



^{174}Hf 原子核的 3 轴超形变研究

于少英^{①②④*} 李晓伟^② 沈彩万^{①⑤} 陈永寿^{③④}

(① 湖州师范学院理学院, 湖州 313000; ② 浙江师范大学数理与信息工程学院, 金华 321000;
③ 中国原子能科学研究院, 北京 102413; ④ 中国科学院理论物理所, 北京 100080;
⑤ 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 兰州 730000)

摘要 用 TRS(Total Routhian Surface)方法对 ^{174}Hf 的几个不同组态所对应的形变进行了计算, 结果显示, 壳修正对 ^{174}Hf 3 轴超形变的形成起着极其重要的影响. 对实验发现的几条 3 轴超形变带也得出了可能的组态指定.

关键词 总位能面 3 轴超形变 组态

原子核的 3 轴特性, 最早在 20 世纪 70 年代就由 Mottelson 和 Bohr 预测到^[1], 它是不同于轴对称原子核的一种存在形式. 在一般条件状态下, 所发现的具有 3 轴形变的原子核很少, 这也致使人们对它的特点了解得很少, 同时也激发了我们去研究它的兴趣. 在低自旋状态下的反常旋称分裂^[2], 旋称反转^[3], 手征二重带^[4]等现象, 都与原子核的 3 轴性有关系.

在实验上, 1992 年第一次在 ^{163}Lu 中发现 3 轴超形变带^[5]. 随后, 更多的实验关注原子核 3 轴超形变的研究, 更多的原子核的 3 轴超形变带被发现. 在具有很大的稳定形变的稀土原子核区, 尤其是对 Lu 核的研究, 已经在 $^{161\sim 167}\text{Lu}$ ^[6-9] 这些同位素中发现了二十多条 3 轴超形变带. 在与它相邻的元素 Hf 的一些同位素中也发现多条 3 轴超形变带: ^{168}Hf 中发现了 3 条^[10], ^{170}Hf 中发现了两条^[11,12], ^{174}Hf 中发现了 4 条^[13], ^{175}Hf 中发现了 2 条^[14], 最近在 $^{171,172,173}\text{Hf}$ 中也发现了 3 轴超形变带.

在 UC(Ultimate Cranker)模型的计算中^[15-17]已经预测: 在 $Z \approx 72$, $N \approx 92$ 和 94 区域的原子核应该具有 3 轴超形变. 根据这个预测, 最有可能找到 3 轴超形变的应该是 ^{164}Hf 和 ^{166}Hf . 然而, 到目前为止, 在实验上人们并没有在这两个核中发现 3 轴超形变带, 而是在距离这个区域几个中子的 ^{174}Hf 中发现了 4 条 3 轴超形变带. 通过进一步的计算, 在 $N = 100$ 和 $N = 106$ 的区域发现了新的壳能隙(文献[13]中的图 4), 由于更高 j 轨道的下倾, 促使了这样的壳能隙的形成, 从而解释了在这个区域能够发现 3 轴超形变的原因.

由于在发现 ^{174}Hf 的 4 条 3 轴超形变带的实验中并没有得到准确的 4 极形变和 3 轴形变值, 并且也不能确定各超形变带所对应的组态, 所以本文将应用 TRS 方法, 试图从理论上给出

收稿日期: 2006-07-06; 接受日期: 2006-12-29

国家自然科学基金(批准号: 10575036)和浙江省自然科学基金(批准号: Y604027, Y605476)资助项目

* E-mail: ysy@hutc.zj.cn

^{174}Hf 可能的形变值, 并给出与各形变带对应的组态.

1 方法

在我们的 TRS (Total Routhian Surface) 方法中, 采用 Nilsson 势作为单粒子势. Nilsson 势参数为 κ 和 μ , 其值取自文献[15], 对于对效应的处理采用 BCS 理论 [18], 对能隙参数通过质子和中子的奇偶质量差来计算得出: 对于 ^{174}Hf , 中子壳能隙 $\Delta_n = 0.1219\hbar\omega_0$, 质子壳能隙 $\Delta_p = 0.1255\hbar\omega_0$. 由于在转动核中, 对效应会减弱, 因此, 乘上一个 0.9 的减弱因子, 则 $0.9\Delta_n = 0.1097\hbar\omega_0$, $0.9\Delta_p = 0.1121\hbar\omega_0$.

