

文章编号: 1007-4627(2001)04-0282-03

原子核的三轴超形变*

邢 正, 陈星藻

(兰州大学现代物理系, 甘肃 兰州 730000)

(中国科学院上海原子核研究所, 上海 201800)

摘 要: 利用粒子-转子模型研究三轴超形变核态, 讨论了区别轴对称超形变和三轴超形变可能的实验信息. 为了直接从实验上识别三轴超形变带, 必须同时测量能谱和电磁跃迁几率.

关键词: 原子核结构; 粒子-转子模型; 超形变; 三轴形变

中图分类号: O571.21 **文献标识码:** A

原子核中不同形状的共存是核结构研究的重要课题. 对重稀土区奇 Z 核正常形变 $\pi[660\ 1/2]$ 带已进行了广泛而深入的研究, 然而文献[1-3]对 $^{163, 165, 167}\text{Lu}$ 观测到的一条奇异的 $\pi[660\ 1/2]$ 带, 通过总位能面(TES 或 TRS)的计算, 把它们解释为三轴超形变带. 三轴超形变核的研究引起了广泛关注. 最近在 ^{163}Lu 又发现了一条三轴超形变带, 在 ^{164}Lu 中发现了八条三轴超形变带^[4]. 另一方面, 在 $A \approx 80$ 区也发现了超形变带. 目前实验上认定三轴超形变带的主要依据为: (1)由相邻能级间 γ 跃迁能量推出大的, 且稳定的动力学转动惯量, 从而推出有较大的四极形变, 对 ^{163}Lu 还进行了寿命测量, 用轴对称的液滴模型公式估算了四极形变. (2)通过总位能面的计算, 确认在大的四极形变和大的三轴形变时存在能量极小. (3)用理论模型计算能谱, 通过与实验数据的比较, 验证由位能面计算得到的形变参数的正确性. 这里大的四极形变具有直接的实验证据, 而三轴形变则由总位能面的计算给出. 这是理论值, 即使拟合了能谱, 也未必存在三轴形变, 因为能量是哈密顿量的平均值, 因而对波函数的细微特征并不灵敏, 同一能谱可以用不同方法进行解释, 不能对三轴形变作出肯定的结论. 为了肯定三轴形变, 必须要有多种独立的实验证据, 特别是寻找某些与轴对称形变不相容的实验现象, 具有决定的意义. 为此作为一个例子, 我们用单 j 壳的粒子-转子模型研究了 ^{163}Lu $\pi[660\ 1/2]$ 带, 分别用轴对

称超形变和三轴超形变模型计算能谱(包括其旋称伙伴带)和电磁跃迁几率, 在重现实验能谱的条件下, 比较了两类形变的核态在其它可能观测的物理量上的差异, 这种差异可用来识别三轴超形变核态.

为了使研究中应用的简化的粒子-转子模型^[5]计算结果具有说服力, 首先我们用多 j 壳的粒子-转子模型研究组态混合对三轴超形变带的影响^[6]. 假设奇核子填充费米面附近不同的 Nilsson 轨道, 不同 j 壳之间的组态混合是通过单粒子 Nilsson 态自动进行. 计算中只有形变参数是自由参数, 它的选取使能谱和跃迁几率尽可能的符合实验值. 图 1 给出了不同质子轨道对 ^{167}Lu $\pi[660\ 1/2]$ 带的影响, 其中对 $\pi[660\ 1/2]$ 带影响最大的轨道为第 22 条和第 23 条轨道, 且随自旋值的增加影响加大, 它们的主要成分分别为 $[651\ 3/2]$ 和 $[642\ 5/2]$ 态. 对 ^{163}Lu 和 ^{165}Lu 的结果完全类似, 因此对 $\pi[660\ 1/2]$ 带组态混合的影响主要来自同一子壳的 $[651\ 3/2]$ 和 $[642\ 5/2]$ 态, 因此对建立在高 j 侵入态上的超形变转动带可以用单 j 壳的粒子-转子模型来描述.

