

文章编号: 1007-4627(2008)03-0209-09

# $A=135$ 核区 $N=79$ 的同中异位素高自旋结构研究<sup>\*</sup>

朱胜江<sup>1</sup>, 徐 强<sup>1</sup>, 车兴来<sup>1</sup>, 朱凌燕<sup>1</sup>, 陈永静<sup>1,2</sup>, 丁怀博<sup>1</sup>, 王建国<sup>1</sup>,

竺礼华<sup>2</sup>, 温书贤<sup>2</sup>, 吴晓光<sup>2</sup>

(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:** 对清华大学在束  $\gamma$  谱实验组近年来在  $A=135$  缺中子核区  $N=79$  的同中异位素  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  的高自旋态实验研究进行了介绍。实验是在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器上用在束  $\gamma$  的实验技术、分别通过重离子核反应  $^{130}\text{Te}(^9\text{Be}, 4n)$ ,  $^{124}\text{Sn}(^{18}\text{O}, 5n)$ ,  $^{128}\text{Te}(^{16}\text{O}, 5n)$  进行的。实验结果扩展了这 3 个核的高自旋态能级纲图。研究表明, 这 3 个核的低自旋态结构均起源于  $\nu h_{11/2}$  空穴与其偶偶核芯的耦合。用粒子-转子模型对其结构进行了计算, 得到这 3 个核的形变参量  $\gamma$  值均稍大于  $30^\circ$ , 为偏向于扁椭的三轴形变, 从而可看出 Ba, Ce 和 Nd 3 个同位素链在低自旋态下由长椭边到扁椭边的形状转变都发生在中子数  $N=77-79$  之间。对于中等自旋态下一些能级的组态进行了指定与系统学比较。在高自旋态下, 在  $^{137}\text{Ce}$  中发现一条  $\gamma \approx -60^\circ$  的扁椭圆形变带, 在  $^{139}\text{Nd}$  中则发现 3 条这样的扁椭圆形变带, 对这些扁椭圆形变带的起源及结构特性进行了讨论。

**关键词:** 核结构; 高自旋态; 形状转变; 扁椭圆形变

**中图分类号:** O571.24

**文献标识码:** A

## 1 引言

近年来, 我们对质量数  $A=135$  核区缺中子核的高自旋态进行了较为系统的研究, 其中, 对中子数近  $N=82$  满壳层附近的  $N=79$  的同中异位素的研究是一个重要方面。已研究的核包括  $^{135}\text{Ba}$ <sup>[1]</sup> ( $Z=56$ ),  $^{136}\text{La}$ <sup>[2]</sup> ( $Z=57$ ),  $^{137}\text{Ce}$ <sup>[3]</sup> ( $Z=58$ ),  $^{138}\text{Pr}$ <sup>[4]</sup> ( $Z=59$ ) 和  $^{139}\text{Nd}$  ( $Z=60$ )。其中, 对  $^{139}\text{Nd}$  核的研究工作刚完成, 而其它核的研究结果已发表, 见文献[1—4]。本文着重介绍  $N=79$  奇  $A$  核  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  的研究结果及其系统的结构特性。

对于此区内核结构的研究, 尤其是高自旋态的研究一直引起人们很大的关注。中子数靠近  $N=82$  满壳层的核具有小的四极形变参量  $\epsilon_2$ , 而  $\gamma$  形变则比较“软”, 核的形状不稳定, 存在集体运动与单粒子运动的强烈竞争, 其能级结构异常复杂。在低激发态下, 随着中子数的增加, 存在从长椭边 ( $\gamma < 30^\circ$ ) 向扁椭边 ( $\gamma > 30^\circ$ ) 的形状转变; 在中等自旋态下, 存在系统的多粒子组态激发能级; 而在高自旋

态下显示出明显的形状驱动效应。所谓形状驱动效应, 即从形变壳模型的观点看, 位于此区内的核的质子费米面处于  $h_{11/2}$  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<sup>[5]</sup>, 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。在以往的研究中, 观测到多条具有不同  $\gamma$  形变的长椭、扁椭、三轴形变带, 甚至在一个核, 比如  $^{132}\text{Ba}$ <sup>[6]</sup> 和  $^{134}\text{Ce}$ <sup>[7]</sup> 等核中, 就观测到同时存在不同  $\gamma$  形变的结构, 即所谓形状共存。而在许多核中, 已发现重要的扁椭圆形变带。

对于  $N=79$  的奇  $A$  核  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  的高自旋态结构, 以往的研究很不充分。对于  $^{135}\text{Ba}$  核, 文献[8, 9]分别利用 ( $^9\text{Be}, xn$ )、 $\beta$  衰变以及 ( $n, \gamma$ ) 反应进行了研究, 得到了一些低自旋态的实验结

\* 收稿日期: 2007-10-08; 修改日期: 2007-12-07

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10375032, 10775078); 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB815005)

作者简介: 朱胜江(1946—), 男(汉族), 江苏滨海人, 教授, 博导, 从事核物理研究; E-mail: zhushj@mail.tsinghua.edu.cn