在势场绕 X 轴转动下, 在其中运动的准粒子的哈密顿量为

$$H^\omega = H_{\text{s.p.}}(\varepsilon_2, \varepsilon_4, \gamma) - \lambda N + D(p + p^+) - \omega j_x, \quad (1)$$

其中 $H_{\text{s.p.}}$ 为静止势场中的单粒子哈密顿量, λ 为化学势, N 为粒子数. 第三项是对力项, 第四项是科里奥利力.

在转动坐标系下, 对给定组态的体系总能量为

$$E(\varepsilon_2, \gamma, \omega) = E_{\text{LD}}(\varepsilon_2, \gamma) + E_{\text{corr}}(\varepsilon_2, \gamma, \omega = 0) + E_{\text{rot}}(\varepsilon_2, \gamma, \omega) + \sum_{i \in cf} e_i^\omega(\varepsilon_2, \gamma), \quad (2)$$

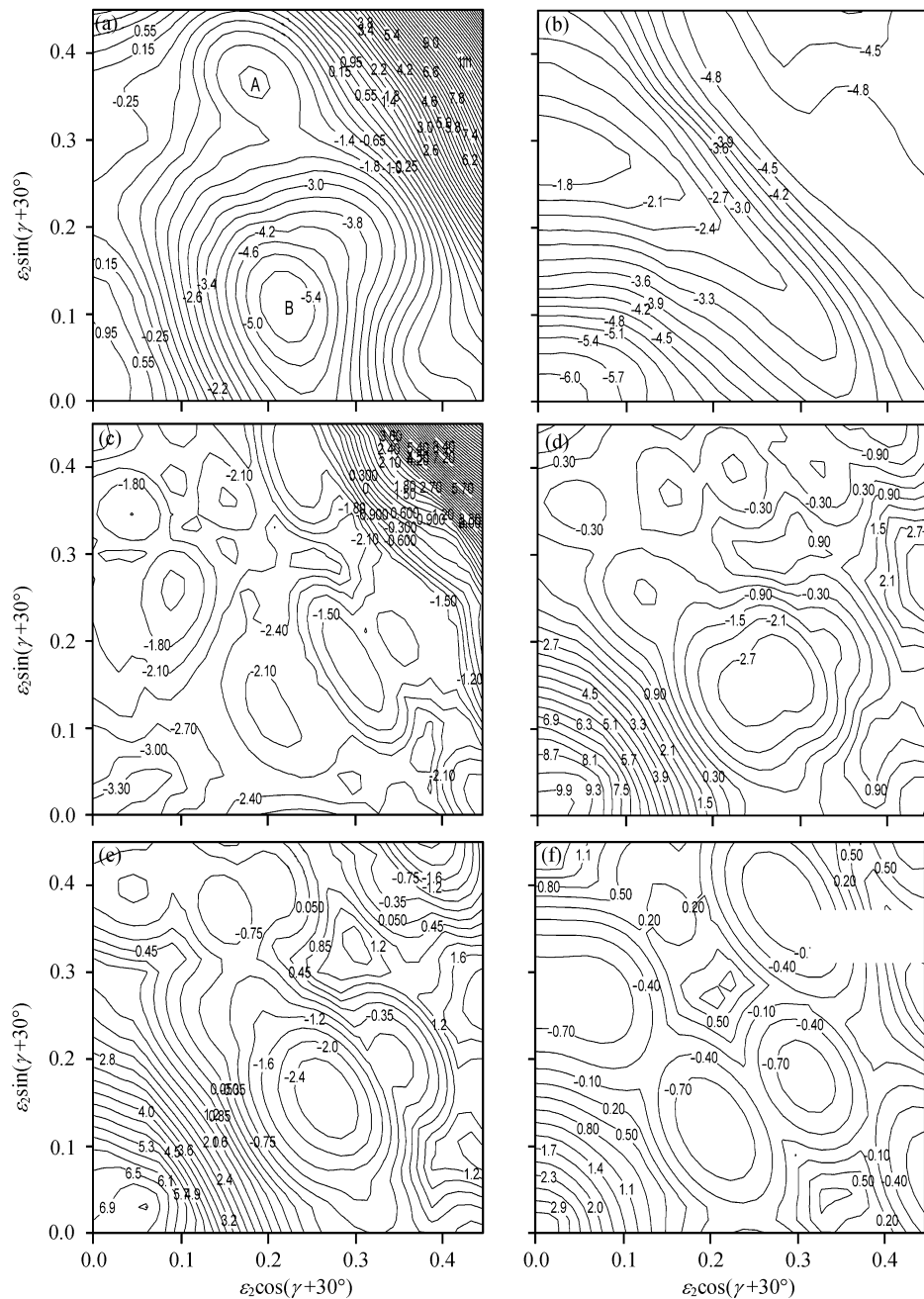
其中 E_{LD} 为液滴能, E_{corr} 为壳修正和对修正能, E_{rot} 为集体转动能. 最后一项为所给组态的所有准粒子能量和. 总能量也是 Z 和 N 的函数, (2) 式中并没有标示出.