由于 ^{163}Lu $\pi[660\ 1/2]$ 带奇质子填充 $i_{13/2}$ 子壳, 它与相邻子壳具有不同宇称, 而相同宇称不同子壳之间的混合是很小的, 因此采用单 j 壳的三轴粒子-转子模型是一个好的近似, 假定三轴形变势场中运动的奇核子与一转动核心相耦合, 粒子-转子哈密顿量可表为转动部分与内禀部分之和:

收稿日期: 2001-09-29; 修改日期: 2001-10-10

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19977023)

作者简介: 邢 正(1938-), 男(汉族), 江苏南通人, 教授, 博士生导师, 从事原子核物理理论研究.

$$H = H_{rot} + H_{int} \quad (1)$$

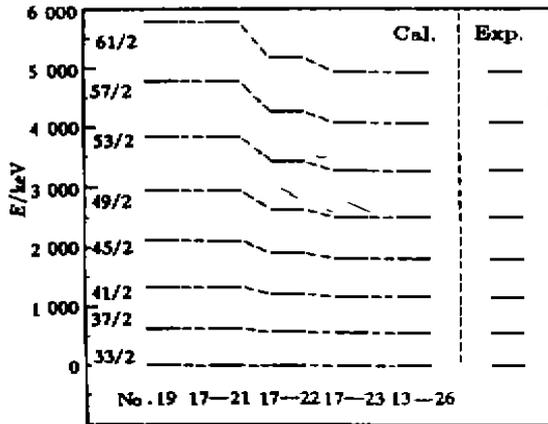


图 1 $^{167}\text{Lu} \pi[660 1/2]$ 带能量理论值和实验值的比较
使用参数: $\epsilon_2=0.360$, $\epsilon_4=0.035$, $\gamma=15^\circ$, No. 19.17-21, ...
表示理论计算分别考虑第 19 条、第 17-21 条……轨道和核心耦合.

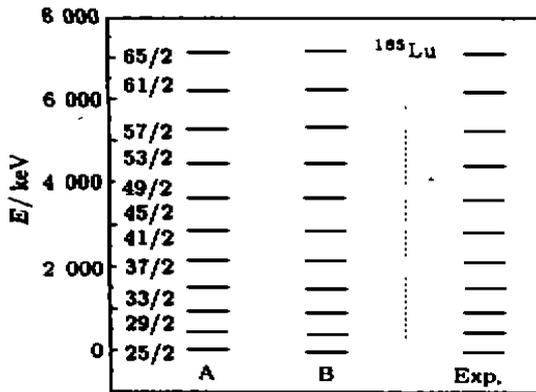


图 2 $^{167}\text{Lu} \pi[660 1/2]$ ($\alpha=1/2$) 带的 γ 跃迁能量理论值和实验值比较
A 列: $\gamma=15^\circ$, B 列: $\gamma=0^\circ$.

对奇 A 核, 建立在任一单粒子组态上的转动带带有两条, 分别相应于旋称 $\alpha=1/2$ 和 $-1/2$, 两个旋称系列可以通过 M1 跃迁, 同时混有一小部分 E2 ($\Delta I=1$) 跃迁相联. 对高 j 侵入态, 特别是 $\Omega=1/2$ 的核态, 能量会有很大的旋称分离, 使得非优先态的能量较高, 实验上难以测定, 因此 $^{166}\text{Lu} \pi[660 1/2]$ 带的非优先态至今尚未观测到. 图 2 用轴对称超形变和三轴超形变模型计算的 $^{165}\text{Lu} \pi[660 1/2]$ ($\alpha=1/2$) 带的能谱, 并和实验值进行了比较. A 列对应于三轴超形变模型, 使用参数 $\gamma=15^\circ$, $\lambda=-0.79 \kappa$, $\Delta=-0.001 \kappa$, $J_{00}=150/\kappa$, $b=2.5 \times 10^{-4}$. B 列对应于轴对称超形变模型, 使用

参数 $\gamma=0^\circ$, $\lambda=-0.90 \kappa$, $\Delta=-0.001 \kappa$, $J_{00}=180/\kappa$, $b=8.5 \times 10^{-4}$. 其中 κ 是能量单位, 可由规格化条件来确定. 由图可见在参数合理范围内, 利用轴对称超形变和三轴超形变都能很好解释能谱, 仅有能谱数据不足以确定原子核的三轴形变.