果；对于  $^{137}\text{Ce}$  核，文献[10—12]分别用不同的轻离子核反应进行了研究，给出了一些高自旋态的结果；而对于  $^{139}\text{Nd}$  核，较早的工作[13—15]用轻离子与重离子核反应进行了研究，得到了部分高自旋态的结构。而当我们对于  $^{139}\text{Nd}$  的研究工作接近完成时，文献[16]报道了用重离子核反应研究  $^{139}\text{Nd}$  的结果。而与以上报道的研究工作相比，我们的研究结果大大扩展了这 3 个核的高自旋结构，发现了许多重要的结构特性。

## 2 实验与数据分析

实验是在中国原子能科学研究院 H-13 串联加速器上进行的。分别用  $^{130}\text{Te}(^9\text{Be}, 4n)$ ， $^{124}\text{Sn}(^{18}\text{O}, 5n)$  和  $^{128}\text{Te}(^{16}\text{O}, 5n)$  重离子熔合-蒸发反应布居  $^{135}\text{Ba}$ ， $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  的高自旋态。所用同位素  $^{130}\text{Te}$ ， $^{124}\text{Sn}$  和  $^{128}\text{Te}$  靶的厚度分别为 2.3，7.0 和 2.7  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ，分别蒸发在厚度为 7—20  $\text{mg}/\text{cm}^2$  的

铅或金靶衬上。所用  $^9\text{Be}$ ， $^{18}\text{O}$  和  $^{16}\text{O}$  束流的能量分别为 45，78 和 90 MeV。由 8—14 个反康高纯 Ge 探测器组成的联合在束  $\gamma$  谱探测装置测量高自旋态退激产生的  $\gamma$ - $\gamma$  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  $\gamma$  跃迁谱线。离线处理建立了二维符合矩阵，以供  $\gamma$ - $\gamma$  符合数据分析。为确定  $\gamma$  跃迁的多极性从而推得能级的自旋与宇称，还建立了二维方向关联矩阵，用以分析取向核态的方向关联强度(DCO)比率。

数据分析是在清华大学进行的，采用移植了的功能强大的 Radware 软件包[17]。分析包括通常的高自旋态数据分析的流程，如  $\gamma$ - $\gamma$  符合、相对跃迁强度、DCO 比率等，从而得到物理结果。

## 3 实验结果

新建的  $^{135}\text{Ba}$ ， $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  的高自旋态能级纲图分别如图 1—图 3 所示。图中， $\gamma$  跃迁的线条