2 计算和讨论

对 Lu 的同位素和 ^{170}Hf 核的 3 轴超形变带, 主要是基于至少一个 $i_{13/2}$ 的质子的激发. 而对于具有更多核子的原子核来说, 情况可能会变得更复杂. 例如对于奇 A 核 ^{175}Hf 在实验上发现的两条具有很大转动惯量的高形变带的研究, 一直具有很大争论 [19]. 在对偶偶核 ^{174}Hf 的分析中, 我们根据在实验上发现的 4 条 3 轴超形变带的能级跃迁, 选取距离费米面上面比较近的具有最低能量的几个准粒子组态. 根据实验测得的转动带的 γ 跃迁能量, 本文所确定的转动频率为 $0.05\hbar\omega_0$, $\hbar\omega_0 = 41/A^{1/3}$ (MeV). 由于 16 极形变对能级的影响不是很大, 所以我们固定 ε_4 为 0.03.

针对 ^{174}Hf 核的 TRS 计算结果显示在图 1 中, 各部分能量的位能面图, 转动能(图 1(b))、对修正能(图 1(c))、壳修正能(图 1(d))是组成总的核实能量(图 1(a))的主要部分. 在图 1(a)中, 我们可以看到, 除了一个代表稳定形变的极小值 B 点外, 还存在一个明显的第二极小值 A 点. 显然这个极小值就是稳定 3 轴形变存在的原因. 从图 1(b)~(d)中的能量分布特点来看, 与核实位能面中第二极小值 A 点对应的区域的能量都相对较低, 尤其是转动能. 这是由于我们所选取的较高转动频率 $0.05\hbar\omega_0$, 使得粒子的轨道发生了更大的偏转. 中子壳修正能量(图 1(e))和质子壳修正能量(图 1(f))是总壳修正能量(图 1(d))的组成部分, 我们可以看到中子壳修正起了主要的作用, 这是因为它的能量比质子壳修正的能量更大, 而且在与核实中第二极小值对应的区域处的能量更深, 这应该与 ^{174}Hf 具有更多的中子数有关, 而且这样的规律也与以前研究过的相邻元素 Lu 核的同位素是相似的.

在 TRS 方法中, 总位能面还包括准粒子的那部分能量. 图 2 中的 4 组图就分别对应 4 个不同组态的总位能面图和相应的准粒子能量曲面图. 图 2(a)~(d)分别对应文献[13]中的 TSD1, TSD2, TSD3 和 TSD4 的组态. 通过比较从第一列的 4 个总位能面图可以看出, 它们的差别并

图1 ^{174}Hf 核的总位能面及其各组成部分

(a) 核实部分的 Routhian; (b) 转动能; (c) 对修正能; (d) 总的壳修正能; (e) 中子壳修正能; (f) 质子壳修正能

不是很大, 而且也与图 1 中的核实的位能面图相似. 这说明在费米面附近能量很低的准粒子对原子核形变的影响不会很大. 第二列是与组态对应的准粒子能量曲面图, 其中第一个图是两个质子准粒子能量曲面图, 后面三个是中子准粒子能量曲面图. 从这 4 个图可以看到, 中子准粒子的能量分布相比质子要更复杂一点, 从能量分布的特点看中子准粒子对 3 轴形变的产生可能会起到促进的作用. 不过, 起关键作用的还应该是转动能和壳修正能等因素.

