

$A \sim 150$ 区域核晕带的形状变化和共存*

吕立君¹⁾ 张进富 白洪波

(赤峰学院物理系 赤峰 024001)

摘要 利用 E-GOS 理论分析方法, 对 $A \sim 150$ 质量区域原子核进行了分析研究, 结果显示这一区域核具有振动和转动共存的特性, 而且存在一个临界点, 在此处原子核的结构特性发生了显著的变化. 同时也发现该区域核基本上处于 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 过渡区域.

关键词 核结构 晕带 E-GOS 曲线

1 引言

对于原子核这一强相互作用的有限多体量子系统而言, 用量子力学的方法严格求解薛定谔方程而得到解析解是非常困难的. 人们采用数值解法发展了多种近似理论. 对于大形变区原子核低能激发态的理论解释存在两类主要观点, 一是 Bohr 和 Mottelson 的几何模型的观点, 另一类是 Arima 和 Iachello 的相互作用玻色子模型 (IBM) 的观点. 两类模型均可以对实验资料给出另人满意的解释. 目前人们对 $A \sim 150$ 稀土过渡区原子核在实验和理论上都进行了大量的研究. 理论上采用了不同的模型, 如壳模型^[1-3]、代数模型^[4-6]等. 研究结果显示这一区域核有些具有 $U(5)$ 动力学对称性, 有些核具有 $SU(3)$ 动力学对称性, 这分别类似于几何模型的非谐振子和 γ 稳定转子. 还有些核具有过渡核的特性, 即是 $U(5)$ 到 $SU(3)$ 的过渡核. $A \sim 150$ 稀土过渡区原子核, 基本上是从闭壳结构过渡到强变形, 显示了振动和转动共存的丰富的核结构变化. 本文主要利用最近提出的 E-GOS 理论分析方法^[7], 分析了 $A \sim 150$ 质量区域核晕带特性.

2 理论方法

最近, 在研究原子核形状相变中, 一些作者^[7] 提出了一种 E-GOS (E-Gamma over spin) 理论分析方法.

我们知道, 对于理想的振动核, 能谱公式为

$$E_I = n\hbar\omega,$$

对于晕态能级

$$n = \frac{I}{2}.$$

对于轴对称转动核, 能谱为

$$E_I = \frac{\hbar^2}{2J} I(I+1).$$

其中 J 是静力学转动惯量. 通过分析, 振动核的晕态能级 γ 衰变能 $E_\gamma(I \rightarrow I-2) = \hbar\omega$, 是一常数. 而转动核晕态的衰变能

$$E_\gamma(I \rightarrow I-2) = \frac{\hbar^2}{2J} (4I-2),$$

随着自旋的增加而增加. 为了进一步研究原子核的形状共存和变化, 文献[7]引入比值

$$R = \frac{E_\gamma(I \rightarrow I-2)}{I},$$

进行分析. 对于振动核

$$R = \frac{\hbar\omega}{I},$$

比值 R 随着 I 的增加而逐渐减小, 最后趋于零. 对于转动核

$$R = \frac{\hbar^2}{2J} \left(4 - \frac{2}{I} \right),$$

比值 R 随着 I 的增加, 变化很小, 最后趋于一常数. 为了直观地显示这种变化趋势, 分别取第一激发态的能量为 500keV 和 100keV, 作谐振子和轴对称转子的 E-GOS 曲线, 图 1 曲线显示了这种变化趋势.

* 国家自然科学基金(10547003), 内蒙古高等学校科研基金(NJ05007)和内蒙古自然科学基金(200607010111)资助

1) E-mail: lulijun0476@sina.com

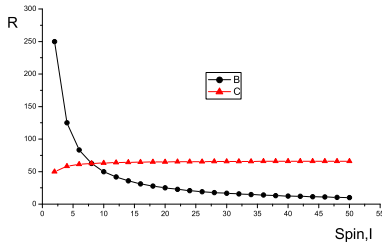


图 1 谐振子(B)和轴对称转子(C)的E-GOS曲线

3 计算结果和讨论

利用E-GOS理论分析方法分析了 $A \sim 150$ 质量区域核晕带特性, 结果如图2所示. 图中的E-GOS曲线显示 $^{140,142}\text{Gd}$, ^{140}Sm , ^{156}Dy , $^{154-158}\text{Er}$, $^{158,160}\text{Yb}$ 等

