

文章编号: 1007-4627(2007)03-0195-05

$A \approx 180$ 质量区偶偶核形状相变研究*

昭日格图, 白洪波, 张进富, 吕立君, 李晓伟

(赤峰学院物理系, 内蒙古赤峰 024001)

摘要: 采用 E-GOS 方法对质子数在 $Z=72-78$ 区的偶偶原子核 $^{170-184}\text{Hf}$, $^{170-184}\text{W}$, $^{170-192}\text{Os}$ 和 $^{176-192}\text{Pt}$ 的集体运动模式和形状相变进行了研究。结果表明, $^{170-184}\text{Hf}$ 和 $^{170-184}\text{W}$ 同位素核的低自旋态趋于 $SU(3)$ 极限, $^{176-192}\text{Pt}$ 和 $^{170-174}\text{Os}$ 同位素核是 $O(6) \rightarrow U(5)$ 的过渡核, 并且基本上都存在角动量驱动的形状相变。

关键词: E-GOS 曲线; 晕带; 形状相变

中图分类号: O571.21 **文献标识码:** A

1 引言

原子核形状相变的研究是核结构研究的重要课题之一。目前已有多个模型和方法对原子核形状变化和共存进行了研究^[1-5]。相互作用玻色子模型 (IBM-1) 是研究原子核集体运动的代数模型^[6], 该模型在处理中重偶偶核集体运动方面取得了极大的成功^[6-17]。在 IBM-1 中, 核子对被近似为角动量为 0 的 s 玻色子和角动量为 2 的 d 玻色子, 这些玻色子自由度张开一个六维空间, 构成 $U(6)$ 群。由群的约化理论知, 该玻色子系统 (即原子核) 具有 $U(5)$, $O(6)$ 和 $SU(3)$ 3 个动力学对称极限, 相应的群链分别为

$$U(6) \supset U(5) \supset SO(5) \supset SO(3), \quad (1)$$

$$U(6) \supset O(6) \supset SO(5) \supset SO(3), \quad (2)$$

$$U(6) \supset SU(3) \supset SO(3). \quad (3)$$

在经典极限下, 具有这些对称性的态分别对应于几何模型的振动、转动和 γ 不稳定转动。显然, 原子核的状态由具有一种对称性演化到具有另一种对称性时, 其形状发生了相变。

目前, 人们在进行理论研究的同时, 还致力寻找具有形状相变的原子核同位素或同中子素以及单个原子核。于是人们对中重原子核系统地进行了重新分析, 但是尚未见到对于 $Z=72-78$ 区的原子核的重新分析的报告。因此, 对 $A \approx 180$ 区 ($Z=72-$

78 区) 的原子核的形状演化进行分析是一个很有意义的课题。另一方面, 在 IBM-1 的基础上, 文献 [18] 提出采用 E-GOS (E-Gamma Over Spin) 的分析方法对原子核形状相变和共存进行研究。本文将采用该方法对质子数在 $Z=72-78$ 区的 $^{170-184}\text{Hf}$, $^{170-184}\text{W}$, $^{170-192}\text{Os}$ 和 $^{176-192}\text{Pt}$ 偶偶核形状相变进行研究。

2 E-GOS 方法

我们知道, 对于理想的振动核, 即经典极限下具有 $U(5)$ 对称性的原子核, 其晕带中角动量 (或称自旋) 为 I 的态的能量为

$$E_1 = \frac{I}{2} \hbar \omega. \quad (4)$$

对于定轴转动核, 即经典极限下具有 $SU(3)$ 对称性的原子核, 其晕态能谱为

$$E_1 = \frac{\hbar^2}{2J} I(I+1), \quad (5)$$

其中 J 为角动量为 I 的晕态的转动惯量。

对于不定轴转动 (或称 γ 软) 原子核, 即经典极限下具有 $O(6)$ 对称性的原子核, 其晕态能谱为

$$E_1 = \frac{I(I+6)}{16} E(2_1), \quad (6)$$

其中 I 为晕态的角动量, $E(2_1)$ 为晕带中第一激发态 (2_1) 的能量。

* 收稿日期: 2006-12-01; 修改日期: 2007-05-30

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10547003); 内蒙古自然科学基金资助项目 (200607010111); 内蒙古教育厅重大项目基金资助项目 (NJ05007)

