

$A \approx 160$ 质量区奇 A 核的形状演化效应 *

Structure Evolution in Odd- A Nuclei Around $A \approx 160$

周厚兵 **, 张苏苏, 孙小军

ZHOU Houbing, ZHANG Susu, SUN Xiaojun

(广西师范大学物理科学与技术学院, 广西桂林 541004)

(College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要:【目的】研究 $A \approx 160$ 质量区奇 A 核高激发态的形状演化性质。【方法】基于来自 National Nuclear Data Center 的实验数据,采用修正后的 E-Gamma Over Spin(E-GOS)曲线方法首次系统性地探讨了 $A \approx 160$ 质量区奇 A 核处于高激发态的激发特性。【结果】提取得到的 E-GOS 曲线表明该质量区原子核的形变与未配对中子的组态密切相关,当核外价中子占据高 j 轨道时,随着角动量的增加将对核芯产生强大的形状驱动效应。此外,根据 E-GOS 曲线的变化特征,发现在 Yb 同位素的高自旋能级结构中存在明显的形状演化现象,即随着角动量的增加原子核的激发机制从振动逐渐演化为转动。【结论】在 $A \approx 160$ 质量区奇 A 核中系统性地存在形状演化现象。

关键词:奇 A 核 E-GOS 曲线 形状演化

中图分类号:O415.5 文献标识:A 文章编号:1005-9164(2016)03-0212-04

Abstract:【Objective】The paper aims at studying the structure evolution of the odd- A nuclei with $A \approx 160$ at high spin states.【Methods】Based on the experimental data from Nuclear Data Center National, the E-Gamma Over Spin(E-GOS)curves after correction were used firstly to investigate the structure evolution in the odd- A nuclei with $A \approx 160$ as a function of spin.【Results】The nuclear shape is closely related to the neutron configuration, and the polarizing effect would begin to influence the core as valence nucleons start to fill high j neutron orbitals with increasing spin. Furthermore, it is founded that there is a clear structure evolution at high spin states of Yb isotopes based on the E-GOS characteristics. Namely, the Yb isotopes display a vibrational character at low spins, whereas at higher spins they have a rotational pattern.【Conclusion】The phenomena of structure evolution were found in the odd- A nuclei with $A \approx 160$.

Key words: odd- A nuclei, the E-GOS curve, structure evolution

收稿日期:2016-05-10

修回日期:2016-06-09

作者简介:周厚兵(1984—),男,讲师,主要从事原子核结构研究。

* 广西自然科学基金项目(2014GXNSFBA118013, 2014GXNSFDA118003, 2015GXNSFDA139004), 国家自然科学基金项目(11465005, 11505035), 广西高等教育本科教学改革工程项目(2015JGA151)和广西师范大学博士科研启动基金项目资助。

** 通讯作者:E-mail:zhouhb07@163.com。

0 引言

【研究意义】在原子核结构研究中,形变核激发的微观机制是非常有意义的课题。系统性地研究原子核的形变和形状演化性质,有助于探索不同单粒子轨道产生的形状驱动效应,寻找不同形变产生的原因。近年来,随着先进加速器技术及大型探测器阵列相继应用于在束测量,实验上能够观测到越来越多偏离 β 稳定线原子核的高自旋态能级结构。这些处于高激

发态的角动量可以由单粒子激发或者集体激发产生,其中何种模式占优势则主要取决于它们所需激发能的大小,并且不同激发模式产生的高自旋谱学特征是截然不同的。在 $A \approx 160$ 质量区,原子核处于形变的稀土核区域,具有较稳定的形变,其高自旋态通常由集体激发产生。对于理想的振动激发,其能级间隔 $E_\gamma = \hbar \omega$ 为一个常数;而对于轴对称的转动激发,其能级间隔 $E_\gamma = [\hbar^2 / (2J)] I(I+1)$, J 为转动惯量^[1]。用于描述稀土区形变核的理论模型很多,其中最为成功的是推转壳模型^[2],它很好地再现了实验上观测到的“回弯”现象^[3]。但是,在这些理论模型的框架下均假定原子核的角动量发生变化时核芯的形变保持不变,这对于解释原子核发生“回弯”后的高激发态能级结构性质是有局限性的。【前人研究进展】Regan等^[4]提出一种新的方法来判别原子核结构的激发机制,也称为 E-Gamma Over Spin(E-GOS)曲线方法。在这个方法中,定义 $R = E_\gamma(I \rightarrow I-2) / I$,其中 $E_\gamma(I \rightarrow I-2)$ 表示能级间隔, I 为角动量。于是,随着角动量增加,在振动激发模式下, R 值逐渐趋向零;在转动激发模式下, R 值将最终趋向一个常数 $4[\hbar^2 / 2J]$ 。运用该方法,发现在 $A \approx 110$ 质量区的偶偶核晕带存在显著的形状演化现象^[4],即角动量较低时能级为振动激发产生,随着角动量的增加,在高自旋($>10 \hbar$)激发态时能级则演化成转动激发模式。【本研究切入点】在其它质量区的奇 A 核是否也同样系统性的存在形状演化效应,目前尚未见报道。对处于 $A \approx 160$ 质量区的原子核,在高自旋态发生“回弯”后,拆对后的准粒子占据不同的轨道将会对核芯产生不同的极化效应,从而导致原子核可能出现多种集体运动模式。【拟解决的关键问题】因此,本研究拟采用修正后的 E-GOS 曲线方法首次针对稀土区奇 A 核开展系统性研究,深入阐释其处于高激发态时能级的激发特性。