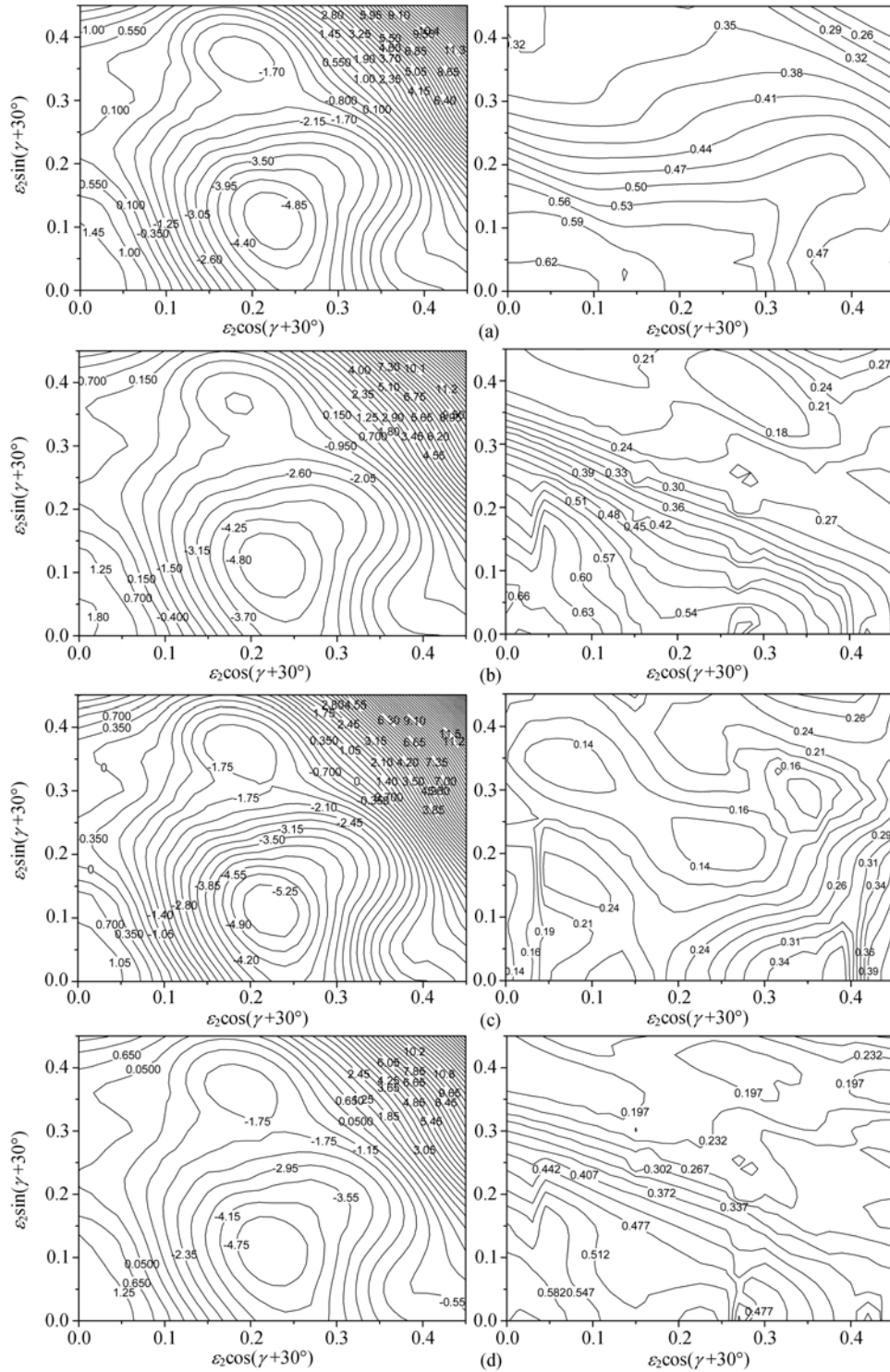


图 2 考虑准粒子组态后的总位能面图及准粒子能量

(a) configuration: $(\pi[651]3/2, \alpha=1/2) \otimes (\pi[514]9/2, \alpha=-1/2)$; (b) configuration: $(\nu[633]7/2, \alpha=1/2) \otimes (\nu[640]1/2, \alpha=-1/2)$; (c) configuration: $(\nu[633]7/2, \alpha=1/2) \otimes (\nu[512]5/2, \alpha=1/2)$; (d) configuration: $(\nu[633]7/2, \alpha=-1/2) \otimes (\nu[640]1/2, \alpha=-1/2)$. 第一列是各组态的总位能面图, 第二列是对应组态的准粒子位能面图.

