



$^{187,189}\text{Tl}$ 的原子核形状研究

刘艳鑫^①, 于少英^{①②③*}, 沈彩万^{①④}, 董永胜^{①③⑤}

① 湖州师范学院理学院, 湖州 313000;

② 中国科学院理论物理研究所, 北京 100190;

③ 浙江师范大学数理信息学院, 金华 321000;

④ 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 兰州 730000;

⑤ 集宁师范高等专科学校物理系, 集宁 012000

* 联系人, E-mail: ysy@hutc.zj.cn

收稿日期: 2008-10-11; 接受日期: 2008-12-22

国家自然科学基金(批准号: 10575036, 10675046)、浙江省自然科学基金(编号: Y605476, Y604027)和浙江省教育厅科研项目(编号: 20060313)资助

摘要 从理论上研究了 $^{187,189}\text{Tl}$ 的原子核形状, 形变和对力由形状对关联自洽方法处理. 通过理论计算给出了总的位能面(TRS), 单粒子能量由形变的 Woods-Saxon 势得到, 对力由 Lipkin-Nogami(LN)方法处理. 实验结果在计算中得到了很好的重现. 集体扁椭球转动和高 K 长椭球转动同时存在于 $^{187,189}\text{Tl}$ 原子核中, 计算中还预言了超形变长椭球形状的形变参数, 分析了原子核转动惯量变化的微观机制, 对 $^{187,189}\text{Tl}$ 原子核的形状的形成和演化给出了一些理论解释.

关键词

原子核形状
扁椭球转动
长椭球形状

在 $Z=82$ 闭壳附近的缺中子核表现出有趣的结构性质, 特别是在缺中子 Hg-Pb 区, 理论和实验都显示有丰富的长椭球和扁椭球形状共存, 一直得到实验家的高度关注. 2004 年, Dracoulis 等人^[1]对 ^{188}Pb 原子核的 $K=8$ 和 $K=11$ 同质异能态进行了实验研究, 给出了 ^{188}Pb 原子核形状共存的实验事实. 关于原子核形状共存问题同时也引起了理论家的兴趣. 早在 2001 年, 许甫荣教授就预言了 ^{187}Tl 原子核的扁椭球同质异能态^[2]. 而这一预言在 2005 年被 Chamoli 等人的实验所证实^[3]. 本工作所讨论的 $^{187,189}\text{Tl}$ 原子核恰好处于缺中子 Hg-Pb 区, 在结构上也存在形状共存现象. 这些核有基于负宇称 $\pi h_{9/2}(K=9/2^-)$ 带和正宇称 $i_{13/2}(K=13/2^+)$ 带的扁椭球基态, 在较高的激发能的情况下, 表现出正常形变的长椭球结构($\beta_2 \approx 0.2 \sim 0.3$), 在更高的激发能下, 还表现出超形变结构($\beta_2 \approx 0.5 \sim 0.6$).

对于正常形变的长椭球形状, 质子的费米面分别在 $h_{9/2}(K=1/2, 3/2)$ 和 $i_{13/2}(K=1/2)$ 带的低 k 轨道以下, 在高 $K=9/2$ 和 $13/2$ 轨道以上. 因此, 在费米面以上的高 j 低 k 闯入态使原子核趋于更高形变的长椭球形状, 同时, 在费米面以下的高 k 闯入态使原子核趋于扁椭球形状^[4]. 因此, 在这一核区的原子核在结构上展现出丰富的形状共存现象, 在低自旋区, 在偶偶核 $^{180-190}\text{Hg}$ ^[5-14] 和 $^{186-188}\text{Pb}$ ^[15,16] 同位素中都观察到了原子核形状共存现象. 研究偶偶核中对产生这种形状共存现象有贡献的轨道的类型的最好方法就是研究其相邻的奇质量核, 用奇核子作为探针. 因此, 研究高自旋态下在 Tl 原子核中观察到的形状共存和长椭球形状的内秉结构显得尤为重要. 本工作采用基于 Woods-Saxon 推转壳模型对 $^{187,189}\text{Tl}$ 进行了总位能面 (TRS) 计算.

