

$^{149}\text{Gd}(b1)$ 和 $^{153}\text{Dy}(b1)$ 超形变带能量的 $\Delta I=2$ Staggering*

邢正¹⁾ 陈星藻¹⁾ 王晓春

(兰州大学现代物理系 兰州 730000)

1996-12-30 收稿

摘 要

粒子-转子模型推广到用于描述 $A \sim 150$ 区奇 A 核超形变核态, 首次成功地拟合了 $^{149}\text{Gd}(b1)$ 和 $^{153}\text{Dy}(b1)$ 能量的 $\Delta I = 2$ Staggering.

关键词 原子核结构, 超形变, 粒子-转子模型, C_4 对称性, $\Delta I = 2$ Staggering.

1 引 言

$^{149}\text{Gd}(b1)$ 超形变(SD)转动谱观测到的 $\Delta I = 2$ Staggering^[1], 即相对于光滑参照系角动量 $\Delta I = 4$ 的状态能量出现系统的位移, 是超形变核态研究的重大成果之一. 到目前为止, 已在 $A \sim 150$, 190 和 130 区超形变带中观测到这一现象^[1-4]. 对这一现象的理论解释主要有两种观点: 一是认为 $\Delta I = 2$ Staggering表明系统哈密顿量具有 C_4 对称性^[5,6], 他们采用具有 C_4 对称的模型哈密顿量, 得到了转动谱的 $\Delta I = 2$ Staggering的主要特征. 与这一观点相反, 文献[7]放弃了系统的 C_4 对称性, 指出 $\Delta I = 2$ Staggering是投影壳模型的自然结果. 前者由于模型过于简单, 没有考虑核的内禀性质, 原则上不可能拟合实验数据. 而后者应该可以拟合实验数据, 但至今尚未见到他们的计算结果. 在文献[8]中, 提出了微扰粒子-转子模型(即粒子-转子模型加微扰), 研究了转动谱的 $\Delta I = 2$ Staggering的一般特性. 该模型主要特征是利用真实的核模型哈密顿量, 考虑了核的内禀性质, 系统没有 C_4 对称性, 在统一的粒子-转子模型框架下研究能谱的 $\Delta I = 2$ Staggering, 而附加的微扰项是转子畸变的自然结果. 因此该模型可用于直接拟合实验数据. 本文的主要目的是利用微扰粒子-转子模型对 $^{149}\text{Gd}(b1)$ 和 $^{153}\text{Dy}(b1)$ 超形变转动谱进行理论计算, 并与实验数据进行比较.

* 国家自然科学基金(项目号19575025)和核工业科学基金资助.

1)中国科学院上海原子核研究所客座.

2 模型简介

为了便于讨论,我们简单地描述微扰粒子-转子模型,其细节可参阅文献[8—10]. 模型哈密顿量为:

$$H = H_{\text{PR}} + H_c, \quad (1)$$

其中 H_{PR} 是三轴粒子-转子模型哈密顿量,描述转动能量随总角动量 I 的光滑变化. H_c 是微扰项,表示由于转子畸变对规则部分的扰动,引起了 $\Delta K = 4$ 的带间混合. 粒子-转子哈密顿量为:

$$H_{\text{PR}} = H_{\text{ro}} + H_{\text{intr}}, \quad (2)$$

其中 H_{ro} 为转子哈密顿量,表示为:

$$H_{\text{ro}} = \sum_{k=1}^3 \frac{\hbar^2}{2J_k} (I_k - j_k)^2 = \sum_{k=1}^3 A_k (I_k - j_k)^2, \quad (3)$$

这里 J_k 是绕内禀第 k 轴的转动惯量,惯量参数 $A_k = \hbar^2 / (2J_k)$. 超形变核是很好的刚性转子,其能谱可由 ab 公式极好地描述^[11]. 在数值计算中采用与 I 有关的惯量矩^[9]

$$J_k = J_{k0} f(I), \quad k = 1, 2, 3. \quad (4)$$

$$f(I) = \frac{1 + \sqrt{1 + bI(I+1)}}{2}, \quad (5)$$

这里 J_{k0} 是刚性转子惯量矩, b 是一个可调参数. 内禀哈密顿量 H_{intr} 的具体形式见文献 [8, 9].