图2中的4个组态对应的是费米面上面最低的4个组态组合,也就可能对应实验上发现的4个TSD带. 根据4个组态总位能面中的第二极小值点的位置,可以确定各对应的形变值. 从4个图上可以看到,各极小值对应的形变值相差不大,对应形变值 $\varepsilon_2 \approx 0.41$, $\gamma \approx 33^\circ$,这是与实验预测的结果相吻合的[13].

3 结论

利用 TRS 方法我们对 ^{174}Hf 作了详细计算,得到总位能面图,证实了在 ^{174}Hf 中3轴超形变存在的可能性. 与 Lu 核相似,壳修正在3轴超形变的形成中起着关键作用,特别是中子壳修正. 从可能对应实验上发现的4条3轴超形变带的组态的总位能面上,得到对应的形变值 $\varepsilon_2 \approx 0.41$, $\gamma \approx 33^\circ$.

参 考 文 献

- 1 Bohr A, Mottelson B R. Nuclear Structure, vol II. New York: Benjamin, 1975. 175—198
- 2 Hamamoto I, Sagama H. Triaxial deformation in odd-Z light rare-earth nuclei. Phys Lett B, 1988, 201: 415—419[DOI]
- 3 Bengtsson R, Frisk R, May R F, et al. Signature inversion—A fingerprint of triaxiality. Nucl Phys A, 1984, 415: 189—214[DOI]
- 4 Starosta K, Koike T, Chiara C J, et al. Chiral doublet structures in odd-odd $N=75$ isotones: Chiral vibrations. Phys Rev Lett, 2001, 86: 971—974[DOI]
- 5 Schnack-Petersen H, Bengtsson R, Bark R A, et al. Superdeformed triaxial bands in $^{163,165}\text{Lu}$. Nucl Phys A, 1995, 594: 175—202[DOI]
- 6 Bringel P, Hubel H, Amro H, et al. First evidence for superdeformation in ^{161}Lu and ^{162}Lu . Eur Phys J A, 2003, 16: 155—158[DOI]
- 7 Törmänen S, Ødegård S W, Hagemann G B, et al. Triaxial superdeformed bands in ^{164}Lu and enhanced E1 decay-out Strength. Phys Lett B, 1999, 454: 8—14[DOI]
- 8 Yang C X, Wu X G, Zheng H, et al. Superdeformed exiaxial band in ^{167}Lu . Eur Phys J A, 1998, 1: 237—239[DOI]
- 9 Amro H, Ma W C, Hagemann G B, et al. The wobbling mode in ^{167}Lu . Phys Lett B, 2003, 553: 197—203[DOI]
- 10 Amro H, Narmette P G, Ma W C, et al. First evidence for triaxial superdeformation in ^{168}Hf . Phys Lett B, 2001, 506: 39—44[DOI]
- 11 Neuber A, Hubel H, Hangemann G B, et al. First triaxial superdeformed band in ^{170}Hf . Eur Phys J A, 2002, 15: 439—441[DOI]
- 12 Neuber-Neffgen A, Hubel H, Bringel P, et al. Triaxial superdeformed and normal-deformed high-spin band structure in ^{170}Hf . Phys Rev C, 2006, 73: 034309[DOI]
- 13 Djongolov M K, Hartley D J, Riedinger L L, et al. Extending the region of triaxial superdeformation: Candidate TSD bands in ^{174}Hf . Phys Lett B, 2003, 560: 24—30[DOI]
- 14 Scholes D T, Cullen D M, Kondev F G, et al. Highly deformed Bands in ^{175}Hf . Phys Rev C, 2004, 70: 054314[DOI]
- 15 Bengtsson T, Ragnarsson I. Rotational bands and particle-hole excitations at very high spin. Nucl Phys A, 1985, 436: 14—82[DOI]
- 16 Bengtsson T. The high-spin structure of ^{158}Er : A theoretical study. Nucl Phys A, 1991, 512: 124—148
- 17 Bengtsson R, Bengtsson T, Bergström M, et al. On the use of spin adiabatic energy surface: Applications to the description of rotational bands in $^{171,172}\text{W}$. Nucl Phys A, 1994, 569: 469—509[DOI]
- 18 Bohr A, Mottelson B R, Pines D. Possible analogy between the excitation spectra of nuclei and those of the superconducting metallic state. Phys Rev, 1958, 110: 936—939
- 19 Walker P M, Xu F R, Cullen D M. Prolate shape coexistence at high spin in ^{175}Hf . Phys Rev C, 2005, 71: 067303[DOI]