $7\hbar$. 从图3中可以看出, ^{122}Cs 正宇称带(1)与(2)分别由2个 $\Delta I = 2$ 的signature partner带构成, 其中, 带(1)为晕带, 它的组态已被指定为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ ^[19,20]. 文献[24]对此区内其他奇奇核中的此转动带的特性作了系统地研究. 而带(2)为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的边带. 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 $^{124-130}\text{Cs}$ ^[9-11]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很相似, 即我们观测到的 ^{122}Cs 中的带(1)与带(2)很可能属于具

有 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的手征二重带结构. 图8给出在已报道的 $^{126,128,130}\text{Cs}$ ^[9-11]的基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的手征二重带以及在本实验中我们观测到的 ^{122}Cs 中的基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 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, 符合系统学的变化规律. 最近北京大学课题组对 ^{122}Cs 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的特性进行了理论计算, 首先, 用相对论平均场理论计算形变参量 β 与 γ 值, 结果为 $\beta \sim 0.22$ 与 $\gamma \sim 28^\circ$, 说明 ^{122}Cs 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带确实具有三轴形变的特性, 这是手征二重带存在的基本条件. 然后用此形变参量, 用三轴形变粒子-转子模型计算 ^{122}Cs 的手征二重带的能谱, 结果如图8中的虚线所示, 理论计算的手征二重带的能谱与实验符合很好.

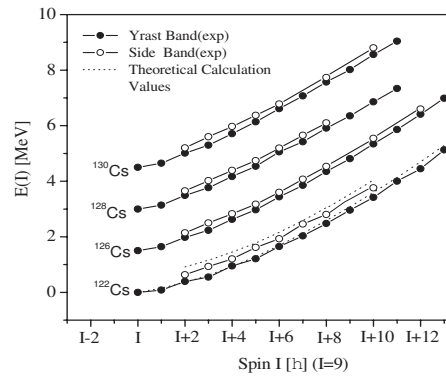


图8 $^{126,128,130}\text{Cs}$ 以及本实验中观测到的 ^{122}Cs 的手征二重带的晕带与边带的激发能随自旋态的变化. 图中, 虚线为对 ^{122}Cs 的理论计算值.

4 结论

用重离子核反应与在束 γ 谱的实验技术, 对 $A = 130$ 核区的 ^{134}Ce , ^{136}La 与 ^{122}Cs 核的高自旋态进行了研究, 扩展了这几个核的高自旋态能级纲图. 结果表明, 所谓在 ^{134}Ce 中存在磁转动带的报道不能被我们的实验所证明, 而我们报道的在 ^{134}Ce 核的高自旋态新结构中呈现出重要的具有不同 γ 形变的形状共存特性. 在 ^{136}La 中观测到 $\nu h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 带的signature反转以及带交叉现象, 对此特性进行了系统学比较与讨论, 并且发现两个具有 $\gamma \sim -60^\circ$ 的扁椭圆形变带, 可能分别具有4准粒子与6准粒子的组态. 在 ^{122}Cs 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. 这种丰富多彩的形状共存, signature反转, 扁椭圆形变, 手征二重带等结构对于理解原子核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.

作者感谢中国原子能科学院提供实验束流、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, 孟杰教授, 彭婧博士生等非常有益的理论指导与讨论.

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. Phys. Rev., 2000, **C62**: 044310
- 5 ZHU S J et al. Chin. Phys. Lett., 1999, **16**: 635
- 6 Frauendorf S, MENG J. Nucl. Phys., 1997, **A617**: 13
- 7 Dimitrov V D et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**: 5732
- 8 Starosta K et al. Nucl. Phys., 2001, **A682**: 375c
- 9 LI X F et al. Chin. Phys. Lett., 2002, **19**: 1779
- 10 Koik T et al. Phys. Rev., 2001, **C63**: 061304(R)
- 11 Starosta K et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 971
- 12 Rainovski G et al. J. Phys. G : Nucl. Part. Phys., 2003, **29**: 2763
- 13 Müller-Veggian M et al. Nucl. Phys., 1984, **A417**: 189
- 14 Ward D et al. Nucl. Phys., 1968, **A117**: 309
- 15 Goldberg M B et al. Phys. Lett, 1980, **97B**: 351
- 16 Zemel A et al. Nucl. Phys., 1982, **A383**: 165
- 17 Cybulska E W et al. Acta Phys. Polonica, 2001, **B32**: 929
- 18 Smith J F et al. Phys. Rev., 1998, **C58**: 3237
- 19 LU J B et al. J. Phys., 1999, **G25**: 573
- 20 Moon C B et al. Nucl. Phys., 2000, 352. **A674**: 343
- 21 Lakshmi S et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 014319
- 22 Hildingson L et al. Z. Phys., 1991, **A338**: 125
- 23 Kumar V et al. Eur. Phys. J, 2003, **A17**: 153
- 24 LIU Y et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 719
- 25 Hauschild et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 613

High Spin-States and Shape Driving Effects in $A = 130$ Nuclear Region*

ZHU Sheng-Jiang^{1,1)} YU Ying-Nan¹ XIAO Shu-Dong¹ CHE Xing-Lai¹ LI Ming-Liang¹
GAN Cui-Yun¹ XU Rui-Qing¹ M. Sakhae¹ 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 Through $^{122}\text{Sn}(^{16}\text{O}, 4n)$, $^{130}\text{Te}(^{11}\text{B}, 5n)$ and $^{107}\text{Ag}(^{19}\text{F}, 1p3n)$ heavy-ion nuclear reactions and in-beam γ -ray spectroscopy technique, high spin states of ^{134}Ce , ^{136}La and ^{122}Cs have been studied. The previous level schemes have been extended. The observed results show that the collective band structures in these three nuclear were affected by the shape-driving effects. The shape coexistence with different γ deformations has been observed in ^{134}Ce . In ^{136}La , the $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ band was updated and its character has been discussed while two oblate bands with $\gamma \sim -60^\circ$ have been established. In ^{122}Cs chiral doublet bands were proposed. The magnetic rotational bands reported in a recent paper in ^{134}Ce were not confirmed by our experiment.

Key words nuclear structure, chiral doublet bands, shape coexistence, oblate deformation

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

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