

丰中子核区奇 A 核八极形变及 $A = 130$ 区一些缺中子核高自旋态研究*

朱胜江

(清华大学物理系 北京 100084)

摘要 对近几年来清华大学物理系核物理研究组原子核高自旋态实验研究的一些新进展进行了介绍. 内容包括两个部分: 第一部分介绍通过国际合作, 利用测量裂变瞬发 γ 谱方法对 $A = 140$ 丰中子核区的奇 A 核 $^{143,145}\text{Ba}$, $^{145,147}\text{La}$ 等的八极形变研究的进展. 第二部分简述对 $A = 130$ 缺中子核区的 $^{134,137,138}\text{Ce}$ 及 ^{122}Ba 等核高自旋态研究的进展, 包括形状驱动、形状共存、八极关联、集体回弯等效应.

关键词 高自旋态 八极形变 丰中子核 形状共存

1 引言

原子核的八极形变反映在内禀坐标系下的反射不对称性, 它包含深刻的物理内涵与丰富的核结构特性. 理论上预言, 在围绕 $Z = 56, N = 88$ 的丰中子核区存在一个八极形变岛^[1-3], 然而, 在目前实验条件下尚不能用通常的重离子熔合-蒸发反应来布居这个核区核的高自旋态, 一种有效的方法是测量由重核裂变所产生的瞬发 γ 谱^[4-7]. 通过这种方法, 近年来在此区内对八极形变的研究已取得重要进展. 在偶-偶核中, 有 $^{140,142,144,146,148}\text{Ba}$ ^[8-11], $^{144,146}\text{Ce}$ ^[12,13] 等. 相比偶-偶核而言, 对奇 A 核的研究要复杂得多. 在此区内发现第一个奇 A 核八极形变的是我们与国外合作对于 ^{143}Ba 的报道^[14,9], 那时仅观测到 $s = -i$ 的带结构. 在其后的研究中, 对此核的结构进行了扩展, 发现了 $s = +i$ 的带结构^[15,8]. 其后, 对 ^{139}Xe 与 ^{141}Ba 两个同中异位素的八极形变作了报道^[16,17], 发现了其中的“准 $\nu f_{7/2}$ ”八极形变带结构. 对于奇 Z $^{145,147}\text{La}$ 核, 在我们的本研究即将完成时^[18], 欧洲的实验组报道了这两个核的八极形变^[19], 对于 ^{145}La 并未观测到 $s = -i$ 带结构. 其后, 我们报道了这两个核的基于 $\pi h_{11/2}$ 轨道耦合的 $s = -i$ 带^[20]. 在接着的深入的研究中, 扩展了 $^{145,147}\text{La}$ 的集体带, 最新的结果见文献^[21,22]. 与此同时, 对 $^{143,145}\text{Ba}$ 的研究也取得新的进展, 除扩展了 ^{143}Ba 的 $s = \pm i$ 八极形变带外^[23], 第一次观测到 ^{145}Ba

*国家自然科学基金(19975028), 核工业科学基金(Y7197AY509)和国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)资助

的八极形变带^[23,24].理论上预言,¹⁴⁵Ba 应为最具八极形变的核,长期以来人们通过 β 衰变的研 究^[25]以及裂变瞬发 γ 谱的多次研究而未获结果^[14,9,11].

另一方面,近几年对于 A = 130 缺中子核区的高自旋态研究也取得了进展.这个区的核有相当一部分是属于 γ 软形变核,其质子费米面位于 $h_{11/2}$ 子壳层的下部,而中子费米面则位于 $h_{11/2}$ 子壳层的上部.在高自旋态下,不同质子或中子的激发将引起不同的形变,在某些核中可以观测到形状共存效应^[26].选择中子数离满壳层 N = 82 较近的^{134,137,138}Ce 进行研究.这几个核早期国外虽有一些高自旋态研究报道^[27-31],但总体来说研究得很不深入.特别是^{137,138}Ce,以往的研究未发现任何集体转动带.目前对¹³⁷Ce,¹³⁸Ce 的研究工作已完成,发表或即将发表的论文见参考文献[32-35].另外,还选择非常缺中子的核¹²²Ba 进行研究,此项研究工作也即将完成.