在低自旋态振动效应较强, 而在相对较高的自旋态转动效应较强, 而且存在一个临界点, 在此处原子核的结构特性发生了显著的变化. ^{140}Gd 在 $I = 12\hbar$, ^{142}Gd 在 $I = 10\hbar$, ^{140}Sm 在 $I = 10\hbar$, ^{156}Dy 在 $I = 18\hbar$, $^{156,158}\text{Er}$ 在 $I = 16\hbar$, $^{158,160}\text{Yb}$ 在 $I = 14\hbar$ 处发生显著相变. 另外 $^{144,146}\text{Sm}$, $^{142,144}\text{Nd}$ 在 $I = 6\hbar$, $^{146,148}\text{Dy}$, ^{150}Er 在 $I = 10\hbar$ 处发生明显相变. 有些核两处发生相变, 如 ^{148}Gd 在 $I = 6\hbar$ 和 $I = 12\hbar$, ^{146}Gd 在 $I = 10\hbar$ 和 $I = 16\hbar$, ^{142}Sm 在 $I = 6\hbar$ 和 $I = 10\hbar$, ^{152}Er 在 $I = 8\hbar$ 和 $I = 16\hbar$, ^{140}Ce 在 $I = 6\hbar$ 和 $I = 10\hbar$, ^{154}Yb 在 $I = 8\hbar$ 和 $I = 16\hbar$ 处发生相变. 由此显示出 $A \sim 150$ 质量区域核具有振动和转动共存的丰富的核结构. 对于稀土区原子核在 $I = 12\hbar-14\hbar$ 时大都出现了回弯现象(backbending), 此时核的转动惯量有一个较大的突变. 我们的E-GOS曲线也显示出许多核在 $I = 12\hbar-14\hbar$ 处有相变发生.

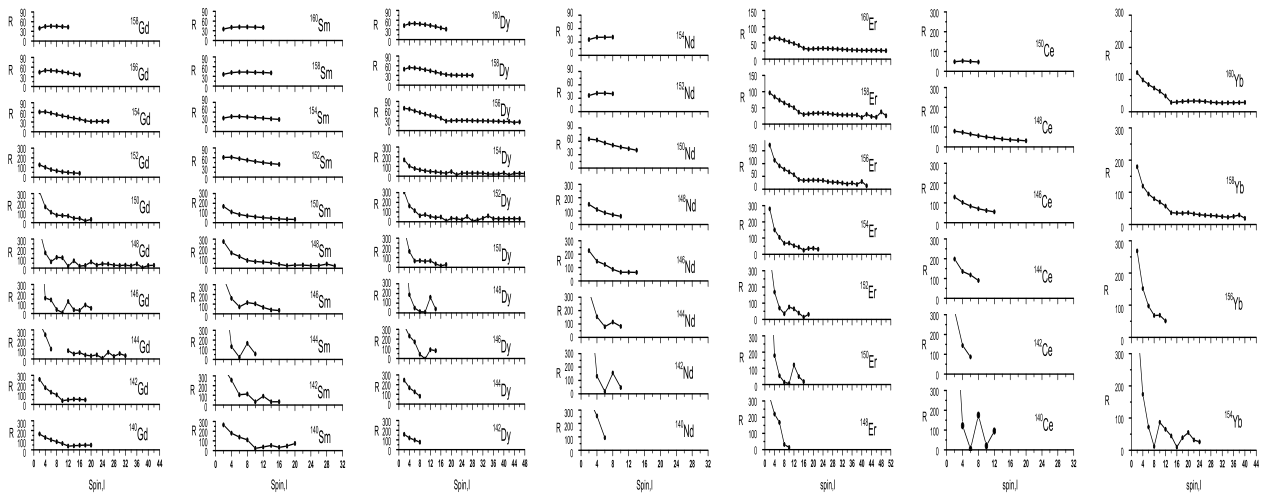


图 2 $A \sim 150$ 质量区域核的E-GOS曲线

对于 $A \sim 150$ 区域的某些核, 中子数跨越 $N=82$ 壳, 如 Sm , Gd , Dy , Nd , Er , 这些核也是 $Z=64$ 子壳附近的核. 因此一些核存在着很强的壳效应. 随着完整壳层的靠近, 原子核的形状偏离球形的程度逐渐减少, 转动惯量也减少, 到了一定程度虽然还没有达到完整壳层结构, 但是平衡形状已经成为球形, 低激发态已经近似四级型的形状谐振. 在更接近完整壳层结构的原子核中, 这种形状谐振的频率会增加. 在完整壳层结构附近的原子核中, 集体振动的频率达到可以和单独核子的相比, 这时核的集体运动已是振动了. 在远离完整壳层结构的区段, E-GOS曲线也显示该区域核随着中子数的增加, 振动向转动的相变更加明显, 这是由于原子核满壳外核子数较多, 导致原子核有较大的形变, 原子核的平衡形状是非球形的, 它的能级是转动能级, 接近于 $SU(3)$ 极限, 所以它们的转动特征

比较明显. E-GOS曲线也表明该区域大部分核在低自旋态显示了四极振动的结构特征, 但在晕带的高自旋态有较小变形, 并形成了类似于转动带的结构. 也进一步证实了有限多体量子系统确实存在单粒子和集体自由度间的竞争及振动模式和转动模式之间的竞争.