1 理论模型简介

本文中, 我们采用建立在宏观-微观模型基础上的 TRS 计算方法研究了 $^{187,189}\text{Tl}$ 的形状的形成和演化, 单粒子能量由形变的 Woods-Saxon 势得到^[17], 对力由近似粒子数守恒的 Lipkin-Nogami (LN) 方法处理^[18], 对力强度为 G , 由平均对能隙方法决定^[19]. 以形变参数作为变量的总的位能面 (TRS) 由 Strutinsky 方法得到, 详细讨论可参考文献[20~23],

$$E^{\omega}(Z, N, \hat{\beta}) = E_{\text{macr}}^{\omega}(Z, N, \hat{\beta}) + \delta E_{\text{shell}}^{\omega}(Z, N, \hat{\beta}) + \delta E_{\text{pair}}^{\omega}(Z, N, \hat{\beta}), \quad (1)$$

右边第一项表示由液滴模型处理的宏观能量, 单粒子壳修正和对修正能量分别由 $\delta E_{\text{shell}}^{\omega}$ 和 $\delta E_{\text{pair}}^{\omega}$ 给出^[24].

本文在变化的 β_4 的 (β_2, γ) 格点上计算. 对于给定的转动频率, 对力可以通过求解在给定形变格点的推转的 LN 方程自洽处理, 平衡形变值通过将 TRS 最小化得到^[25,26].

2 结果和讨论

图 1 给出了 $^{187,189}\text{Tl}$ 的负宇称带的 TRS 计算结果, 从图中可以看出对于负宇称正旋称 $h_{9/2}$ 带, 当转

动频率 $\hbar\omega \approx 0.00 \text{ MeV}$ 时, 原子核呈现扁椭球形状, 其形变值是: 对于 ^{187}Tl , $\beta_2 \approx 0.17$, $\beta_4 \approx -0.003$, $\gamma = -61.2^\circ$, 对于 ^{189}Tl $\beta_2 \approx 0.17$, $\beta_4 \approx -0.01$, $\gamma = -60^\circ$, 理论计算结果与实验结果符合得很好. 随着转动频率 ω 的增加, 原子核形状由扁椭球形状变化为长椭球形状, 图 2 给出了原子核形状的这种变化. 从图 2 中可以看出, 当转动频率 $\hbar\omega \approx 0.45 \text{ MeV}$ 时, 对于负宇称正旋称 $h_{9/2}$ 带, 原子核呈现超形变长椭球形状, 其形变值分别为对于 ^{187}Tl , $\beta_2 \approx 0.43$, $\beta_4 \approx 0.045$, $\gamma = 0.7^\circ$, 对于 ^{189}Tl , $\beta_2 \approx 0.43$, $\beta_4 \approx 0.035$, $\gamma = -0.1^\circ$. 计算结果表明, 在不同的转动频率下, $^{187,189}\text{Tl}$ 原子核呈现出两种不同的形状特征.

为了进一步解释原子核的这种形状特征, 本文计算了转动惯量 $J^{(1)}$ 随着转动频率的变化关系, 如图 3 所示. 图 3 的计算结果表明, 当 $\hbar\omega \leq 0.25 \text{ MeV}$ 时, $^{187,189}\text{Tl}$ 的转动惯量 $J^{(1)}$ 随着转动频率的增大而减小, 此时, 质子的转动惯量对于总的转动惯量的贡献较大, 主要是因为质子占据了费米面附近的高 K 轨道, 使原子核趋于扁椭球形状. 当 $\hbar\omega > 0.25 \text{ MeV}$ 时, 转动惯量随着转动频率的增大迅速增加, 此时, 中子的转动惯量对总的转动惯量的贡献占了主导地位, 这主要是因为随着转动频率的增加, $^{187,189}\text{Tl}$ 的 $h_{9/2}$ 带的