在下文中,将介绍与讨论对这两个核区的这些核高自旋态的研究结果,及在 A = 140 区丰中子奇 A 核^{143,145}Ba,^{145,147}La 核的八极形变特性,在 A = 130 缺中子核区的^{134,137,138}Ce 及¹²²Ba 核中的扁椭圆形变、形状共存、及八极关联、集体回弯等效应.

2 实验及结果讨论

2.1 A = 140 丰中子核区奇 A 核的八极形变研究

最近的一轮实验是在美国洛伦兹伯克利国家实验室(LBNL)进行的.用 72 个反康 Ge 探测器组成的中期 Gammasphere 探测装置测量由²⁵²Cf 裂变产生的瞬发 γ 谱.实验是由众多的合作组联合进行的,记录三重以上的 γ 符合事件,建立了三维矩阵,得到约 9.8×10^{10} 个折合成两重符合的事件数.数据分析主要在清华大学进行的,实验技术及数据处理方法参见文献[7-9,17,18],主要物理结果如下:

¹⁴³Ba,¹⁴⁵Ba 核:

这两个奇 N 核的最新能级图已发表见参考文献[23],图 1 画出了¹⁴³Ba 的能级图.我们的结果证实所有以前报的能级与跃迁外,发现了许多新的能级与跃迁.

对于¹⁴³Ba 核,最高自旋态观

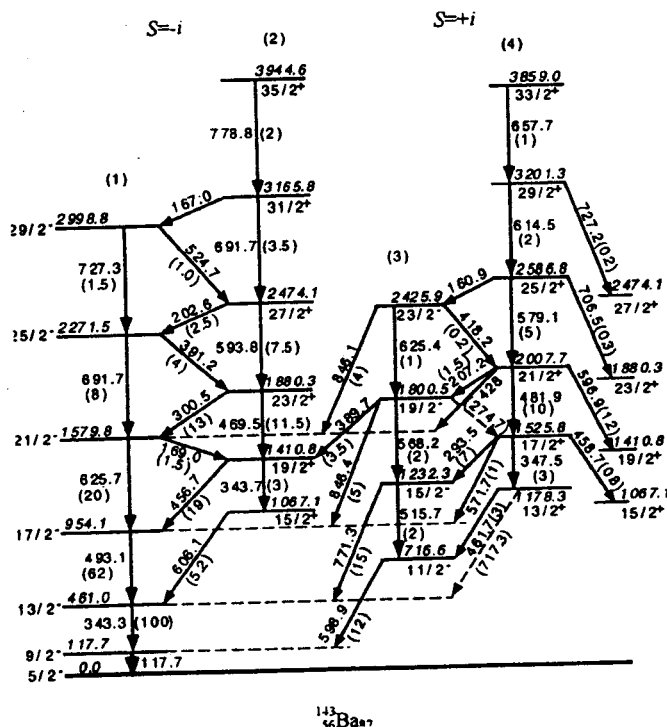


图 1 ¹⁴³Ba 能级图

测到 $35/2\hbar$. 观测到两套典型的具有 simplex 量子数 $s = +i$ 与 $s = -i$ 的八极形变带结构, 每一套八极形变带由 $\Delta I = 2$ 的正宇称带与负宇称带组成, 两带之间以强的 $\Delta I = 1$ 的 E1 跃迁相联, 并观测到众多的从 $s = +i$ 到 $s = -i$ 能级之间的 $\Delta I = 1$ 的 M1 跃迁. 这种集体带结构完全验证了理论上的预言, 展现了反射不对称八极形变带结构的完备性与完美性. 这是在此区内首次观测到的这样完美的八极形变带结构.