微扰项 H_c 表示为^[8]:

$$H_c = h_4(I_+^4 + I_-^4) + h_0(I_+^2 I_-^2 + I_-^2 I_+^2 + I_+ I_- I_+ I_- + I_+ I_- I_+ I_- + I_- I_+ I_- I_+ + I_- I_+ I_- I_+). \quad (6)$$

其中 h_0, h_4 是微扰项参数. 为了与文献 [5, 6] 一致,微扰项参数 h_0, h_4 改用 B_1, B_2 表示:

$$h_0 = \frac{1}{6} \left(\frac{B_1}{2} + B_2 \right),$$

$$h_4 = \frac{B_1}{4}. \quad (7)$$

微扰项来自对理想轴对称转子的偏离^[8], 其中 B_1, B_2 与惯量矩的平方有关,因此在数值计算中微扰强度 B_1, B_2 亦随角动量 I 缓慢变化,

$$B_1 = \frac{A_{30}}{C_1 f^2(I)},$$

$$B_2 = C_2 B_1, \quad (8)$$

其中 $A_{30} = \hbar^2 / (2J_{30})$, $f(I)$ 由 (5) 式所示, C_1, C_2 是两个常数.

3 结果与讨论

文献 [9, 12] 利用粒子-转子模型描述了 $A \sim 190$ 区奇 A 核的超形变核态, 而文献 [8] 又使用这一模型研究了超形变核态转动谱的 $\Delta I = 2$ Staggering, 以及 $\Delta I = 2$ Staggering 与微扰强度和核的内禀性质的依赖关系. 本文把粒子-转子模型推广到描述 $A \sim 150$ 区奇 A 核的超形变核态, 从而对 $^{149}\text{Gd}(\text{b}1)$ 和 $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$ 进行理论计算, 并与实验值进行了比较. 对 $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$ 和 $^{149}\text{Gd}(\text{b}1)$ 带, 最后一个奇中子分别填充 $\nu[761\ 3/2]$ 和 $\nu[770\ 1/2]$ 轨道. 计算中采用 $j = 15/2$ 单 j 粒子-转子模型. 为了与实验值进行比较, 假定 $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$ 和 $^{149}\text{Gd}(\text{b}1)$ 的退激自旋分别为 $I_0 = 63/2$ 和 $I_0 = 51/2$ [13], 相应的跃迁能量 $E_\gamma(I_0 + 2 \rightarrow I_0) = 721.4\text{keV}$ 和 617.8keV . 这一自旋指定和文献 [14] 的分析是一致的. 本文集中讨论 $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$ 的计算结果, 而对 $^{149}\text{Gd}(\text{b}1)$ 只作简单的描述.

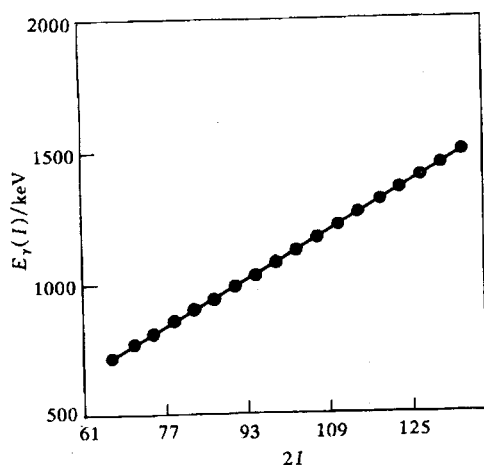


图 1 $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$ γ 跃迁能量 E_γ 和总角动量 I 的关系
使用参数 $\gamma = 0^\circ$, $\lambda = -0.71\kappa$, $\Delta = 0.045\kappa$, $J_{10} = J_{20} = 750/\kappa$
 $J_{30} = 200/\kappa$, $b = -7.0 \times 10^{-6}$, $B_1 = A_{30}/(80 \cdot \rho^2)$, $B_2 =$
 $-1.8 \times 10^{-4} B_1$.

— 为理论值; \cdot 为实验值.

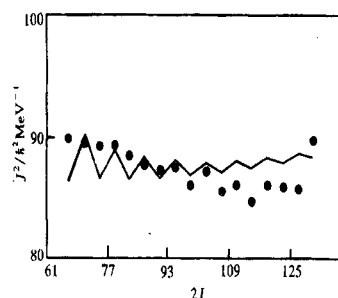


图 2 $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$ 动力学转动惯量 $J^{(2)}$
和总角动量 I 的关系

使用参数同图 1.