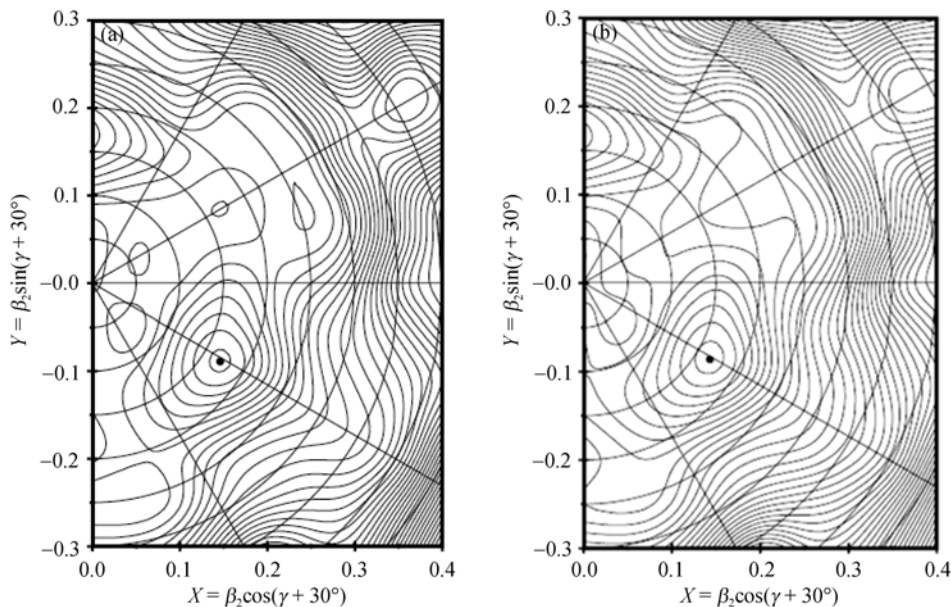


图 1 在转动频率 $\hbar\omega \approx 0.00 \text{ MeV}$ 时 $^{187,189}\text{Tl}$ 的 TRS 图

(a) $N=106$ 同位素的 TRS 图; (b) $N=108$ 的同位素的 TRS 图, 图中能量最低点用黑点标出

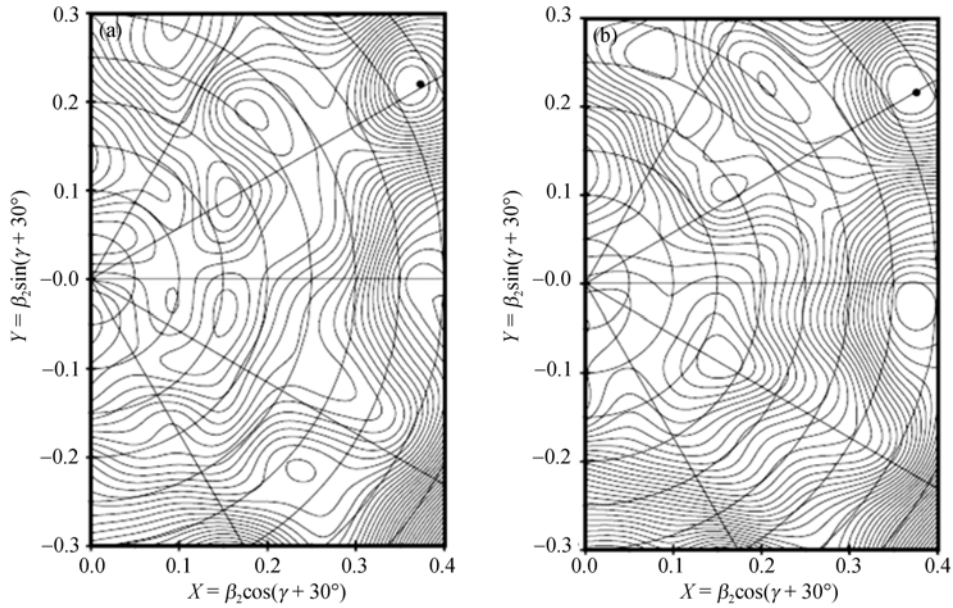


图 2 在转动频率 $\hbar\omega \approx 0.45$ MeV 时 $^{187,189}\text{Tl}$ 的 TRS 图

(a) $N=106$ 同位素的 TRS 图; (b) $N=108$ 的同位素的 TRS 图, 图中能量最低点用黑点标出

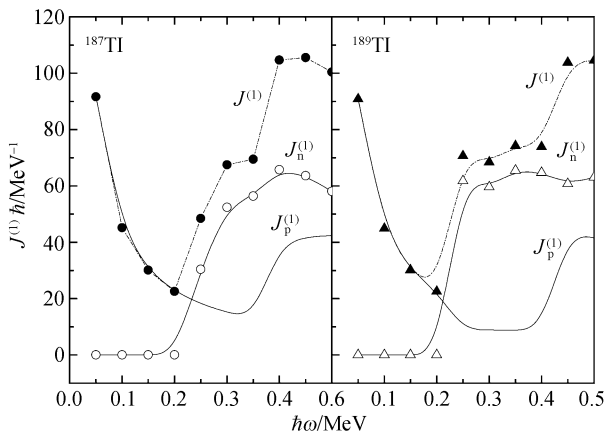


图 3 转动惯量随着转动频率的变化

$J_n^{(1)}$ 和 $J_p^{(1)}$ 分别表示来自中子和质子的贡献