要正确地识别三轴超形变核态, 必须研究电磁跃迁^[6]. 在正常形变核态, 磁偶极跃 $B(M1)$ 值和 Routhian 量有着密切关系, 由推转模型, 对轴对称形变有

$$\frac{\Delta B(M1)}{B(M1)_w} = \frac{4(\Delta e')(\hbar\omega)}{(\Delta e')^2 + (\hbar\omega)^2} \quad (2)$$

其中,

$$\Delta B(M1) = B(M1; \alpha_f \rightarrow \alpha_u) - B(M1; \alpha_u \rightarrow \alpha_f) \quad (3)$$

$$B(M1)_w = \frac{1}{2} \{ B(M1; \alpha_f \rightarrow \alpha_u) + B(M1; \alpha_u \rightarrow \alpha_f) \} \quad (4)$$

$$\Delta e' = E(\alpha_u, \omega) - E(\alpha_f, \omega) \quad (5)$$

这儿 E' 是转动坐标系中准粒子能量, ω 为转动频率. 原则上说, (2) 式两边数值可以在 -2 和 $+2$ 之间, 为了得出三轴形变信息, 定义三轴因子 $F(I)$,

$$F(I) = \frac{\Delta B(M1)}{B(M1)_w} = \frac{4(\Delta e')(\hbar\omega)}{(\Delta e')^2 + (\hbar\omega)^2} \quad (6)$$

图 3 给出了用轴对称和三轴超形变模型计算的 $^{165}\text{Lu} \pi[660 1/2]$ ($\alpha=\pm 1/2$) 带的三轴因子随自旋 I 的变化, g 因子取 $g_1=1.0$, $g_s=3.39$, $g_R=0.42$, 其它参数同图 2. 在轴对称时, 在研究的自旋范围内, $F(I)$ 接近于零, 而对三轴超形变 $F(I)$ 远大于 1, 且呈现复杂的变化. 注意到在 $I=33/2$ 时, $B(M1)$ 位相发生变化, 使 $\Delta B(M1)/B(M1)_w$ 在 $I \leq 33/2$ 时下降, 而 $I \geq 33/2$ 时上升, 在 $I=33/2$ 时形成一个折点.

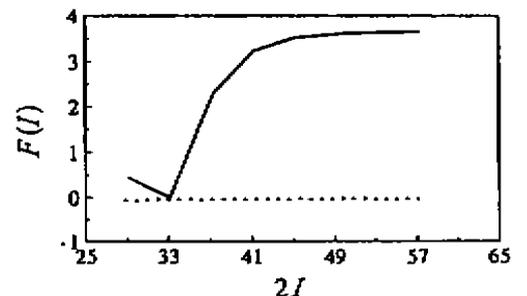


图 3 $^{165}\text{Lu} \pi[660 1/2]$ ($\alpha=\pm 1/2$) 带三轴因子的特征
— $\gamma=15^\circ$, --- $\gamma=0^\circ$, 参数同图 2.

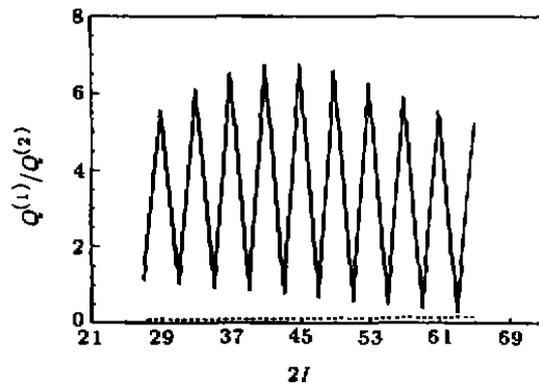


图 4 $^{165}\text{Lu } \pi[660 1/2] (\alpha = \pm 1/2)$ 带动力学电四极矩 $Q^{(1)}/Q^{(2)}$
 — $\gamma = 15^\circ$, --- $\gamma = 0^\circ$, 其它参数同图 2.