1 研究方法

在奇 A 核中,基态的自旋来自核外未配对价核子的贡献,体现出强烈的组态相关性。因此,与偶偶核不同的是,在采用 E-GOS 曲线方法研究奇 A 核时需要将带头 K 的影响考虑进去。本研究中,自旋 I 用归一化后的自旋减去带头在对称轴上的投影 K 来代替,即 $I \rightarrow I - K$ 。于是,对于轴对称的转子情况下,E-GOS 方法改用下式来描述^[5]:

$$R(I) = \frac{E_\gamma}{I} \rightarrow \frac{\hbar^2 (4I - 2)}{2J I} \rightarrow \frac{\hbar^2 [4(I - K)] - 2}{2J (I - K)}, \quad (1)$$

将(1)式改写后可得:

$$R(I - K) = \frac{E_\gamma - (4K \frac{\hbar^2}{2J})}{I - K} = \frac{E_\gamma - KR_{K+2}}{I - K}, \quad (2)$$

其中 J 为转动惯量,可通过拟合邻近偶偶核的转动能级得出。从(1)和(2)式可知,当角动量 I 很高的情况下,在奇 A 核中 R 的比值依旧趋于一个常数。若原子核为振动激发,由于其能级间隔为一个常数,所以随着角动量的增加,比值 R 将逐渐减小并最终趋于零。基于这个变化特征,可准确判定原子核的激发机制为转动激发还是振动激发,从而揭示其产生高自旋态的微观机制。

2 结果与分析

基于来自 National Nuclear Data Center (<http://www.nndc.bnl.gov/>) 的实验数据,提取出 $A \approx 160$ 质量区奇 A 核晕带的 E-GOS 曲线(图 1)。从图 1 中可以发现,在 Yb 同位素中,¹⁶⁵Yb、¹⁶⁷Yb 核晕带的 E-GOS 曲线在低自旋态时随着角动量的增加而急剧下降,当角动量 $> 15\hbar$ 后开始逐渐趋于固定值,该变化特征展现了典型的形状演化现象,表明在低角动量时,原子核的激发模式为振动激发,随着角动量升高后逐渐演化成转动激发。随着中子数增加,费米面远离 $N = 82$ 的闭壳层,此时原子核开始具有稳定形变,所以激发机制以转动激发为主,其表现为当角动量增加时 E-GOS 曲线快速趋于平坦,见图 1 中¹⁶⁹Yb、¹⁷¹Yb 核晕带的 E-GOS 曲线。反之,若中子数减少,则费米面愈靠近 $N = 82$ 的闭壳层,原子核的形状趋于球形,此时则以振动激发为主,其 E-GOS 曲线随角动量增加快速下降,如¹⁵⁹Yb、¹⁶¹Yb 及¹⁶³Yb。类似的变化规律在 Hf 同位素中也得到了体现,但需要指出的是¹⁶⁷Hf 的实验数据目前还比较缺乏,虽然其在低自旋时的 E-GOS 曲线的变化规律与¹⁶⁵Yb 相似,为集体振动激发,但高自旋时的激发模式仍有待探索。对于 Er 和 Dy 同位素,由于它们处于稀土形变区的中心,具有稳定的四极形变,因此它们的高激发态以集体转动激发为主,这与图 1 中 E-GOS 曲线的变化特征是一致的,同样的结论在邻近的 Er、Dy 偶偶核中也得到了证实^[6]。另外,在图 1 中 Gd 同位素的核谱学数据比较缺乏,实验上已经观测到的基态带均未布居到很高的自旋态,可能的一个原因是由于这些能级远离晕线,难以进行在束测量,在此不做详细讨论。