对于 ^{145}Ba 核, 经过复杂的数据分析, 首次发现 $s = +i$ 与 $s = -i$ 的八极形变带结构. 这种八极形变集体带其内部结构与相邻核类似, 然而整个结构特点与 ^{143}Ba 不同. $s = -i$ 的跃迁强度较弱而 $s = +i$ 中的正宇称带(基于 $13/2$ 能级)的跃迁强度很强, 分析表明, ^{145}Ba 中 $s = +i$ 的正宇称带(文献[23]中的带(4))可能起源于 $\nu i_{13/2}$ 中子轨道的耦合, 耦合的结果使带(4)变成晕带, 布居很强, 而使非转晕能级的 $s = -i$ 带布居变得很弱, 实验上观测起来很困难. 而对于 ^{145}Ba 中 $s = +i$ 结构中的带(5)具有引人注目的特点: 其运动学转动惯量 J_1 与动力学转动惯量 J_2 都很大(见图 2), 接近于刚体值, 且随转动频率的变化基本不变. 这种特性表明它可能属于核内部对力消失(pair-free)的转动带, 可能是一种八极超形变(SD)或高形变(HD)带. 在如此低的自旋下观测到具有这种特性的集体带在此区内尚是首次, 它或许给理论工作提出新的课题.

在每个八极形变带的正负宇称带间都测量出 $B(E1)/B(E2)$ 值^[23], 其平均值如下: 在 ^{143}Ba 中: 对 $s = -i$ 结构为 $1.03 \times 10^{-6} \text{ fm}^{-2}$, 对 $s = +i$ 结构为 $0.29 \times 10^{-6} \text{ fm}^{-2}$; 在 ^{145}Ba 中: 对 $s = -i$ 结构为 $0.61 \times 10^{-6} \text{ fm}^{-2}$, 对 $s = +i$ 结构为 $0.40 \times 10^{-6} \text{ fm}^{-2}$, 说明在这两个核中, $s = -i$ 八极关联比 $s = +i$ 强.

^{145}La , ^{147}La 核:

这两个核的最新能级图见文献[21, 22]. 在 ^{145}La 中, 观测到一对强的 $s = \pm i$ 八极形变集体带结构, 而在 ^{147}La 中仅观测到 $s = +i$ 带结构. $B(E1)/B(E2)$ 的实验测量值

说明, 在自旋 $I \approx 15-16\hbar$ 左右出现峰值, 证明此时八极关联最强. 这两个核的 $s = +i$ 带的负宇称带的带头都是建立在 $11/2^-$ 能级, 它可能起源于 $h_{11/2}$ 单质子轨道的耦合. 总体来讲, $^{145,147}\text{La}$ 的 $B(E1)/B(E2)$ 值比相邻同中异位素 ^{144}Ba , ^{146}Ba 要大, 说明单质子的耦合作用强化了八极关联效应; 另一方面, 在这个带中, 围绕 $\hbar\omega \approx 0.25-0.30 \text{ MeV}$ 之间发生带交叉. 用推转壳模型计算表明, 它是由一对 $i_{13/2}$ 中子顺排所致.

从总体能级结构上看, ^{145}Ba 与 ^{145}La 具有类似的特点: 在低自旋态下, 表现为强耦合的四极形变集体带, 表明此时的核呈对称转子形状. 随着自旋的增加, 反射不对称的八极形变加强, 四极形变减弱, 说明在这两个核中, 随自旋态的变化, 对称的四极形变形状与反射不对称的八极形变形状之间的共存与竞争.