作者简介: 昭日格图 (1958—), 男 (蒙古族), 内蒙古库仑旗人, 副教授, 从事理论物理研究; E-mail: zhaogrt@sina.com

相应地，振动核的晕带中级联 E2 跃迁的 γ 光子能量为

$$E_{\gamma}^{\text{vibration}}(I \rightarrow I - 2) = \hbar\omega, \quad (7)$$

定轴转动核的晕带中级联 E2 跃迁的 γ 光子能量为

$$E_{\gamma}^{\text{vibration}}(I \rightarrow I - 2) = \frac{\hbar^2}{2J}(4I - 2), \quad (8)$$

不定轴转动(即 γ 软)的晕带中级联 E2 跃迁的 γ 光子能量为

$$E_{\gamma}^{\text{soft}}(I \rightarrow I - 2) = \frac{E(2_1)}{4}(I + 2). \quad (9)$$

为了研究原子核的形状相变，最近，文献[18]提出了 E-GOS 的理论分析方法。所谓的 E-GOS 即 E2 跃迁能量与相应初态自旋(即角动量)的比值

$$R = \frac{E_{\gamma}(I \rightarrow I - 2)}{I}. \quad (10)$$

那么，振动核、定轴转动核、不定轴转动核的 E-GOS 可以分别表示为

$$R^{\text{vibration}}(I \rightarrow I - 2) = \frac{\hbar\omega}{I}, \quad (11)$$

$$R^{\text{rotation}}(I \rightarrow I - 2) = \frac{\hbar^2}{2J}\left(4 - \frac{2}{I}\right), \quad (12)$$

$$R^{\text{soft}}(I \rightarrow I - 2) = \frac{E(2_1)}{4}\left(1 + \frac{2}{I}\right). \quad (13)$$

并且，当自旋 $I \rightarrow \infty$ 时，振动、定轴转动和软转动核的 E-GOS 的极限分别为 $R_{I \rightarrow \infty}^{\text{vibration}} \rightarrow 0$, $R_{I \rightarrow \infty}^{\text{rotation}} \rightarrow 4(\hbar^2/2J)$ 和 $R_{I \rightarrow \infty}^{\text{soft}} \rightarrow E(2_1)/4$ 。这表明，对于振动核，其 E-GOS 随角动量增大按双曲线型减小，当 $I \rightarrow \infty$ 时，该 E-GOS 极限值为 0。对于定轴转动核，其 E-GOS 随角动量增大按双曲线型增大，当 $I \rightarrow \infty$ 时，该 E-GOS 极限值为 $2\hbar^2/J$ 。对于不定轴转动核，其 E-GOS 随角动量增大按双曲线型减小，当 $I \rightarrow \infty$ 时，该 E-GOS 极限值为 $E(2_1)/4$ 。若取第一激发态的能量为 $E(2_1) = 500\text{keV}$ ，则相应的 E-GOS

曲线如图 1 所示。

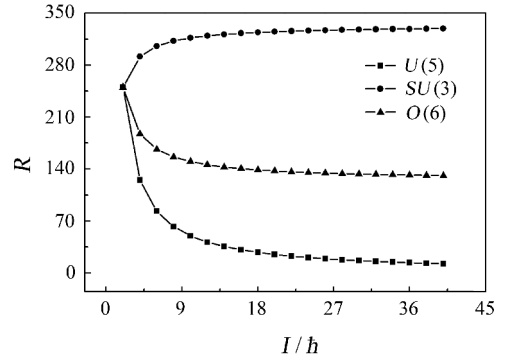


图 1 $U(5)$, $O(6)$ 和 $SU(3)$ 动力学对称极限的 E-GOS 曲线

很显然，不同集体运动模式(即具有不同对称性)的原子核晕带的 E-GOS 随自旋(即角动量)变化的行为不同。据此可以明确区分(或指定)不同的集体运动模式，并确定原子核的形状演化及相变。