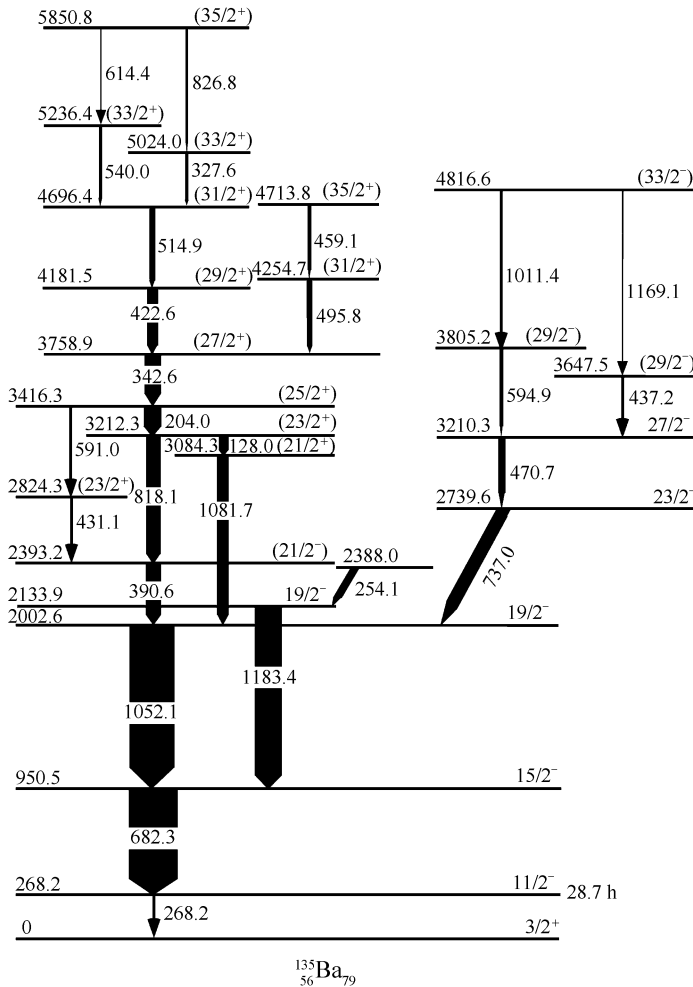


图 1 新建的  $^{135}\text{Ba}$  能级纲图



268.2, 682.3和 1 052.1 keV 外, 其余 20 个新能级与 24 条新的  $\gamma$  跃迁都是本实验发现的。对于  $^{137}\text{Ce}$  核, 与原有的结果<sup>[10-12]</sup> 相比, 除了强的级联跃迁 476.4  $\rightarrow$  552.5  $\rightarrow$  287.2  $\rightarrow$  190.5  $\rightarrow$  735.2  $\rightarrow$  450.5  $\rightarrow$  1 117.7  $\rightarrow$  673.6 keV 以及边带跃迁 1 263.3, 298.4, 482.2和 443.7 keV 以外, 所有的能级与跃迁都是本实验新发现的, 其中包括在高自旋态下的一个集体转动带(1)。而对于  $^{139}\text{Nd}$  核, 相比于早期报道<sup>[13-15]</sup> 的结果, 大大扩充了原有的能级结构, 并更正了原有能级纲图的一些错误。而与刚发表的文献<sup>[16]</sup> 相比, 我们验证了其大部分实验结果。在较

低自旋态部分, 加了两条  $\gamma$  跃迁: 868.8 keV (从 1 967.4 keV(17/2<sup>-</sup>)到 1 098.6 keV(13/2<sup>-</sup>)能级) 以及 581.7 keV (从 2 571.9 keV(19/2<sup>+</sup>)到 1 990.2 keV(15/2<sup>-</sup>)能级)。而我们没有观测到在文献<sup>[16]</sup> 中报道的两条  $\gamma$  跃迁: 从 3 838.5 keV(25/2<sup>-</sup>)到 3 074.8 keV(23/2<sup>+</sup>)能级的 763.7 keV  $\gamma$  跃迁以及在 4 448.8 keV(31/2<sup>-</sup>)能级之上的 1 308.0 keV  $\gamma$  跃迁。在高自旋态部分, 两个新的集体带(1)和(5)以及两个新的 $\gamma$ 级联跃迁系列(2)和(3)也是我们新发现的。带(5)为基于 6 995.0 keV 能级的负宇称带, 而带(1)的带头能级尚不能确定, 因研究发现