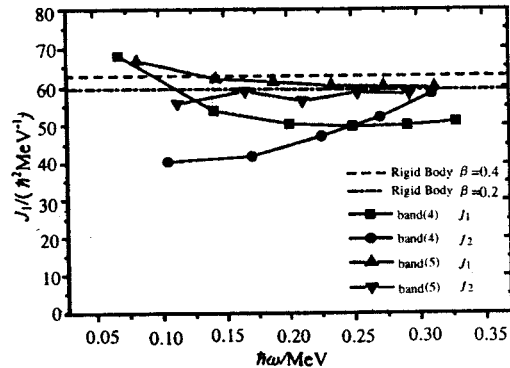
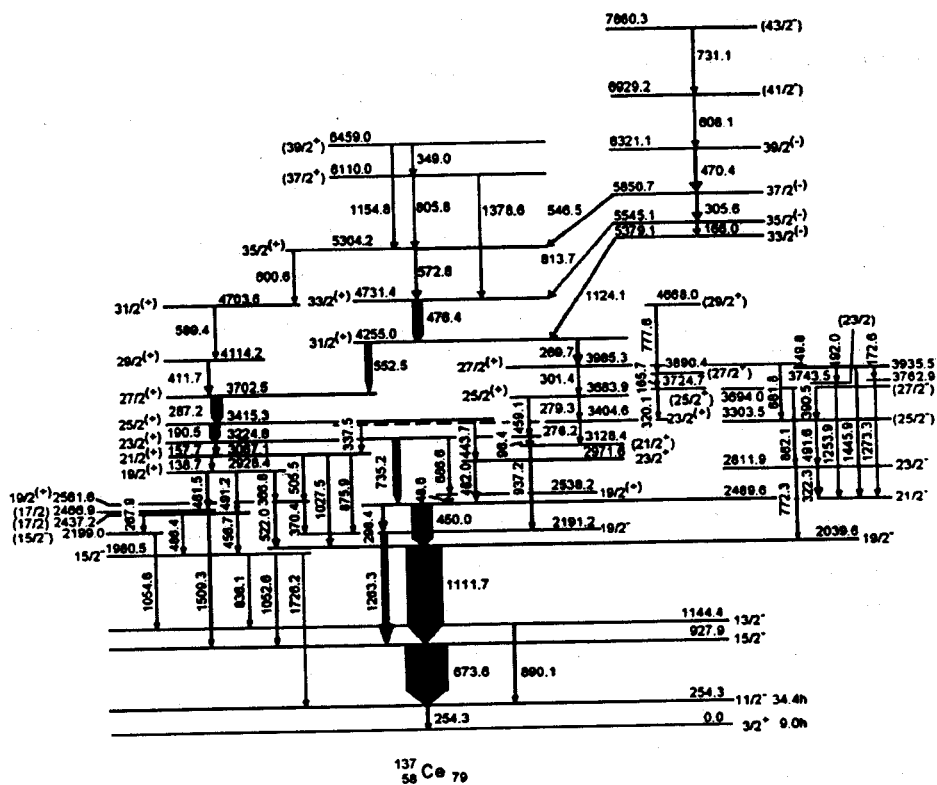


图 2 ^{145}Ba 的 $s = +i$ 结构中两个带的转动惯量随转动频率的变化^[23]

2.2 对 A=130 缺中子核区高自旋态研究

在这个核区对 $^{134,137,138}\text{Ce}$ 及 ^{122}Ba 核进行了研究.实验是在中国原子能科学院H-13串列加速器上进行的,用8—10个反康高纯Ge探测器测量由重离子核反应产生的高自旋态核的退激 γ 谱,测量包括激发函数、 γ - γ 符合、DCO比率等.针对不同的实验选取不同的束靶组合及束流能量.



转动惯量的特点为:第一类转动惯量 J_1 随转动频率 $\hbar\omega$ 的增加而很快下降,第二类转动惯量 J_2 则比普通长椭圆形变带小得多.通过与此区内相邻核的系统性比较,认定以上 3 个集体带为 $\gamma = -60^\circ$ 的扁椭圆形变带.说明在 $N = 79, 80$ 的 Ce 核中具有强的 $h_{11/2}$ 中子对的形状驱动效应.进一步的分析表明,这些集体带都属于多准粒子带: ^{137}Ce 中的集体带为 5 个准粒子带,其带头的组态为 $\nu s_{1/2} \otimes [\nu h_{11/2}]^2 \pi g_{7/2} \otimes h_{11/2}$, 而 ^{138}Ce 中的两个集体带则属于 4 个准粒子带,其带头的组态分别为 $\pi g_{7/2} \otimes \pi h_{11/2} \otimes [\nu h_{11/2}]^2$ 及 $\pi g_{7/2} \otimes \pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2} \otimes \nu d_{3/2}$.

这种集体带是否具有磁转动带的特征,是需要进一步研究的问题.

对于 ^{137}Ce 复杂的单粒子能级,用粒子—转子模型计算了在低自旋态下的能级结构.结果指出, ^{137}Ce 基态具有 30.8° 的 γ 形变值,且在此同位素链中,从长椭到扁椭的跃迁发生在中子数 $N = 77$ 与 79 之间,并从系统性比较中,也定出了某些高自旋态单粒子能级的可能组态.