3 计算结果和讨论

$A \approx 180$ 质量核具有丰富的结构演化，根据现在得到的能谱数据^[19]，我们系统地分析了 $Z = 72 - 78$ 区原子核 $^{170-184}\text{Hf}$, $^{170-184}\text{W}$, $^{170-192}\text{Os}$ 和 $^{176-192}\text{Pt}$ 的晕带的 E-GOS 实验曲线，所得结果图示于图 2—图 5 中。为明确分析这些原子核的形状演化行为，我们还在图中给出与相应核的第一激发态能量相对应的 $U(5)$, $O(6)$ 和 $SU(3)$ 动力学对称性的 E-GOS 理论曲线。此外，在 $U(5)$, $O(6)$ 和 $SU(3)$ 动力学对称性下，晕带中第二激发态($I = 4$)与第一激发态($I = 2$)的能量间的比值 $R_{4/2} = E(4)/E(2)$ ^[16] 分别取值为 2.0, 2.5 和 $10/3$ 。根据这一差别，人们还常利用比值 $R_{4/2}$ 区分原子核的集体运动模式。为分析上述原子核的集体运动模式，我们将它们的 $R_{4/2}$ 的数值列于表 1 中。

表 1 Hf, W, Os 和 Pt 同位素核的 $R_{4/2} = E(4_1^+)/E(2_1^+)$ 值

原子核	$R_{4/2}$	原子核	$R_{4/2}$	原子核	$R_{4/2}$	原子核	$R_{4/2}$
^{170}Hf	3.19	^{170}W	2.95	^{170}Os	2.62		
^{172}Hf	3.25	^{172}W	3.05	^{172}Os	2.66		
^{174}Hf	3.27	^{174}W	3.15	^{174}Os	2.74		
^{176}Hf	3.28	^{176}W	3.20	^{176}Os	3.00	^{176}Pt	2.14
^{178}Hf	1.59	^{178}W	3.24	^{178}Os	3.02	^{178}Pt	2.51
^{180}Hf	3.25	^{180}W	3.26	^{180}Os	3.09	^{180}Pt	2.68
^{182}Hf	3.29	^{182}W	3.29	^{182}Os	3.15	^{182}Pt	2.71

^{184}Hf	3.26	^{184}W	3.27	^{184}Os	3.20	^{184}Pt	2.67
				^{186}Os	3.16	^{186}Pt	2.56
				^{188}Os	3.08	^{188}Pt	2.53
				^{190}Os	2.93	^{190}Pt	2.49
				^{192}Os	2.82	^{192}Pt	2.48

由图 2 的 E-GOS 曲线和表 1 中的 $R_{4/2}$ 的数值可以知道, $^{170-184}\text{Hf}$ 在自旋 $I < 4 \hbar$ 时接近 $SU(3)$ 极限转动核 (^{178}Hf 除外)。 $^{180-184}\text{Hf}$ 同位素核在 $I \leq 10 \hbar$ 时也基本属于转动核。而 ^{178}Hf 在自旋 $I < 4 \hbar$ 时

接近 $U(5)$ 极限的振动核, 在 $I = 4 \hbar$ 时出现明显的相变, 随着自旋增大趋于 $O(6)$ 极限。 $^{170-176}\text{Hf}$ 4 个核在 $I = 4 \hbar$ 时开始出现相变, 随着自旋增大趋于 $O(6)$ 极限。