在奇 A 核中,中子壳层的填充可以改变核的形状和准中子激发的特性^[7-8]。在低角动量时,核芯外

只有一个价核子,核芯的集体激发占优势。但是随着角动量增加,在科里奥利力作用下,原本配对的核子将发生拆对而开始占据高 j 轨道^[9],这些发生顺排的准粒子将对核芯产生较强的形状驱动效应,使得原子核的角动量沿着对称轴方向发生顺排,导致核芯形成

稳定的四极形变。于是,在高激发态时原子核的激发模式就演化成了转动激发,这种由于“极化”作用而产生的稳定四极形变也被成功应用于解释实验观测到的反磁转带^[10]。

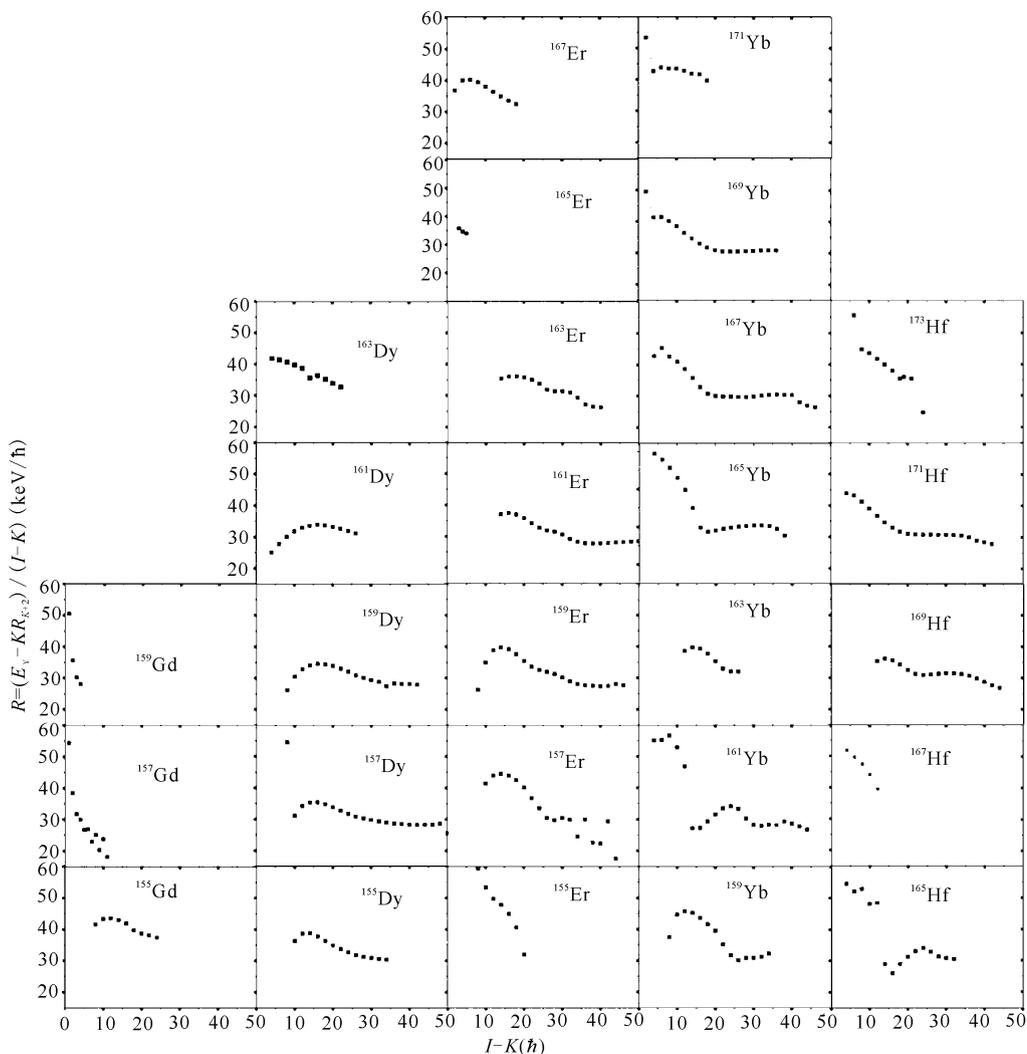


图 1 $A \approx 160$ 质量区奇 A 核晕带的 E-GOS 曲线

Fig. 1 The E-GOS curves for the yrast bands of odd- A nuclei in $A \approx 160$ mass region