图 4 给出了轴对称超形变和三轴超形变模型 $^{165}\text{Lu } \pi[660 1/2] (\alpha = \pm 1/2)$ 带两类动力学电四极矩之比, 这儿 $Q^{(1)}$ 和 $Q^{(2)}$ 定义为

$$B(E2: I \rightarrow I - p) = \frac{5}{16\pi} \langle IK20 | I - pK \rangle^2 Q^{(p)^2},$$

$$p = 1, 2. \quad (7)$$

由于在研究的自旋范围内, $Q^{(2)}$ 基本不变, 因此动力学电四极矩 $Q^{(1)}/Q^{(2)}$ 曲线的特征, 实际上就是 $B(E2; \Delta I = 1)$ 的特征. 在三轴超形变时 $Q^{(1)}/Q^{(2)}$ 出现明显的振荡; 而在轴对称超形变时, $Q^{(1)}/Q^{(2)}$ 不出现振荡, 且数值较小.

由此可见, 由于能谱对波函数的依赖性并不灵敏. 在合理范围内选择粒子-转子模型参数, 轴对称超形变和三轴超形变模型都能拟合能谱, 然而三轴因子、两类动力学电四极矩之比存在明显差异, 这些差别可以用来识别三轴超形变核态, 它们可能作为三轴超形变的直接实验证据, 为此测量能谱的同时, 测量其电磁跃迁几率是极其重要的.

参 考 文 献:

[1] Schmitz W, Yang C X, Hubel H, *et al.* High Spin States in ^{163}Lu [J]. Nucl Phys, 1992, A539(1): 112-136.
 [2] Schnack-Petersen H, Bengtsson R, Bark R A, *et al.* Superdeformed Triaxial Bands in $^{163,165}\text{Lu}$ [J]. Nucl Phys, 1995, A594(2): 175-202.
 [3] Yang C X, Wu X G, Zheng H, *et al.* Superdeformed Triaxial Bands in ^{167}Lu [J]. Eur Phys J, 1998, A1(3): 237-239.
 [4] Tormanen S, Odegard S W, Hagemann G B, *et al.* Triaxial Superdeformed Bands in ^{164}Lu and Enhanced E1 Decay-out Strength [J]. Phys Lett, 1999, B454 (1): 8-14.
 [5] Chen X Q, Xing Z. Calculation of Nuclear Superdeformed Bands by Using the Particle-rotor Model [J]. J Phys, 1993, G19(11): 1 869-1 877.
 [6] 邢正, 王子兴, 陈星集, 等. 组态混合对三轴超形变带的影响 [J]. 高能物理与核物理, 1998, 22 (11): 1 029-1 034.
 [7] Xing Z, Wang Z X, Chen X Q. Description of Superdeformed Triaxial Bands in ^{163}Lu [J]. Chin Phys Lett, 1998, 15(3): 173-172.
 [8] Xing Z, Wang Z X, Chen X Q. A Criterion of Superdeformed Triaxial Shape [J]. Chin Phys Lett, 1999, 16(3): 172-174.

Triaxial Superdeformation in Nuclei*

XING Zheng, CHEN Xing-qu

(Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract; Current developments in triaxial superdeformed states in nuclei are discussed from a theoretical perspective. A detailed analysis of superdeformed triaxial bands is made with particle-rotor model. Experimental information which may differentiate triaxial superdeformation from axially-symmetric superdeformation is discussed. In order to identify the superdeformed triaxial bands both the energy spectra and electromagnetic transition probabilities should be measured.

Key words; nuclear structure; particle-rotor model; superdeformation; triaxial deformation

* Foundation item: NSFC(19975023)