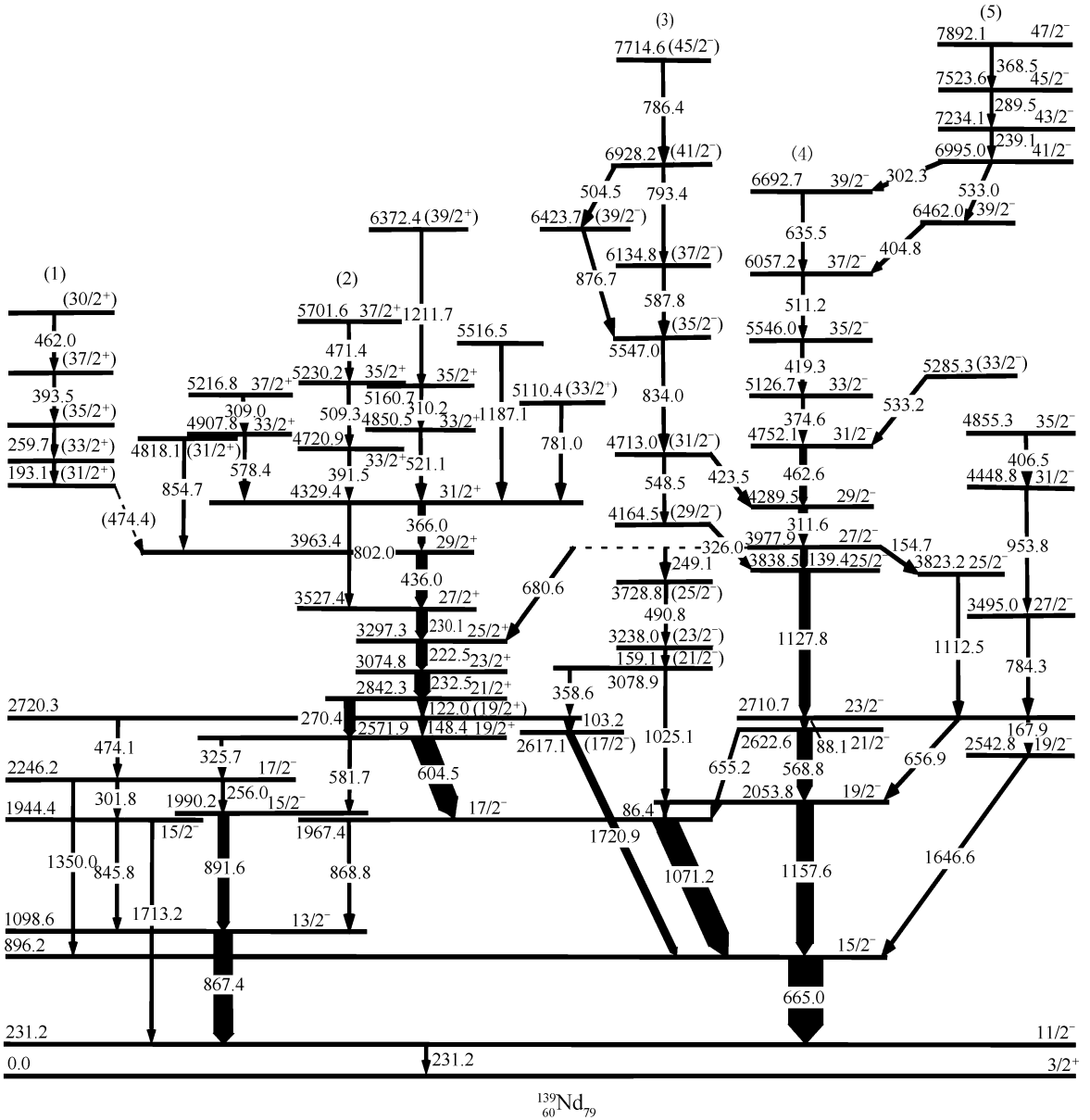


图 3 新建的  $^{139}\text{Nd}$  能级纲图

在带(1)中其带内的  $\gamma$  跃迁 139.1, 259.7, 393.5 和 462.0 keV 之间具有很强的符合关系, 然而与带外  $\gamma$  跃迁的符合较弱, 且其退激发的连接跃迁尚不能确定。我们推测带(1)的带头能级可能为一长寿命的同质异能态, 所以其退激  $\gamma$  跃迁很弱, 致使观测起来较为困难。带(4)为基于 3 838.5 keV 能级的负宇称带, 此带在  $31/2^-$  能级以下, 其能级和跃迁与文献[16]中报道的相同。然而在此能级以上, 则与文献[16]中的不同, 根据所观测的跃迁强度与符合关系, 我们重新建立了此带新的结构图, 使得带(4)的结构特性更有规律, 也更合理。而对于在  $^{139}\text{Nd}$  中新识别的 3 个高自旋集体带(1), (4)和(5), 其带内都具有强的 M1 跃迁。总之, 对于  $^{139}\text{Nd}$  核, 与文献[16]相比, 我们新识别了 21 个能级与 23 条  $\gamma$  跃迁, 最高自旋态扩展到  $47/2\hbar$ 。

## 4 结果讨论

从图 1—图 3 可以看出,  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  3 个  $N=79$  的奇  $A$  核的能级结构非常复杂, 要指定所有能级的组态起源是困难的。然而, 根据对此区内核结构特性的系统学比较以及一些理论模型的计算, 可以给出一些重要的结构特性。

早期的文献已对此区的  $N=79$  的奇  $A$  核的较低自旋态部分的结构进行了不少研究, 如对于  $^{137}\text{Ce}$ [10-12],  $^{149}\text{Sm}$ [18] 和  $^{143}\text{Gd}$ [18] 的研究, 对进一步讨论所研究的这 3 个核的特性很有启发。这 3 个核的较低自旋态的负宇称态部分的一些主要能级, 起源于一个  $h_{11/2}$  的单中子空穴与相邻偶核芯的耦合, 最低的  $11/2^-$  能级的组态为  $\nu h_{11/2}^- \times 0^+$ , 最低的  $15/2^-$  和  $13/2^-$  能级则起源于  $\nu h_{11/2}^- \times 2^+$  的两个多重态, 而  $13/2^-$  能级在  $^{135}\text{Ba}$  中尚未观测到。 $^{135}\text{Ba}$  的能量为 2 002.2 keV 的  $19/2^-$  能级,  $^{137}\text{Ce}$  的能量为 2 039.6 keV 的  $19/2^-$  能级以及  $^{139}\text{Nd}$  的能量为 1 967.4 keV 的  $17/2^-$  能级和能量为 2 053.8 keV 的  $19/2^-$  能级则起源于  $\nu h_{11/2}^- \times 4^+$  的多重态, 而在  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  中一些自旋态较高的能级, 比如  $^{137}\text{Ce}$  中能量为 2 489.6 keV 的  $21/2^-$  能级,  $^{139}\text{Nd}$  中 1 990.2 keV 的  $15/2^-$  能级, 2 246.2 keV 的  $17/2^-$  能级, 2 542.8 keV 的  $19/2^-$  能级, 2 622.6 keV 的  $21/2^-$  能级, 可能起源于  $\nu h_{11/2}^- \times 6^+$  态。

