

^{130}Ce 的 $K^\pi = 7^-$ 同核异能态的形状研究*

刘红亮¹ 许甫荣^{1,2,3;1)}

1(北京大学物理学院教育部重离子物理重点实验室 北京 100871)

2(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

3(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 用组态限制的方法研究了 ^{130}Ce 的 $K^\pi = 7^-$ 同核异能态的形状. 计算的激发能与实验值很好地符合. 计算得到的形变表明这个同核异能态具有大小和基态大致一样的长椭球形状. 不过, 它的势能面在 γ 自由度上非常软, 这很可能是导致其 K 混合的原因.

关键词 同核异能态 四极矩 形状 组态限制计算

1 引言

原子核虽然是个很微观的系统, 但能呈现出多种多样的形状, 如球形、长椭球、扁椭球、三轴形变以及八极形变等. 而且多种形状可以共存于一个核中, 一个典型的例子是 ^{186}Pb , 在这个核里发现了罕见的球形、长椭球和扁椭球共存的现象^[1]. 原子核的形状还会随着角动量、激发能以及组态的变化而变化, 比如某些原子核在高角动量时出现新的形状(参见如文献[2]), ^{186}Os 的多准粒子态出现明显的三轴形变^[3]. 形变也是影响原子核其他性质的一个重要因素, 比如轴对称形变有利于形成高 K 同核异能态^[4]. 实际上形状本身也是原子核形成亚稳态的一种机制, 即形状同核异能态^[4].

通过对原子核形变的研究, 可以获得其内部的结构信息和探讨形变对于其他性质的影响. 实验上最直接的方法就是测量电四极矩. 文献[5]的工作用时间微分扰动角分布(TDPAD)的方法测量了 ^{130}Ce 的 $K^\pi = 7^-$ 同核异能态的四极矩. 然而从这个测量的四极矩提取出来的 β_2 形变为 0.16, 明显小于基态带的 β_2 形变(约 0.26). 该文作者认为这可能是形状极化导致的. 如果假定这个同核异能态的形变等于基态带的形变, 则推得这个同核异能态的 K 量子数的平均值为 6. 也就是说, 这个高 K 同核异能态有 K 混合. 文献[5]提

出导致 K 混合可能的原因是三轴形变或者科里奥利相互作用. 为了了解这个同核异能态的形状, 我们用组态限制的方法^[6] 计算了 ^{130}Ce 的基态和 $K^\pi = 7^-$ 态的势能面和内禀四极矩.

2 模型

这个方法是建立在对标准的液滴模型^[7] 用 Strutinsky 方法^[8] 做壳修正的框架上. 单粒子能级由 Woods-Saxon(WS) 势^[9] 得到. 为了避免 BCS 模型中的对崩溃现象, 我们采用能实现近似粒子数守恒的 Lipkin-Nogami(LN) 方法^[10] 处理单极对力. 对力强度(G) 首先由平均对隙方法^[11] 得到, 然后用五点方程^[11] 通过重现实验的奇偶质量差而调整. 具体的调 G 方法及原因参见文献[6]. 总的能量由宏观和微观两部分组成: 宏观部分由使用原参数的液滴模型^[7] 得到; 微观部分由 Strutinsky 壳修正^[8] 得到, 即 $\delta E_{\text{shell}} = E_{\text{LN}} - \tilde{E}_{\text{strut}}$. E_{LN} 是由 LN 方法计算得到的组态能量, 表示为

$$E_{\text{LN}} = \sum_{j=1}^S e_{k_j} + \sum_{k \neq k_j} 2V_k^2 e_k - \frac{\Delta^2}{G} - G \sum_{k \neq k_j} V_k^4 + G \frac{N-S}{2} - 4\lambda_2 \sum_{k \neq k_j} (U_k V_k)^2,$$

* 国家自然科学基金(10525520, 10475002)资助

1) E-mail: frxu@pku.edu.cn

表 1 计算的基态和 $K^\pi = 7^-$ 态的形变, 内禀四极矩和激发能. 实验值取自文献[5].

configuration	β_2	β_4	$ \gamma $	γ -soft -ness [†]	Q_0/eb		E_x/keV	
					cal.	expt.	cal.	expt.
g.s.	0.23	-0.008	0°	13°	4.53			
$7_a^- \{v7/2^- [523] \otimes v7/2^+ [404]\}$	0.22	-0.005	2°	16°	4.22	2.65	2503	2454
$7_b^- \{v5/2^+ [402] \otimes v9/2^- [514]\}$	0.24	-0.025	0°	8°	4.85		2407	

[†] γ 软度定义为沿势能面的 γ 自由度从极小值点到极小值点上 100keV 的距离.