为进一步研究核的形状相变, 由

$$\beta_2 = \frac{4\pi\sqrt{B(E2: 0_1^+ \rightarrow 2_1^+)}}{3eZR_0^2},$$

估算出 $A \sim 150$ 区域核的形变参数 $\beta_2=0.088-0.34$, 表明该区域核基本上属于球形过渡到变形核. 该区域核晕带能级结构的变化特征, 也定性的反应出该区域核具有从振动到转动的变化规律, 即该区域核基本上处于 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 过渡区域.

最近研究表明, ^{150}Nd , ^{152}Sm , ^{154}Gd ^[8-10] 具有新的动力学对称性, 即 $X(5)$ 核. 这些核的 $\beta_2=0.28-0.31$

相对较大, $E_4^+/E_2^+=2.9-3.0$, E-GOS曲线曲线光滑没有明显的相变, 且形状相似. ^{148}Ce 核的 $\beta_2=0.24$, $E_4^+/E_2^+=2.8$. E-GOS曲线也与 $X(5)$ 核相似, 表明 ^{148}Ce 核可能是 $X(5)$ 核. 另外由各核素的E-GOS曲线我们还发现, 对同位素核而言, $X(5)$ 核是振动与转动的一个临界点.

4 结论

利用E-GOS分析方法, 系统的分析了 $A \sim 150$ 区域原子核的形状相变. 研究表明, 大部分核在低自旋

态显示四极振动的结构特征, 但在晕带的高自旋态有较小的变形, 并形成了类似于转动带的结构. 进一步证实了有限多体量子系统确实存在振动模式与转动模式之间的竞争. 同时也反映出原子核具有振动和转动共存的特性, 而且存在一个临界点, 在此处原子核的结构特性发生显著变化. $A \sim 150$ 质量区域核晕带能级结构的变化特征也定性的反应出该区域核基本上是属于从球形过渡到变形核, 具有从振动到转动的变化规律, 即该区域核基本上属于 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 过渡区域.

参考文献(References)

- GAO Zao-Chun, CHEN Yong-Shou, MENG Jie. Chin. Phys. Lett., 2004, **21**(5): 806—809
- Eßer L, Jolos R V, Becker F et al. Nucl. Phys., 2000, **A672**: 111—122
- Lunardi S, ZHU L H, Petrache C M et al. Nucl. Phys., 1997, **A618**: 238—258
- LIU Yu-Xin. Phys. Rev., 1998, **C58**(1): 237—242
- LÜ Li-Jun, ZHANG Jin-Fu. HEP& NP, 2006, **30**(2): 128—133(in Chinese)
(吕立君, 张进富. 高能物理与核物理, 2006, **30**(2): 128—133)
- ZHANG Jin-Fu, PAK JaeYou, LIU Feng-Ying. HEP& NP, 2000, **24**(11): 1066—1072(in Chinese)
(张进富, 朴在渊, 刘凤英. 高能物理与核物理, 2000, **24**(11): 1066—1072)
- Regan P H, Beausang C W, Zamfir N V et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **90**: 152502
- Krücken R, Albanna B, Bialik C et al. Phys. Rev., Lett., 2002, **88**: 232501
- Bijker R, Casten R F, Zamfir N V et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 064304
- Tonev D, Dewald A, Klug T et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 034334

Shape Transition and Coexistence of Yrast-Bands in $A \sim 150$ Nuclei*

LÜ Li-Jun¹⁾ ZHANG Jin-Fu BAI Hong-Bo

(Department of Physics Chifeng University, Chifeng 024001, China)

Abstract The E-Gamma Over Spin (E-GOS) analysis method is applied to study the shape evolution of yrast-bands in $A \sim 150$ nuclei. The results show that the vibration and the rotation coexist in this region. There is a critical point and the nuclear structure changes notably at this critical point. It is found that these nuclei in $A \sim 150$ region are in the transition from $U(5)$ to $SU(3)$ dynamical symmetry.

Key words nuclear structure, yrast-band, E-GOS curve

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10547003), Inner Mongolia Natural Science Foundation (NJ05007, 200607010111)

1) E-mail: lulijun0476@sina.com