从此区内各偶  $Z$  核的同位素链中的低激发能级中可以提取出原子核形状变化的重要信息[12, 18], 即在一个同位素链中当原子核的中子数发生变化时, 核的基态从具有长椭边形状( $\gamma < 30^\circ$ )到扁椭边形状( $\gamma > 30^\circ$ )的转变。以往对此区内某些同位素链的研究表明, 这样的形状转变应发生在  $N=77-79$  之间, 即当中子数  $N \leq 77$  时, 核具有长椭边的形状, 而当中子数  $N \geq 79$  时, 核具有扁椭边的形状。根据以往粒子-转子模型的计算, 能级纲图中  $\nu h_{11/2}^- \times 2^+$  多重态中的  $13/2^-$  与  $15/2^-$  两个能级的顺序是决定该核具有长椭边的形状还是扁椭边的形状的重要标志: 若  $15/2^-$  能级能量高于  $13/2^-$  能级, 则该核具有长椭边的形状; 若  $15/2^-$  能级能量低于  $13/2^-$  能级, 则该核具有扁椭边的形状。现有的实验结果表明, 在 Ba, Ce 和 Nd 同位素链中, 所有  $N \leq 77$  的奇  $A$  核都具有长椭边的形状。而我们的研究表明,  $N=79$  的  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  核中,  $15/2^-$  能级能量低于  $13/2^-$  能级, 表明这两个核应具有扁椭边的形状, 即  $\gamma > 30^\circ$ 。对于  $^{135}\text{Ba}$  核, 虽然本实验没有识别出  $13/2^-$  能级, 但根据系统学原理与相应的模型计算, 也可以对其形状作出预测。为了更进一步理解其结构特性, 我们用具有三轴形变的粒子-转子模型[19-21]对这 3 个核的低自旋态结构分别进行了计算, 将计算所得的能级与实验能级进行比较(图 4), 以最佳符合结果而提取出有关核结构的参量, 特别是形变参量  $\gamma$  值。最后所提取的  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  3 个核的参量  $\epsilon_2$  和  $\epsilon_4$  很接近, 分别为  $\epsilon_2 \approx 0.1$  和  $\epsilon_4 \approx 0$ , 而  $\gamma$  值分别为  $33.6^\circ$ ,  $30.8^\circ$  和  $31.6^\circ$ , 而  $\chi$  值分别为 0.73, 0.15 和 0.76。为了进一步了解其形变特性, 在计算中固定其它参量, 改变  $\gamma$  值, 观测计算所得能级的变化。对于  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  计算所得结果如图 5 所示。可以看出,  $13/2^-$  和  $15/2^-$  的能级顺序分别在  $\gamma \approx 27^\circ$  和  $29^\circ$  的地方发生反转, 而在  $\gamma \approx 30.8^\circ$  和  $31.6^\circ$  时算得的能级与实验符合得最好。以上的计算表明,  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  在低自旋态确实具有  $\gamma > 30^\circ$  的倾向于扁椭形变的三轴形状, 在这 3 个同位素链中长椭形状到扁椭形状的转变确实发生在中子数  $N=77-79$  之间。

下面, 讨论较高自旋态下的正宇称态能级的组态特性。根据与相邻同中异位素  $^{141}\text{Sm}$  和  $^{143}\text{Gd}$  的组态特性[18]的系统学比较, 可以对一些能级的组态进行分析指定, 结果如图 6 所示。图中也画出以上

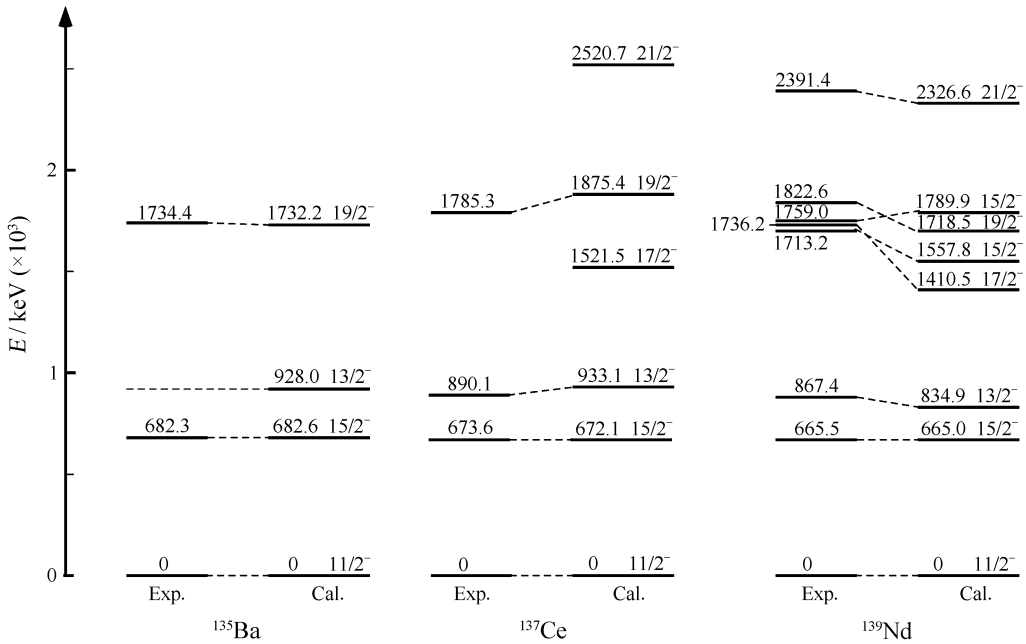


图 4 用粒子-转子模型算得的  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  一些  $\nu h_{11/2}^-$  成员的能级与实验比较  
取  $11/2^-$  能级的能量为零。