^{134}Ce 核:

对此核初步研究结果表明, ^{134}Ce 核表现出复杂的能级结构.除了 γ 振动带外,在高自旋态下表现为在 $I = 10^+$ 态的长椭圆形变 ($\gamma = -120^\circ$) 与扁椭圆形变 ($\gamma = -60^\circ$) 的“形状共存”特性.而在较低自旋态下,发现了两个负宇称准粒子带,可能分别属于长椭与扁椭的集体带.对此核的研究仍在进行中.

^{122}Ba 核:

^{122}Ba 核为非常缺中子核,其反应截面较低.此次扩展了晕带结构,由原来的 $12^+ [^{36}]$ 扩展到 $20^+ [^{37}]$, 在 $\hbar\omega \approx 0.37$ 的地方观测到回弯.用推转壳模型进行了计算,结果表明,这种回弯是由一对 $h_{11/2}$ 质子的顺排所致,并且观测到一条基于 7^- 能级上的负宇称带及较强的 $B(E1)/B(E2)$ 值,表明了较强的八极关联的存在. IBMF 的计算指出,观测到的 $B(E1)/B(E2)$ 值比振动转动带要大得多,表明这个负宇称带不属于振动转动带结构,它很可能起源于 $\pi h_{11/2} \otimes \pi d_{3/2}$ 的组态混合.此核为在 $Z \approx 56$ 缺中子核区系统研究八极关联效应提供了重要的实验依据.

3 结束语

用裂变瞬发 γ 谱方法对 $A = 140$ 区的 4 个奇 A 核的研究,展现了丰富的核结构信息,为反射不对称核特性的研究提供了新的实验数据及新的物理问题.目前打算继续与国外先进实验室合作,测量更高精度的实验数据,对此区内其它核进行更深入的研究.除了能级结构研究外,也将开展同质异能态的研究,以便能发现更多的有意义的高自旋态结构特性.

对于缺中子核区的高自旋态研究,在国内现有实验条件下,进行一些有特点的实验研究工作,特别是那些预计具有重要特征且目前实验上研究得不充分或未进行过研究的核,将作为研究的重点,使研究工作具有自己的特色,做出高水平的工作.

参考文献(References)