一对 $i_{13/2}$ 中子在 $\hbar\omega \approx 0.25$ MeV 附近发生了顺排, 这种顺排从图 4 的单准中子图中也可以看出. 当转动频率达到 0.4 MeV 时, $J_p^{(1)}$ 突然增加, 这是当奇质子从扁椭到长椭变化轨道时, 长椭球带与基态扁椭球带混合所导致.

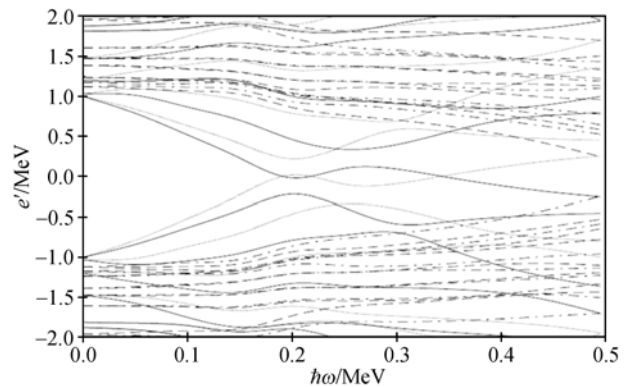


图 4 $N=106$ 同位素的单准中子能量

3 结论

总之, TRS 计算给出了原子核处于不同形状时的形变参数 β_2 , β_4 和 γ 的值, 实验结果在 TRS 计算中得到了很好地重现. 计算结果表明, 在不同的转动频率下, 原子核呈现扁椭球和长椭球形状. 本文详细分析了转动惯量随转动频率的变化关系, 当原子核从一种形状变化到另一种形状时, 转动惯量也会发生很大的变化, 也就是说, 计算中得到的超形变带实际上是形状相变带.

致谢 非常感谢北京大学许甫荣教授和刘红亮博士对本工作的指导, 并提供相应的计算程序.