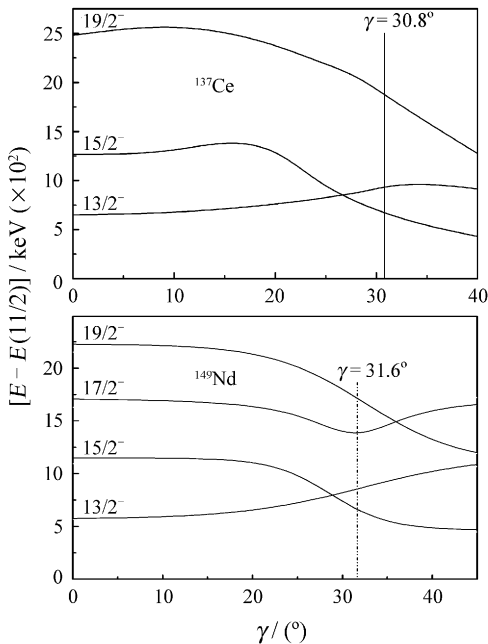


图 5 用粒子-转子模型算得的  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  核中一些能级  
随  $\gamma$  自由度的变化  
取  $11/2^-$  能级的能量为零。

所讨论的较低自旋部分的一些负宇称态能级。从图 6 可以看出, 在  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  中的  $19/2^+$  能级以及在这 3 个核中的  $21/2^+$  能级可能起源于  $\nu h_{11/2}^- s_{1/2}^-$  组态; 3 个核中的  $23/2^+$  和  $25/2^+$  能级可能起源于

$\nu h_{11/2}^- \pi h_{1/2}^- d_{5/2}^-$  组态;  $27/2^+$  能级可能起源于  $\nu h_{11/2}^- \pi h_{1/2}^- g_{7/2}^-$  组态; 而  $29/2^+$  与  $31/2^+$  能级可能起源于  $\nu h_{11/2}^- \pi h_{1/2}^- g_{7/2}^- \times 2^+$  组态。其它的能级可能起源于更多的粒子组态, 这需要进一步研究。从图 6 还可以看出, 在  $N=79$  的同中异位素核中, 对于每一个具有特定组态的能级, 随质子数的增加, 其能级的能量基本呈现减小的趋势, 这是因为随质子数  $Z$  的增大, 即  $Z$  逐渐远离  $Z=50$  的满壳层, 核的集体性逐步增强, 单粒子性减弱所致, 这是符合核的系统学变化规律的。分析在  $^{137}\text{Ce}$ (图 2) 和  $^{139}\text{Nd}$ (图 3) 中新观测到的集体带结构, 可以看出,  $^{137}\text{Ce}$  中的带 (1) 以及  $^{139}\text{Nd}$  中的带 (1), (4) 和 (5) 具有非常类似的特性: 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征。图 7 给出了在  $^{137}\text{Ce}$  中的带 (1),  $^{139}\text{Nd}$  中的带 (1), (4) 和 (5) 以及在  $^{138}\text{Ce}$ [22],  $^{135}\text{La}$ [23] 和  $^{136}\text{La}$ [2] 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  $\hbar\omega$  的变化图。可以看到, 它们都具有类似的特点: 转动惯量随转动频率的增加而减少, 而一般的长椭圆形变带正好相反。所以  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  中的这 4 个带正是属于扁椭圆形变带。

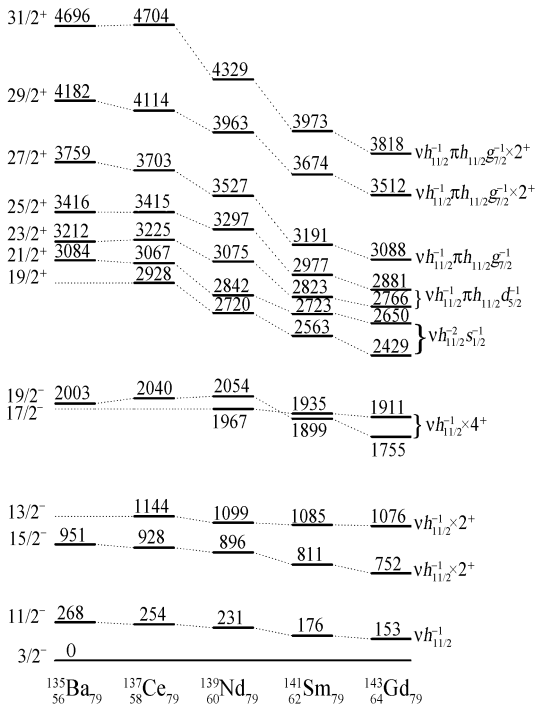


图 6  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  核中一些能级的组态指定与相邻同中异位素  $^{141}\text{Sm}$  和  $^{143}\text{Gd}$  的比较  
图中能级的能量单位为 keV。