- 1 Nazarewicz W, Olanders P, Ragnarsson I et al. Phys. Rev. Lett., 1984, **52**: 1272
- 2 Nazarewicz W, Olanders P. Nucl. Phys., 1985, **A441**: 420
- 3 Leander G A, Nazarewicz W, Olanders P et al. Phys. Lett., 1985, **B152**:284
- 4 ZHU Sheng-Jiang. Trends in Nucl. Phys., 1992, **9(2)**:8(in Chinese)
(朱胜江.核物理动态,1992,**9(2)**:8)
- 5 ZHU Sheng-Jiang, Lee I Y. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1993, **17**:353(in Chinese)
(朱胜江, Lee I Y. 高能物理与核物理, 1993, **17**:353)
- 6 ZHU S J, ZHAO X, Hamilton J H et al. Revista Mexica de Fissica, 1992,**38**, Suppl. 2:53
- 7 Hamilton J H, Ramayya A V, ZHU S J et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 1995, **35**:635
- 8 ZHU S J, WANG M G, Hamilton J H et al. Chin. Phys. Lett., 1997, **14**:569
- 9 ZHU S J, LU Q H, Hamilton J H et al. Phys Lett., 1995, **B357**:273
- 10 Phillips W R, Ahmad I, Emling H et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**:3257
- 11 Urban W, Jones M A, Durell J L et al. Nucl. Phys., 1997, **A613**: 107
- 12 ZHU Ling-Yan, ZHU Sheng-Jiang, LI Ming et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys.,1998, **22**:885(in Chinese)
(朱凌燕, 朱胜江, 李明等. 高能物理与核物理, 1998, **22**:885)
- 13 Phillips W R, Janssens R V F, Ahmad I et al. Phys. Lett., 1988, **B212**:402
- 14 ZHU S J, WANG M G, Hamilton J H et al. Abs. Symp. on Latest Topic in Nucl. Structure, Beijing. **1993**, 114
- 15 Jones M A, Urban W, Durell J L et al. Nucl. Phys., 1996, **A605**:133
- 16 Benteleb M, Schulz N, Lubkiewicz E et al. Z. Phys., 1994, **A348**:245
- 17 ZHU S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. J. Phys., 1997, **G23**:L77
- 18 WANG Mu-Ge. Research on High Spin States in Neutron-Rich ^{145,147}La Nuclei, Thesis for Master Degree, Tsinghua University, 1996,6 (in Chinese)
(王牧歌. 丰中子核^{145,147}La高自旋态研究, 清华大学硕士学位论文, 1996,6)
- 19 Urban W, Phillips W R, Durell J L et al. Phys. Rev., 1997, **C54**:945
- 20 ZHU S J, WANG M G, Hamilton J H et al. Chin. Phys. Lett., 1999, **16**:169
- 21 ZHU S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. Phys. Rev., 1999, **C59**:1316
- 22 ZHU Sheng-Jiang, WANG Mu-Ge, ZHU Ling-Yan et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, **24(5)**:418(in Chinese)
(朱胜江,王牧歌,朱凌燕等. 高能物理与核物理, 2000,**24(5)**:418)
- 23 ZHU S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. Phys. Rev., 1999, **C60**:51304
- 24 ZHU S J, Sakhaee M, Hamilton J H et al. Chin. Phys. Lett., 1999, **16**:715
- 25 Robertson J D, Faller S H, Walters W B et al. Phys. Rev., 1986, **C34**:1012
- 26 Paul E S, Fossan D B, Liang Y et al. Phys. Rev., 1993, **C40**:861
- 27 Zemel A, Broude C, Dafne E et al. Nucl. Phys., 1982, **A383**: 165
- 28 Müller-Veggian M, Beuscher H, Haennic D R et al. Nucl. Phys., 1984, **A417**: 189
- 29 Müller-Veggian M, Gono Y, Lieder R M et al. Nucl. Phys., 1978, **A317**:1
- 30 Kortelahti M, Komppa T, Püparinen M et al. Phys. Scr., 1983, **27**:166
- 31 Bianco G Lo, Paruzzi P, Schmittgen K P et al. Nucl. Phys., 1987, **A3470**: 266
- 32 ZHU Sheng-Jiang, LI Ming, ZHU Ling-Yan et al. J. Ningxiao Univ. (Nat. Sci. Ed.), 1998,**19**:311 (in Chinese)
(朱胜江, 李明, 朱凌燕等. 宁夏大学学报(自然科学版)1998,**19**:311)
- 33 ZHU S J, LI M, ZHU L Y et al. Chin. Phys. Lett., 1999,**16**:635
- 34 ZHU S J, ZHU L Y, LI M et al, Chin. Phys. Lett., 2000,**17**:480

- 35 ZHU S J, ZHU L Y, LI M et al. Phys. Rev., C(accepted)
36 Conrad J, Reppow R, Grosse E et al. Nucl. Phys., 1974, A234: 157
37 Sakhaee M. Thesis fo Ph.D, Tsinghua University, 2000,6

Research on Octupole Deformation of Neutron-Rich Odd-A Nuclei and High Spin States of Some Neutron-Deficient Nuclei in $A = 130$ Region *

ZHU Sheng-Jiang

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

Abstract Recent progress of research on high spin states in nuclear group of Tsinghua University has been reviewed. There are two parts in the content: research on octupole deformation of neutron-rich odd- A $^{143,145}\text{Ba}$ and $^{145,147}\text{La}$ nuclei by measuring the prompt γ -rays emitted in the spontaneous fission of ^{252}Cf and research on the high spin states of $^{134,137,138}\text{Ce}$ and ^{122}Ba in $A = 130$ neutron-deficient region, which shows the characteristics of shape driving, the shape coexistence, the octupole correlations and the band cross.

Key words high spin states, octupole deformation, neutron-rich nuclei, shape coexistence

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19975028), Science Foundation for Chinese Nuclear Industry (Y7197AY509), and Major State Basic Research Development Program(G2000077400)