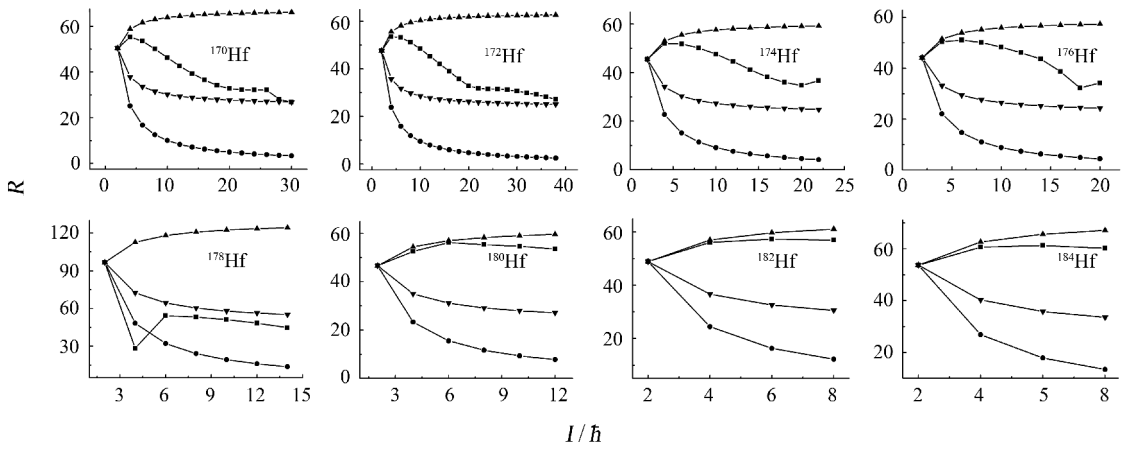


图 2 Hf 核的 E-GOS 曲线

■ Exp., ● $U(5)$, ▲ $SU(3)$, ▼ $O(6)$ 。

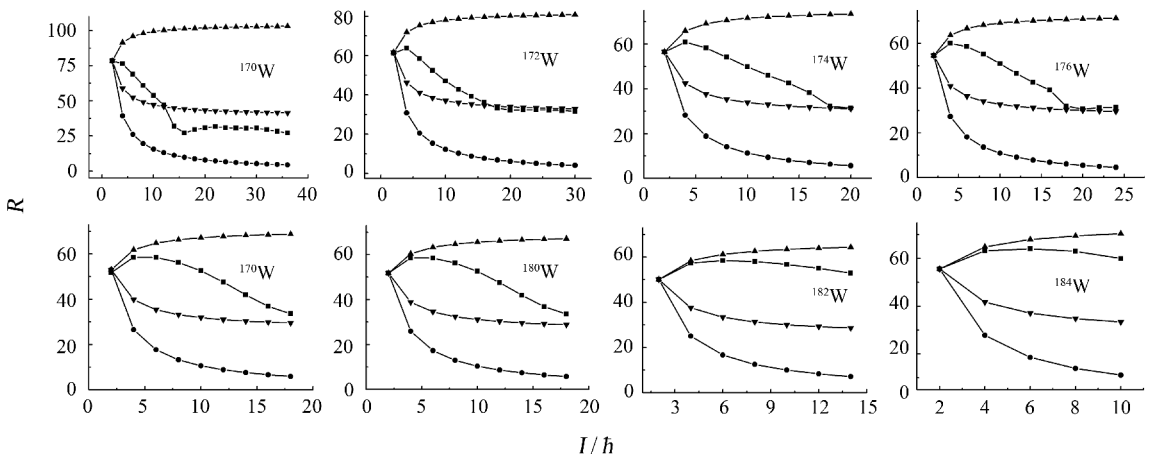


图 3 W 核的 E-GOS 曲线

■ Exp., ● $U(5)$, ▲ $SU(3)$, ▼ $O(6)$ 。

由图 3 的 E-GOS 曲线和表 1 的数据可知, $^{174-184}\text{W}$ 同位素核在 $I = 4 \hbar$ 时开始出现相变, ^{172}W 在 $I = 8 \hbar$ 时出现相变, 且 $^{172-184}\text{W}$ 偶偶同位素核随着中子数的增加不定轴转动的特征逐渐明显。