— 为理论值; \cdot 为实验值.

图 1 给出了 $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$ γ 跃迁能量 E_γ 与总角动量 I 的关系. 图 2 给出了 $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$ 的动力学转动惯量 $J^{(2)}$ 与总角动量 I 的关系. 这里假定了轴对称形变 $\gamma = 0^\circ$, 转子的适当畸变对产生能量的 $\Delta I = 2$ Staggering 是重要的 [9], 因此选用 $J_{30} \neq 0$. κ 是能量单位, 由规格化条件 $E_\gamma(I_{\text{cal}} = 71/2) = E_\gamma(I_{\text{exp}} = 71/2) = 765.9\text{keV}$ 决定, 得到 $\kappa = 5.4719\text{MeV}$, 这与文献 [15] 由推转模型估计的 $\kappa = 5-6\text{MeV}$ 是一致的. 由图 1, 2 可见: (1) γ 跃迁能量的理论值, 与实验值在观测的范围内符合较好, 这一结果表明粒子-转子模型可用于描述 $A \sim 150$ 区奇 A 核超形变核态的性质; (2) 对 $A \sim 150$ 区 SD 带, 由于退激自旋比 $A \sim 190$ 区高得多, 另一方面, 涉及到角动量的顺排 (特别是涉及高 j 闯入态的组态, 如 $\nu j_{15/2}$), 许多作者怀疑理论指定的 SD 带退激自旋的可靠性, 而我们计算理论值与实验值的符合表明, 我们假定的 $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$ 带退激自旋的指定是正确的; (3) 动力学转动惯量 $J^{(2)}$ 的理论值重现了实验值

的主要特征,即 $J^{(2)}$ 在一很大的角动量范围内接近一常数,而 $J^{(2)}$ 值的上下波动,反映了参量存在 $\Delta I = 2$ Staggering.

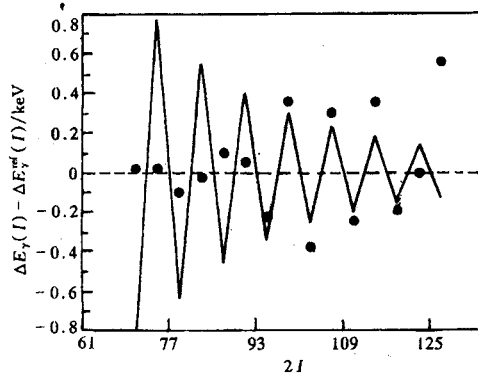


图3 $^{153}\text{Dy}(\text{b1})$ 能量 $\Delta I = 2$ Staggering 与总角动量 I 的关系

使用参数同图1.

— 为理论值; • 为实验值.

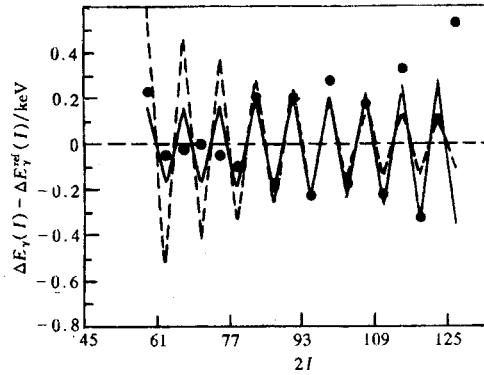


图4 $^{149}\text{Gd}(\text{b1})$ 能量 $\Delta I = 2$ Staggering 与总角动量 I 的关系

使用参数 $\gamma = -10^\circ$, $\lambda = -0.92\kappa$, $\Delta = 0.045\kappa$, $J_{10} = J_{20} =$

$700/\kappa$, $J_{30} = 220/\kappa$, $b = -1.0 \times 10^{-5}$, $B_2 = 0$.

---- $B_1 = A_{30}/(80 \cdot I^2)$;

— $B_1 = A_{30}/(100 - 0.8(I - 22.5))$;

• 为实验值.