参考文献

- 1 Dracoulis G D, Lane G J, Byrne A P, et al. Spectroscopy of $^{188}\text{Pb}_{106}$: Evidence for shape coexistence. *Phys Rev C*, 2004, 69: 054318-1—22
- 2 Xu F R. Well-deformed oblate K isomers induced by oblate intruder states. *Chin Phys Lett*, 2001, 18: 750—752[DOI]
- 3 Chamoli S K, Joshi P, Kumar A, et al. Shape coexistence and lifetime measurement in ^{187}Tl nucleus. *Phys Rev C*, 2005, 71: 054324-1—9
- 4 Chamoli S K, Kumar R, Govil I M. Experimental study of shape coexistence in ^{189}Tl . *Phys Rev C*, 2007, 75: 054323-1—6
- 5 Proetel D, Diamond R M, Stephens F S. Nuclear deformations in ^{186}Hg from lifetime measurements. *Phys Lett B*, 1974, 48: 102—104[DOI]
- 6 Béraud R, Meyer M, Desthuilliers M G, et al. Band crossing in ^{186}Hg . *Nucl Phys A*, 1977, 284: 221—238[DOI]
- 7 Cole J D, Ramayya A V, Hamilton J H, et al. Shape coexistence in ^{186}Hg and the decay of ^{186}Tl . *Phys Rev C*, 1977, 16: 2010—2018[DOI]
- 8 Janssens R V F, Chowdhury P, Emling H, et al. Aligned ν $i_{13/2}$ bands coupled to different shapes in ^{186}Hg . *Phys Lett B*, 1983, 131: 35—39[DOI]
- 9 Ma W C, Ramayya A V, Hamilton J H, et al. The structure of high spin states in ^{184}Hg and ^{186}Hg . *Phys Lett B*, 1986, 167: 277—282[DOI]
- 10 Porquet M G, Bastin G, Bourgeois C, et al. High-spin study of ^{186}Hg . *J Phys G-Nucl Part Phys*, 1992, 18: L29—L36[DOI]
- 11 Dracoulis G D, Stuchbery A E, Macchiavelli A O, et al. Shape co-existence in ^{180}Hg and delineation of the midshell minimum. *Phys Lett B*, 1988, 208: 365—368[DOI]
- 12 Ma W C, Ramayya A V, Hamilton J H, et al. Ground state shape and crossing of near spherical and deformed bands in ^{182}Hg . *Phys Lett B*, 1984, 139: 276—278[DOI]
- 13 Rud N, Ward D, Andrews H R, et al. Lifetimes in the Ground-State Band of ^{184}Hg . *Phys Rev Lett*, 1973, 31: 1421—1423[DOI]
- 14 Hamilton J H, Ramayya A V, Bosworth E L, et al. Crossing of near-spherical and deformed bands in $^{186,188}\text{Hg}$ and new isotopes $^{186,188}\text{Tl}$. *Phys Rev Lett*, 1975, 35: 562—565[DOI]
- 15 Baxter A M, Byrne A P, Dracoulis G D, et al. Spectroscopy of ^{186}Pb with mass identification. *Phys Rev C*, 1993, 48: R2140—R2143[DOI]
- 16 Janssens R V F, Bearden I G, Henry R G, et al. Evidence for low-lying prolate bands in ^{188}Pb and ^{186}Pb . *Phys Lett B*, 1993, 302: 390—395[DOI]
- 17 Nazarewicz W, Dudek J, Bengtsson R, et al. Microscopic study of the high-spin behaviour in selected $A \approx 80$ nuclei. *Nucl Phys A*, 1985, 435: 397—447[DOI]
- 18 Pradhan H C, Nogami Y, Law J. Study of approximations in the nuclear pairing-force problem. *Nucl Phys A*, 1973, 201: 357—368[DOI]
- 19 Möller P, Nix J R. Nuclear pairing models. *Nucl Phys A*, 1992, 536: 20—60[DOI]
- 20 Bengtsson R, Larsson S E, Leander G, et al. Yrast bands and high-spin potential-energy surfaces. *Phys Lett B*, 1975, 57: 301—305[DOI]
- 21 Neergård K, Pashkevich V V. Shell corrections to the deformation energies of very high spin nuclei ($I \leq 100$). *Phys Lett B*, 1975, 59: 218—222[DOI]
- 22 Neergård K, Pashkevich V V, Frauendorf S. Shell energies of rapidly rotating nuclei. *Nucl Phys A*, 1976, 262: 61—90[DOI]
- 23 Andersson C G, Larsson S E, Leander G A, et al. Nuclear shell structure at very high angular momentum. *Nucl Phys A*, 1976, 268: 205—256[DOI]
- 24 Nazarewicz W, Wyss R, Johnson A. Structure of superdeformed bands in the $A \approx 50$ mass region. *Nucl Phys A*, 1989, 503: 285—330[DOI]
- 25 Satula W, Wyss R, Magierski P. The Lipkin-Nogami formalism for the cranked mean field. *Nucl Phys A*, 1994, 578: 45—61[DOI]
- 26 Satula W, Wyss R. Extended mean field description of deformed states in neutron deficient Cd- and Sn-nuclei. *Phys Scr T*, 1995, 56: 159—166[DOI]