^{172}Os 发生 $O(6) \rightarrow U(5)$ 相变, 相变点分别在 $I = 14 \hbar$ 和 $I = 16 \hbar$ 处。从 E-GOS 曲线看, $^{174-178}\text{Os}$ 接近 $O(6)$ 对称核。 $^{180-186}\text{Os}$ 的低角动量态接近 $SU(3)$ 核, 而高角动量态接近 $O(6)$ 对称核, 相变点分别在 $I = 14, 8, 16$ 和 $14 \hbar$ 。 $^{188-192}\text{Os}$ 为 $SU(3) \rightarrow O(6)$ 的

由图 4 和表 1 可知, 随角动量增大, ^{170}Os 和

过渡区原子核,但其高角动量态接近 $O(6)$ 对称态。

分析图 5 可知, ^{176}Pt 在 $I \leq 4 \hbar$ 时为很接近 $U(5)$ 对称的振动态,表 1 所示的 $R_{4/2}$ 值也支持这个结论,其较高角动量态为 $U(5) \rightarrow O(6)$ 过渡区的态。

其余 Pt 偶偶同位素的低角动量态基本上都是接近 $O(6)$ 对称(不定轴转动)态,而其较高角动量态为 $O(6) \rightarrow U(5)$ 过渡区的态,并且 $^{190-192}\text{Pt}$ 核在 $I = 12 \hbar$ 以上时很接近 $U(5)$ 对称的振动态。