的方向变化, 形成扁椭圆形变带。要精确确定这些扁椭圆形变带的组态特性, 需要做更多的工作。

同时, 从  $^{139}\text{Nd}$  中的带(4)可以看到, 在自旋态  $31/2^-$  以上, 能级间距突然减小, 预示着此处发生了集体回弯(带交叉)现象。图 8 给出了此集体带的顺排角动量  $I_x$  随转动频率  $\hbar\omega$  的变化。确实, 在  $\hbar\omega \approx 0.4 \text{ MeV}$  的地方发生了集体回弯现象。分析此集体回弯可能是由一对质子的顺排引起的, 因为如上所述, 此带为扁椭圆形变带, 是由一对中子的顺排所致, 所以中子顺排已先发生, 其后发生质子顺排从而引起此带的集体回弯现象, 但对于其机制的深入理解仍需要进一步研究。

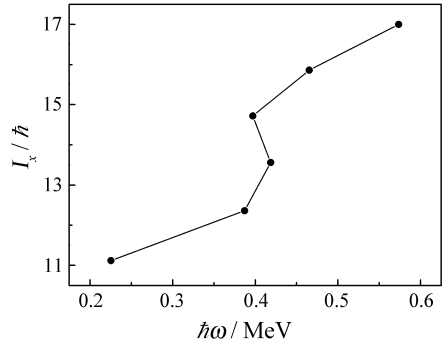


图 8  $^{139}\text{Nd}$  核中带(4)的顺排角动量  $I_x$  随转动频率  $\hbar\omega$  的变化图

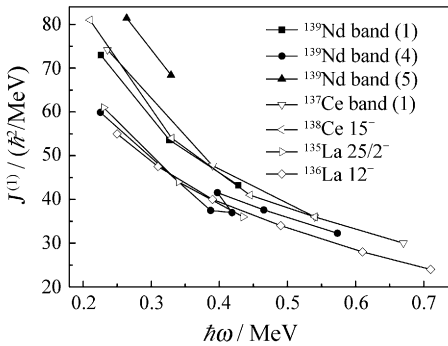


图 7  $^{137}\text{Ce}$  中的带(1),  $^{139}\text{Nd}$  中的带(1), (4), (5) 以及  $^{138}\text{Ce}$ ,  $^{135}\text{La}$ ,  $^{136}\text{La}$  中某些扁椭圆形变带的第一类转动惯量  $J^{(1)}$  随转动频率  $\hbar\omega$  的变化

这种高自旋态下的扁椭圆形变是由于形状驱动效应引起的。根据与相邻核中发现的扁椭圆形变的系统学分析, 在  $^{137}\text{Ce}$  中的基于  $33/2^-$  能级的带(1)可能起源于 5 个准粒子组态:  $\nu s_{1/2} [\nu h_{11/2}]^2 \pi h_{11/2} \pi g_{7/2}$ ; 而在  $^{139}\text{Nd}$  中基于  $31/2^+$  能级的带(1)与基于  $25/2^-$  能级的带(4)可能起源于 3 个准粒子组态:  $\nu d_{3/2} [\nu h_{11/2}]^2$  与  $\pi h_{11/2} [h_{11/2}]^2$ , 基于  $41/2^-$  的带(5)可能起源于 5 个准粒子组态:  $\pi g_{7/2} h_{11/2} \nu d_{3/2} [h_{11/2}]^2$ 。根据推转壳模型的计算, 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  $\gamma \approx -60^\circ$

在对  $^{135}\text{Ba}$  的研究中没有观测到扁椭圆形变带, 这是由于如前所述, 受到现有的弹靶组合的限制, 找不到更重的人射束以高的反应截面布居  $^{135}\text{Ba}$  的更高自旋态, 期待以后放射性核束的发展可以进一步对其结构进行研究。

### 5 结束语

对本实验组近年来在  $A=135$  缺中子核区的  $N=79$  的同中异位素  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ce}$  和  $^{139}\text{Nd}$  的高自旋态结构特性的研究进行了介绍。研究工作是在中国原子能科学研究所的 HI-13 串列加速器上通过重离子核反应与在束  $\gamma$  的实验技术进行的。实验结果扩展了这 3 个核的高自旋态能级纲图。对这 3 个核的低自旋态结构组态特性进行了讨论, 并用粒子-转子模型对其低自旋态的结构进行了计算, 表明这 3 个核的基态形变  $\gamma$  值稍大于  $30^\circ$ , 为偏向于扁椭的三轴形变, 从而可得出 Ba, Ce 和 Nd 3 个同位素链在低自旋态下的形状由长扁边到扁扁边的转变都发

生在中子数  $N=77-79$  之间。对于中等自旋态下一些能级的组态进行了指定并做了系统学比较。在高自旋态下, 在  $^{137}\text{Ce}$  中发现 1 条, 而在  $^{139}\text{Nd}$  中则发现 3 条  $\gamma \approx -60^\circ$  的扁椭圆形变带, 并在  $^{139}\text{Nd}$  中的一条扁椭圆形变带中发现了集体回弯现象, 对这些扁椭圆形变带的起源及结构特性进行了讨论。