图3给出了 $^{153}\text{Dy}(\text{b1})$ 能量 $\Delta I = 2$ Staggering 与总角动量 I 之间的关系. $\Delta I = 2$ Staggering 的数值定义为: 相继两 γ 跃迁能量差 $\Delta E_\gamma(I) = E_\gamma(I) - E_\gamma(I - 2)$ 减去一光滑参照系的能量 $\Delta E_\gamma^{\text{ref}}(I)$, 其表达式同文献 [1]. 理论计算定性地给出了 $^{153}\text{Dy}(\text{b1})$ 带能量的 $\Delta I = 2$ Staggering, 但存在明显的不一致: 在 $I < 91/2$ 区, 实验值近乎为零, 而理论值偏大, 在 $I > 91/2$ 区, 理论值又小于实验值, 理论值随 I 增大而减小. 注意到 $\Delta I = 2$ Staggering 振幅灵敏地依赖于微扰强度^[8], 因此这一结果表明, 在 $I < 91/2$ 区微扰强度太大, 而 $I > 91/2$ 区微扰强度又偏小, 且随 I 增大要求微扰强度增大. 为了检验这一观点, 图4给出了 $^{149}\text{Gd}(\text{b1})$ 能量 $\Delta I = 2$ Staggering, 其中虚线为 $C_1 = 80$, 而实线为 C_1 随 I 增加线性减小. (我们假定在 $I = 45/2$ 时, $C_1 = 100$, 而 $I = 135/2$ 时 $C_1 = 64$), 由图可见, 在 $C_1 = 80$ 时, 能量 $\Delta I = 2$ Staggering 定性符合实验数据, 但 Staggering 振幅随 I 增加而下降, 而实线显示 Staggering 振幅逐渐增大, 与实验特征一致.

4 小 结

利用微扰粒子 - 转子模型研究了 $^{153}\text{Dy}(\text{b1})$ 和 $^{149}\text{Gd}(\text{b1})$ 超形变核态的性质, 理论和实验比较得到下述结论:

(1) 粒子 - 转子模型可用于描述 $A \sim 150$ 区奇 A 核超形变核的性质.

(2) 计算的 γ 跃迁能量、动力学转动惯量和能量 $\Delta I = 2$ Staggering 与实验值基本符合, 表明微扰粒子 - 转子模型可用于研究 $\Delta I = 2$ Staggering.

(3) 能量 $\Delta I = 2$ Staggering 现象本身并不要求系统具有 C_4 对称性, 转子的适当畸变会

导致 $\Delta I = 2$ Staggering.

参 考 文 献

- [1] S. Flibotte *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **71**(1993)4299.
- [2] B. Cederwall *et al.*, *Phys. Lett.*, **B346**(1995)244.
- [3] B. Cederwall *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **72**(1994)3150.
- [4] A. T. Semple *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **76**(1996)3671.
- [5] I. Hamamoto, B. R. Mottelson, *Phys. Lett.*, **B333**(1994)294.
- [6] A. O. Macchiavelli *et al.*, *Phys. Rev.*, **C51**(1995)460.
- [7] Y. Sun *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **75**(1995)3398; *phys. Rev.*, **C52**(1995)2844.
- [8] 邢 正、王晓春、陈星冀, 中国科学, **A26**(1996)939.
- [9] X. Q. Chen, Z. Xing, *J. Phys.*, **G19**(1993)1869.
- [10] S. E. Larsson *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A307**(1978)189.
- [11] 邢 正、陈星冀, 高能物理与核物理, **15**(1991)1020.
- [12] 陈星冀、邢 正, 中国科学, **A24**(1994)1182.
- [13] 陈星冀、邢 正, 高能物理与核物理, **18**(1994)256.
- [14] I. Ragnarsson, *Nucl. Phys.*, **A557**(1993)166c.
- [15] I. Hamamoto, B. R. Mottelson, *Phys. Scripta*, **T56**(1995)27.

$\Delta I=2$ Energy Staggering in Superdeformed Bands in $^{149}\text{Gd}(\text{b}1)$ and $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$

Xing Zheng Chen Xingqu Wang Xiaochun

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

Received 30 December 1996

Abstract

The particle-rotor model is applied to describe the odd A superdeformed nuclear states in $A \sim 150$ mass region. The calculated $\Delta I = 2$ Staggering in superdeformed bands in $^{149}\text{Gd}(\text{b}1)$ and $^{153}\text{Dy}(\text{b}1)$ is compared with the observed data for the first time.

Key words nuclear structure, superdeformation, particle - rotor model, C_4 - symmetry, $\Delta I = 2$ Staggering.