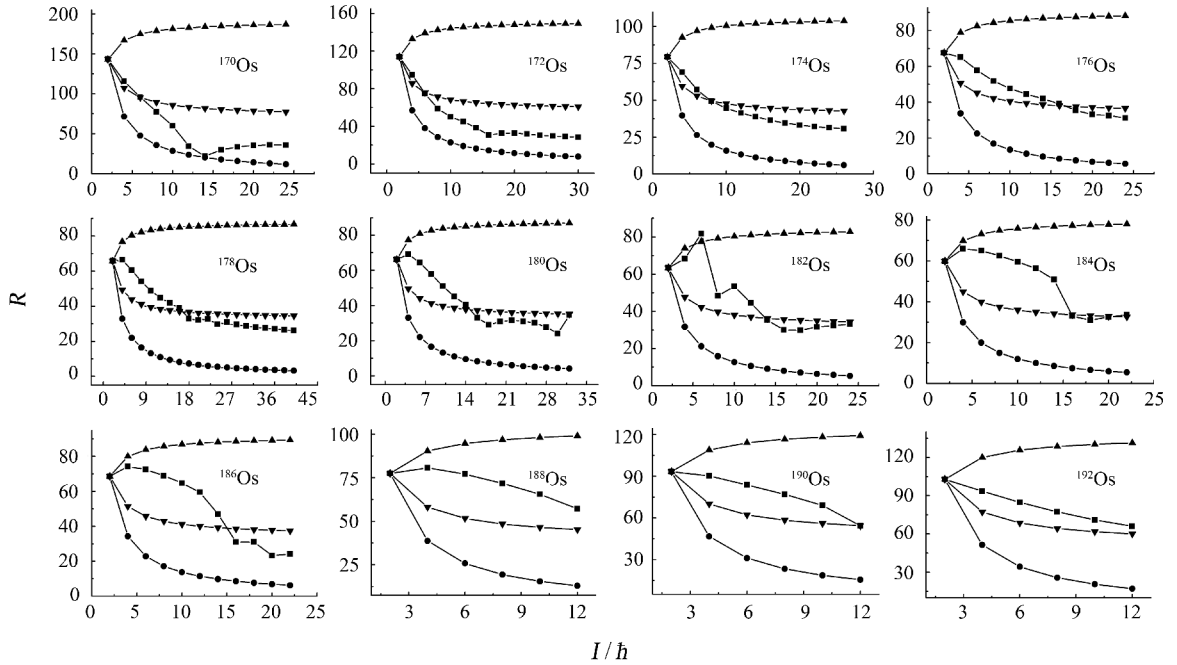


图 4 Os 核的 E-GOS 曲线

■ Exp., ● $U(5)$, ▲ $SU(3)$, ▼ $O(6)$ 。

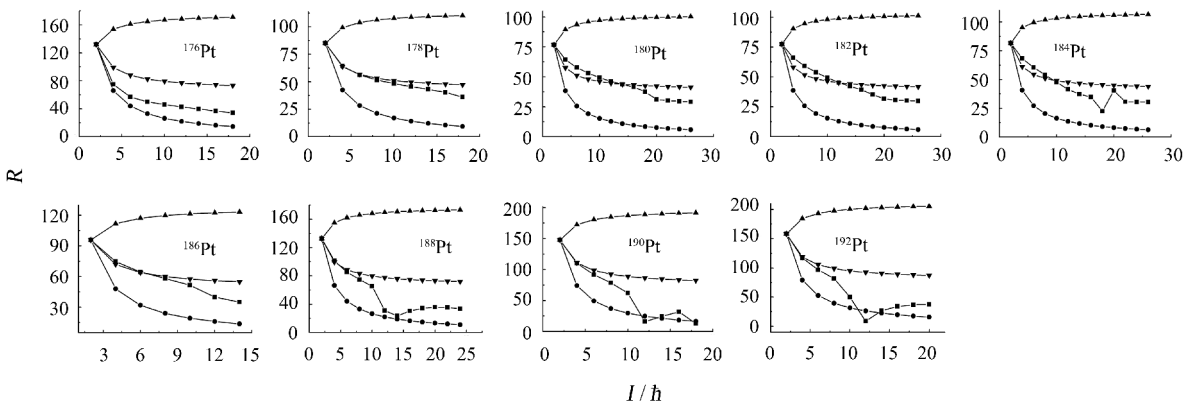


图 5 Pt 核的 E-GOS 曲线

■ Exp., ● $U(5)$, ▲ $SU(3)$, ▼ $O(6)$ 。

4 结论

本文采用 E-GOS 方法对质子数在 $Z = 72-78$ 区的偶偶原子核 $^{170-184}\text{Hf}$, $^{170-184}\text{W}$, $^{170-192}\text{Os}$ 和 $^{176-192}\text{Pt}$ 的集体运动形状及形状相变进行了研究。研究表明,在低自旋时, $^{170-184}\text{Hf}$, $^{170-184}\text{W}$ 接近于 $SU(3)$ 对称态,其高角动量态为 $SU(3) \rightarrow O(6)$ 过渡区的态,并且 $^{172-176}\text{W}$ 的高角动量具有很好的 $O(6)$

对称特征。较轻的 Os 同位素的低角动量态为接近 $O(6)$ 对称的态,高角动量态为 $O(6) \rightarrow U(5)$ 过渡区的态;中等质量的 Os 同位素的低角动量态为接近 $SU(3)$ 对称的 $SU(3) \rightarrow O(6)$ 过渡区的态,高角动量态为接近 $O(6)$ 对称的 $O(6) \rightarrow U(5)$ 过渡区的态;较重的 Os 同位素的态都为 $SU(3) \rightarrow O(6)$ 过渡区的态。Pt 偶偶同位素(除 ^{176}Pt 外)基本上都是低角动

量态很接近 $O(6)$ 对称, 高角动量态处于 $O(6) \rightarrow O(5)$ 过渡区的态。

参考文献 (References):