**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 (References):

- [1] Che X L, Zhu S J, Li M L, *et al.* Eur Phys J, 2006, **A30**: 347.
- [2] Zhu S J, Xiao S D, Che X L, *et al.* Eur Phys J, 2005, **A24**: 199.
- [3] Zhu S J, Zhu L Y, Li M, *et al.* Phys Rev, 2000, **C62**: 044 310.
- [4] Li M L, Zhu S J, Che X L, *et al.* Phys Rev, 2007, **C75**: 034 304.
- [5] Paul E S, Beausang C W, Fossan D B, *et al.* Phys Rev Lett, 1987, **58**: 984.
- [6] Paul E S, Fossan D B, Liang Y, *et al.* Phys Rev, 1989, **C40**: 1 255.
- [7] Zhu Shengjiang, Gan Cuiyun, Zhu Lingyan, *et al.* High Energy Phys and Nucl Phys, 2005, **29**(2): 130(in Chinese). (朱胜江, 甘翠云, 朱凌云等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(2): 130.)
- [8] Dragulescu E, Ivascu M. Rev Roum Phys, 1987, **32**: 743.
- [9] Sergeenkov Yu V, Singh B. Nucl Data Sheets, 1998, **84**: 115.
- [10] Ludziejewski J, Arnold H. Z Phys, 1997, **A281**: 287.
- [11] Müllner-Veggian M, Gono Y, Lieder R M, *et al.* Nucl Phys, 1978, **A304**: 1.
- [12] Kortelahti M, Komppa T, Piiparinen M, *et al.* Phys Scr, 1983, **27**: 166.
- [13] Gizon J, Gizon A, Diamond R M, *et al.* J Phys, 1978, **G4**: L171.
- [14] Ludziejewski J, Arnold H, Z Phys, 1977, **A281**: 287.
- [15] Muller-Veggian M, Beuscher H. Nucl Phys, 1980, **A344**: 89.
- [16] Kumar S, Palit R, Jain H C, *et al.* Phys Rev, 2007, **C76**: 014 306.
- [17] Radford D C. Nucl Instr and Meth, 1995, **A361**: 297.
- [18] Lach M, Kleinheinz P, Blomqvist J, *et al.* Z Phys, 1993, **A345**: 427.
- [19] Xing Zheng, Chen Xingqu, Xu Shuwei. High Energy Phys and Nucl Phys, 1996, **20**: 85 (in Chinese). (邢正, 陈星渠, 徐树威. 高能物理与核物理, 1996, **20**(1): 85.)
- [20] Zhu S J, Gan C Y, Hamilton J H, *et al.* Chin Phys Lett, 1998, **15**: 793.
- [21] Sakhaee M, Zhu S J, Hamilton J H, *et al.* Phys Rev, 1999, **C60**: 067 303.
- [22] Zhu S J, Li M, Y Zhu L, *et al.* Chin Phys Lett, 1999, **16**: 635.
- [23] Ma R, Paul E S, Fossan D B, *et al.* Phys Rev, 1990, **C41**: 2 624.

## Research on High Spin Structures of $N=79$ Isotones in $A=135$ Nuclear Region\*

ZHU Sheng-jiang<sup>1, 1)</sup>, XU Qiang<sup>1</sup>, CHE Xing-lai<sup>1</sup>, ZHU Ling-yan<sup>1</sup>, CHEN Yong-jing<sup>1, 2</sup>,  
DING Huai-bo<sup>1</sup>, WANG Jian-guo<sup>1</sup>, ZHU Li-hua<sup>2</sup>, WEN Shu-xian<sup>2</sup>, WU Xiao-guang<sup>2</sup>

(1 *Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

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

**Abstract:** The progress of research on the high spin states at  $N=79$  isotopes  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ce}$  and  $^{139}\text{Nd}$  in  $A=135$  neutron-deficient region by the research group of Tsinghua University has been reviewed. The experiments were carried out by using in-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy technology and heavy ion nuclear reactions

\* **Received date:** 8 Oct. 2007; **Revised date:** 7 Dec. 2007

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10375032, 10775078); Major State Basic Research Development Program (2007CB815005)

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



$^{130}\text{Te}(^9\text{Be}, 4\text{n})$ ,  $^{124}\text{Sn}(^{18}\text{O}, 5\text{n})$  and  $^{128}\text{Te}(^{16}\text{O}, 5\text{n})$  at China Institute of Atomic Energy (CIAE). The high spin level schemes of these nuclei have been expanded. The results indicate that the lower spin states of these nuclei originated from  $\nu h_{11/2}^-$  hole state coupling with the neighboring even-even nucleus cores. All the deformation parameters  $\gamma$  values of these three isotones are larger than  $30^\circ$ , which indicates that they have triaxial deformation with oblate side. The prolate-oblate transition in Ba, Ce and Nd isotopic chains indeed happens between  $N=77$  and  $N=79$ . Through systematical comparison with the neighboring isotones, the configurations for some middle spin state levels have been assigned. At the high spin states, one oblate band in  $^{137}\text{Ce}$  and three ones in  $^{139}\text{Nd}$  with  $\gamma \approx -60^\circ$  were discovered. The origination and structural character of these oblate bands have been discussed.

**Key words:** nuclear structure; high spin state; shape transition; oblate deformation