其中 S 是不配对的中子或质子的数目 (即标记为 k_j 的被阻塞的中子或质子的轨道数目), N 是中子或质子数, λ_2 是 LN 方法中引入的用来压低粒子数起伏的拉格朗日乘子. 总能量在 $(\beta_2, \gamma, \beta_4)$ 空间的每一个格点计算出来即可得给定组态的势能面. 所谓组态限制, 就是在这整个形变空间里总是阻塞标记为 k_j 的核子轨道, 保持组态不变. 这可以通过计算和跟踪被阻塞轨道的平均 Nilsson 量子数实现^[6]. 原子核的能量和形变对应于势能面的最小值点. 这是一个形变自洽的计算, 可以正确地处理不成对核子导致的形状极化. 此外, 由 $Q_0 = \sum_{j=1}^S q_k + \sum_{k \neq k_j} 2V_k^2 q_k$ (其中 q_k 是用 WS 波函数计算的单质子的四极矩) 可以得到给定组态的内禀四极矩. 对于形变是轴对称的情况, Q_0 通过 $Q_s = Q_0[3K^2 - I(I+1)] / [(2I+3)(I+1)]$ 转化为 Q_s , 从而可以直接和实验测量的四极矩进行比较, 或者反过来进行.

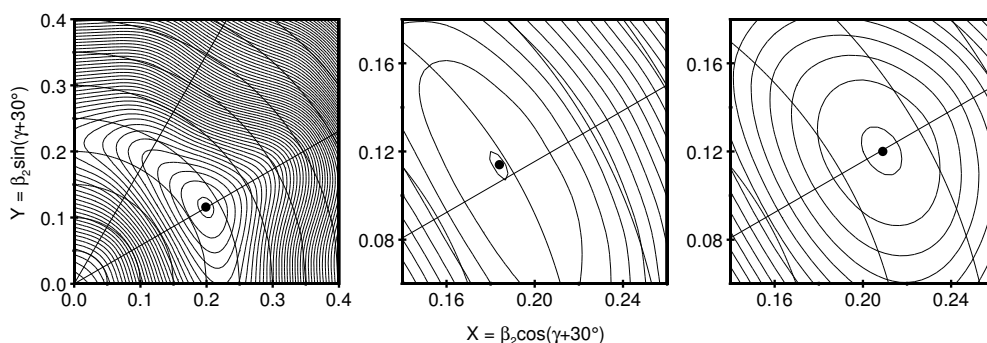
3 结果和讨论

计算结果总结在表 1 中. 图 1 给出了对应的 (β_2, γ) 平面上的势能面图. 计算的基态形变 $\beta_2 = 0.23$, $\gamma = 0^\circ$ 与实验上通过测量平均寿命得到的基态带的 2^+ 态的形变 $\beta_2 = 0.25$, $\gamma = 0^\circ$ ^[12] 很好地符合. 文献[12]第一次发现了 ^{130}Ce 的 $K^\pi = 7^-$ 同核异能态, 并给出组态为 $v7/2^- [523] \otimes v7/2^+ [404]$. 这个态的自旋在文献[5]的实验中进一步证实. 我们用组态限制方法计算的激

发能与实验测量值一致. 不过, 我们发现另一个组态 $v5/2^+ [402] \otimes v9/2^- [514]$ 也可以耦合成一个 $K^\pi = 7^-$ 的态, 而且能量与前一个很接近. 这两个态应该会发生严重的混合, 对此我们在这里不作处理. 但这并不影响计算值与实验值的比较, 实际上我们的计算里没有考虑自旋-自旋相互作用和零点转动能, 这可以带来 300keV 左右的变化. 从表 1 可以清楚地看到, 这两个 7^- 态的形变几乎和基态的一样, 没有出现文献[5]中提出的形状极化, 并且这两个 7^- 态都没有出现稳定的 γ 形变. 从内禀四极矩作更直接的比较, 我们发现计算的两个 7^- 态的内禀四极矩都明显大于由实验测量值抽取出来的内禀四极矩.