- [1] Feng P, Draayer J P, Yanan Luo. Phys Lett, 2003, **B576**: 297.
- [2] Liu Y X, Mu L Z, Wei H Q. Phys Lett, 2006, **B633**: 49.
- [3] Mu L Z, Liu Y X. Chin Phys Lett, 2005, **22**: 1 354.
- [4] Zhang J F. HEP & NP(Supp.), 2004, **28**(12): 116(in Chinese).
(张进富. 高能物理与核物理(增刊). 2004, **28**(12): 116.)
- [5] Liu Yuxin, Mu Liangzhu, Chang Lei, *et al.* HEP & NP, 2006, **30**(Supp. II): 29(in Chinese).
(刘玉鑫, 穆良柱, 常 雷等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(增刊 II): 29.)
- [6] Iachello F, Arima A. The Interacting Boson Model. Cambridge: Cambridge University Press, 1987, 8—97.
- [7] Arima A, Iachello F. Ann Phys (N. Y.), 1976, **99**: 253.
- [8] Arima A, Iachello F. Ann Phys (N. Y.), 1978, **111**: 201.
- [9] Arima A, Iachello F. Ann Phys (N. Y.), 1979, **123**: 468.
- [10] Ginocchio J N, Kirson M W. Phys Rev Lett, 1980, **44**: 1 744.
- [11] Dieperink A E L, Scholten O, Iachello F. Phys Rev Lett, 1980, **44**: 1 747.
- [12] Feng D H, Gilmore R, Dean S R. Phys Rev, 1981, **C24**: 1 254.
- [13] Van Isacker P, Chen J Q. Phys Rev, 1981, **C24**: 684.
- [14] Liu Yuxin, Song Jingang, Sun Hongzhou, *et al.* Phys Rev, 1997, **C56**: 1 370; Liu Yuxin, Gao Dongfeng. Phys Rev, 2001, **C63**: 044 317.
- [15] Pan Feng, Dai Lianrong, Luo Yanan, *et al.* Phys Rev, 2003, **C68**: 014 308.
- [16] Zhaorigetu, Bai Hongbo, Zhang Jinfu. Nuclear Physics Review, 2005, **22**(2): 167)(in Chinese).
(昭日格图, 白洪波, 张进富等. 原子核物理评论, 2005, **22**(2): 167.)
- [17] Bai Hongbo, Liu Fengying, Li Yanson, *et al.* Nuclear Physics Review, 2003, **20**(3): 176)(in Chinese).
(白洪波, 刘凤英, 李岩松等. 原子核物理评论, 2003, **20**(3): 176.)
- [18] Regan P H, Beausang C W, Zamfir N Y, *et al.* Phys Rev Lett, 2003, **90**: 152 502.
- [19] Chu S Y, Nordberg H, Firestone R B, *et al.* Isotopes Explorer 2.00: Nuclear Physics Division of the U. S. Department of Energy, 1998.

Shape Phase Transition of Even-even Nuclei in $A \approx 180$ Region^{*}

Zhaorigetu¹⁾, BAI Hong-bo, ZHANG Jin-fu, Lü Li-jun, LI Xiao-wei

(Department of Physics, Chifeng College, Chifeng 024001, Inner Mongolia, China)

Abstract: The E-Gamma Over Spin (E-GOS) analysis method is applied to study the shape phase transition for even-even nuclei $^{170-184}\text{Hf}$, $^{170-184}\text{W}$, $^{170-192}\text{Os}$ and $^{176-192}\text{Pt}$ in $Z = 72-78$ region. It is found that the states with low spins of $^{170-184}\text{Hf}$ and $^{170-184}\text{W}$ even-even isotopes are the ones close to those with $SU(3)$ symmetry. $^{170-192}\text{Os}$ and $^{176-192}\text{Pt}$ isotopes are in the region of $O(6)$ to $U(5)$ transition. Moreover, there exists the shape evolution with increasing spin.

Key words: E-GOS curve; yrast-band; shape phase transition

* Received date: 1 Dec. 2006; Revised date: 30 May 2007

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10547003); National Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (200607010111); Key Scientific Research Fund of Inner Mongolian Educational Bureau (NJ05007)

1) E-mail: zhaortg@sina.com