3 结论

本研究首次将 E-GOS 曲线方法应用于 $A \approx 160$ 质量区原子核高自旋态的激发机制研究,结果表明,在¹⁶⁵Yb、¹⁶⁷Yb 核的晕带中存在显著的形状演化现象,即随着角动量的增加,原子核的激发机制由振动逐渐演化为转动。在奇 A 核 Er、Dy 同位素中,高激发态能级主要由核芯转动形成,而 Gd 同位素目前的实验数据较少,已有的低自旋态能级展现出了振动激发的特征。迄今为止,150 < A < 190 质量区原子核的高激发态谱学被公认为主要是由于原子核的转动激发产生。但是,本研究发现原子核的激发机制会随

着角动量的变化而发生改变,核芯的形变与准粒子的组态密切相关。因此,这在现有的理论模型中,以核芯形变保持不变为前提的计算结果用于解释高自旋态的能级结构性质是不合理的,需要考虑角动量对激发模式的影响。

参考文献:

- [1] 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京:原子能出版社,2000. LU X T. Nuclear Physics[M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2000.
- [2] NAZAREWICZ W, DUDEK J, BENGTESSON R, et al. Microscopic study of the high-spin behaviour in selected $A \approx 80$ nuclei[J]. Nuclear Physics A, 1985, 435(2): 397-

- [3] JOHNSON A, RYDE H, SZTARKIER J. Evidence of a singularity in the nuclear rotation band structure[J]. Physics Letters B, 1971, 34: 605-608.
- [4] REGAN P H, BEAUSANG C W, ZAMFIR N V, et al. Signature for vibrational to rotational evolution along the yrast line[J]. Physical Review Letters, 2003, 90(15): 152502.
- [5] REGAN P H, WHELDON C, YAMAMOTO A D, et al. Vibrational and rotational sequences in ^{101}Mo and $^{103,4}\text{Ru}$ studied via multinucleon transfer reactions[J]. Acta Physica Polonica B, 2005, 36: 1313-1322.
- [6] SHEN S F, CHEN Y B, XU F R, et al. Signature for rotational to vibrational evolution along the yrast line[J]. Physical Review C, 2007, 75: 047304.
- [7] ROUX D G, FETEA M S, GUEORGUIEVA E, et al.

Signature splitting and quasiparticle alignment in the yrast band of ^{165}Ta [J]. Physical Review C, 2001, 63: 024303.

- [8] CARLSSON H, BERGSTRÖM H, BROCKSTEDT A, et al. Back-bending in the $\pi_{i_{13/2}}$ band and proton-neutron interactions in ^{171}Re [J]. Nuclear Physics A, 1993, 551(2): 295-320.
- [9] BENGTTSSON R, FRAUENDORF S. Quasiparticle spectra near the yrast line[J]. Nuclear Physics A, 1979, 327: 139-146.
- [10] ZHU S, GARG U, AFANASJEV A V, et al. Investigation of antimagnetic rotation in ^{100}Pd [J]. Physical Review C, 2001, 64: 041302.

(责任编辑: 竺利波)

(上接第 211 页 Continue from page 211)

- [12] TANG T Q, LI C Y, WU Y H, et al. Impact of the Honk effect on the stability of traffic flow[J]. Phys A, 2011, 390: 3362-3368.
- [13] GE H X, CHENG R J. The "backward looking" effect in the lattice hydrodynamic model[J]. Phys A, 2008, 387: 6952-6958.
- [14] GE H X, ZHENG P J, LO S M, et al. TDGL equation in lattice hydrodynamic model considering driver's physical delay[J]. Nonlinear Dyn, 2014, 76: 441-445.
- [15] GE H X, CUI Y, ZHU K Q, et al. The control method for the lattice hydrodynamic model[J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat, 2015, 22: 903-908.
- [16] GUPTA A K, SHARMA S, REDHU P. Effect of multi-phase optimal velocity function on jamming transition in a lattice hydrodynamic model with passing[J]. Nonlinear Dyn, 2015, 80: 1091-1108.
- [17] REDHU P, GUPTA A K. Delayed-feedback control in a

lattice hydrodynamic model[J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat, 2015, 27: 263-270.

- [18] 薛郁. 优化车流的交通流格子模型[J]. 物理学报, 2004, 53(1): 25-30.
- XUE Y. Lattice models of the optimal traffic current [J], Acta Phys Sin, 2004, 53(1): 25-30.
- [19] GE H X, DAI S Q, XUE Y, et al. Stabilization analysis and modified Korteweg-de Vries equation in a cooperative driving system[J]. Physical Review E, 2005, 71: 66119-66125.
- [20] JIN Y, HU H. Stabilization of traffic flow in optimal velocity model via delayed-feedback control[J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simul, 2013, 18: 1027-1034.

(责任编辑: 陆雁)