这样, 我们的计算结果表明 $K^\pi = 7^-$ 同核异能态具有大小和基态相近的长椭球形状. 不过, 我们发现 ^{130}Ce 的基态和 7_a^- 态在 γ 自由度上非常地软. 表 1 和图 1 都清楚地显示了这一点, 从中可以看到 7_a^- 态甚至比基态更软. 此外, 文献[13, 14]的研究表明 ^{130}Ce 的有效 γ 形变 (依赖于模型的一个参数) 约为 21° . 所以, 这个核在 γ 自由度上非常软的特征应该是影响其结构的一个重要因素.

根据我们对于 $K^\pi = 7^-$ 同核异能态的形状的研究结果和实验对其四极矩的测量结果^[5], 由 Q_s 与 Q_0 的关系可以推得这个同核异能态的 averages K 值小于 7, 即混合了 $K < 7$ 的态. 鉴于科里奥利力对非集体态影响很小^[15], 我们认为它的势能面在 γ 自由度上非常软很可能是导致其 K 混合的原因.

图 1 计算的基态(左)、 7_a^- 态(中)和 7_b^- 态(右)的势能面

4 结论

为了理解实验测量的 ^{130}Ce 的 $K^\pi = 7^-$ 同核异能态的四极矩的大小,我们用自洽处理形变的方法计算

了这个核的基态和 $K^\pi = 7^-$ 态. 结果表明 $K^\pi = 7^-$ 同核异能态具有 γ 很软, β_2 和基态相同的长椭球形状. 而对于其四极矩的实验值的解释应该是 K 混合, 我们认为这种 K 混合很可能是它的势能面在 γ 自由度上很软造成的.

参考文献(References)

- 1 Andreyev A N, Huyse M, Van Duppen P et al. Nature(London), 2000, **405**: 430
- 2 Walker P M, XU F R, Cullen D M. Phys. Rev., 2005, **C71**: 067303
- 3 Wheldon C, Walker P M, Regan P H et al. Nucl. Phys., 1999, **A652**: 103
- 4 Walker P M, Dracoulis G D. Nature(London), 1999, **399**: 35
- 5 Ionescu-Bujor M, Iordachescu A, Brandolini F et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 024316
- 6 XU F R, Walker P M, Sheikh J A et al. Phys. Lett., 1998, **B435**: 257
- 7 Myers W D, Swiatecki W J. Ann. Phys., 1969, **84**: 395
- 8 Strutinsky V M. Yad. Fiz., 1966, **3**: 614; Nucl. Phys., 1967, **A95**: 420
- 9 Nazarewicz W, Dudek J, Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1985, **A435**: 397
- 10 Pradhan H C, Nogami Y, Law J. Nucl. Phys., 1973, **A201**: 357
- 11 Möller P, Nix J R. Nucl. Phys., 1992, **A536**: 20
- 12 Todd D M, Aryaeinejad R, Love D J G et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 1984, **10**: 1407
- 13 YAN J, Vogel O, von Brentano P et al. Phys. Rev., 1993, **C48**: 1046
- 14 Vogel O, Van Isacker P, Gelberg A et al. Phys. Rev., 1996, **C53**: 1660
- 15 Walker P M, Dracoulis G D. Hyp. Interact., 2001, **135**: 83

Shape of the $K^\pi = 7^-$ Isomer in $^{130}\text{Ce}^*$

LIU Hong-Liang¹ XU Fu-Rong^{1,2,3;1)}

¹(MOE Key Laboratory, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

²(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

³(Center for Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory for Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract Configuration-constrained calculations of potential-energy surfaces have been performed to study the shape of the $K^\pi = 7^-$ isomer in ^{130}Ce . The calculated excitation energy agrees well with the experimental data. The resulting deformation indicates that this isomer has a prolate shape as large as that of the ground state. However, the potential-energy surface of the isomeric state is remarkably soft on the γ degree of freedom, which would be an indication of the K mixing.

Key words isomer, quadrupole moment, shape, configuration-constrained calculation

* National Natural Science Foundation of China (10525520, 10475002)

1) E-mail: frxu@pku.edu.cn