

Kr 同位素的形状共存*

郑世界¹ 许甫荣^{1,2,3;1)}

1(北京大学物理学院重离子物理教育部重点实验室 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 Woods-Saxon 推转壳模型对缺中子 Kr 同位素 $^{70,72,74,76}\text{Kr}$ 进行了 TRS 计算. 结果表明, $^{70,72}\text{Kr}$ 的基态为扁椭球, 同时存在着长椭球形变. $^{74,76}\text{Kr}$ 的基态为长椭球, 并与扁椭球形变共存. 另外, 对 ^{72}Kr 的推转计算结果表明, 随着 ω 的增大, 它的基态由扁椭球变成了长椭球.

关键词 形状共存 Woods-Saxon 势 推转壳模型 Total Routhian Surface

1 引言

形状是原子核的一个基本性质. 原子核的形状会随着质子和中子的数目不同而发生变化. 满壳的原子核的基态是球形的, 因为这时两个壳之间的大的能隙保证了球形核下的结合能最大. 处在非满壳的原子核会根据质子数和中子数的不同, 呈现不同的形状: 长椭球、扁椭球或其它形状. 当原子核的不同形状之间的能量相差不大时, 会存在一个与基态形状不同的低激发态, 原子核同时呈现出两个不同的形状, 这种现象就叫做形状共存. 在一定条件下, 形状共存的原子核的低激发态形成形状同核异能态. 由于初态和末态的形状不同, 特别是当两个形状的波函数的混合比较小的时候, 电磁跃迁被压低. 形状共存核的形状及衰变性质对我们检验核结构模型以及研究远离 β 稳定线的核的性质都有重要作用.

在 $A \sim 70$ 区域 $\text{Se}(Z=34)$ 和 $\text{Kr}(Z=36)$ 的核素是大家关注的一个重点. 在核天体中, 它们处在天体中元素合成过程中的关键路径上, 对形成元素的丰度以及产生能量都有重要的影响. 在长椭球形变时, 当核子数为 34 和 36 时存在比较大的能隙; 当核子数为 34 和 38(扁椭球形变) 以及 40(球形) 时也存在大的能隙. 由于这些壳的相互竞争, 不同形变的组态在一个很小的能量范围内共存, 增加或减少少数几个核子, 原子核的形变就会产生很大的变化^[1]. ^{74}Kr 与 ^{76}Kr 最早被

Piercey et al^[2] 报导存在形状共存现象. ^{72}Kr 与 ^{74}Kr 的形状共存也被很多实验所证实^[1, 3-6]. 很多理论如 Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov^[7], Excited Vampire 近似^[8-12] 等都被应用到这个区域的核素中, 详细的形状共存的综述性文章见文献^[13].

本文中我们将用 Woods-Saxon 推转壳模型对 $^{70,72,74,76}\text{Kr}$ 进行 Total Routhian Surface(TRS) 计算, 并讨论它们在推转下的情况.

2 模型

在推转壳模型下, 当原子核绕垂直于对称轴 (z 轴) 的轴 (x 轴) 转动时, 哈密顿量 H 可以用单粒子的产生湮没算符表示为

$$H = \prod_{ij} [\langle i|H_0|j\rangle a_i^\dagger a_j - \omega \langle i|J_x|j\rangle a_i^\dagger a_j] - G \prod_{i>j} a_i^\dagger a_i^\dagger a_j a_j, \quad (1)$$

其中第一项 H_0 是单粒子的哈密顿量, 第二项是推转项, 最后一项是对作用项. 总的 Routhian 能

$$E = \langle \psi(\omega) | \hat{H} | \psi(\omega) \rangle. \quad (2)$$

在 Bogliubov 变换下, 得到推转的 HFB 的本征值方程

$$H \begin{pmatrix} U_{\mu i} \\ V_{\mu i} \end{pmatrix} = E_\mu' \begin{pmatrix} U_{\mu i} \\ V_{\mu i} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

本文中采用形变的 Woods-Saxon 势^[14], Lipkin-Nogami(LN) 方法^[15] 处理对作用, 对每一个四级形

* 国家自然科学基金(10525520, 10475002)资助

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

变格点 (β, γ) 包括 β_4 进行了自洽的CHFB计算. 最后, 通过最小化TRS得到原子核的形变点.

3 结果和讨论

图1给出了计算得到的Kr同位素 $^{70,72,74,76}\text{Kr}$ 的TRS图. 从图中可以看到, $^{70,72,74,76}\text{Kr}$ 都分别存在两个能量极小值点. ^{70}Kr 的基态为扁椭球($\beta_2 = 0.30$), 同时存在一个与基态能量差在1.05MeV的长椭球($\beta_2 = 0.26$)形变. ^{72}Kr 的基态也为扁椭球($\beta_2 = 0.33$),

同时存在一个大的长椭球($\beta_2 = 0.40$)形变(有很小的三轴形变), 与基态的能量差为580keV. $^{74,76}\text{Kr}$ 的基态都是大形变的长椭球, 形变都是 $\beta_2 = 0.40$. 对 ^{74}Kr 来说, 它还存在一个 $\beta_2 = 0.32$ 的扁椭球形变, 能量比基态高出610keV. ^{76}Kr 有一个形变略小($\beta_2 = 0.27$)的扁椭球形变, 能量比基态高出630keV. 这些核素的形状共存已被实验^[1-6]所证实, 观测给出的 $^{72,74,76}\text{Kr}$ 的 0^+ 激发态的激发能分别为671keV, 508keV, 770keV^[1], 与我们的计算结果相一致.

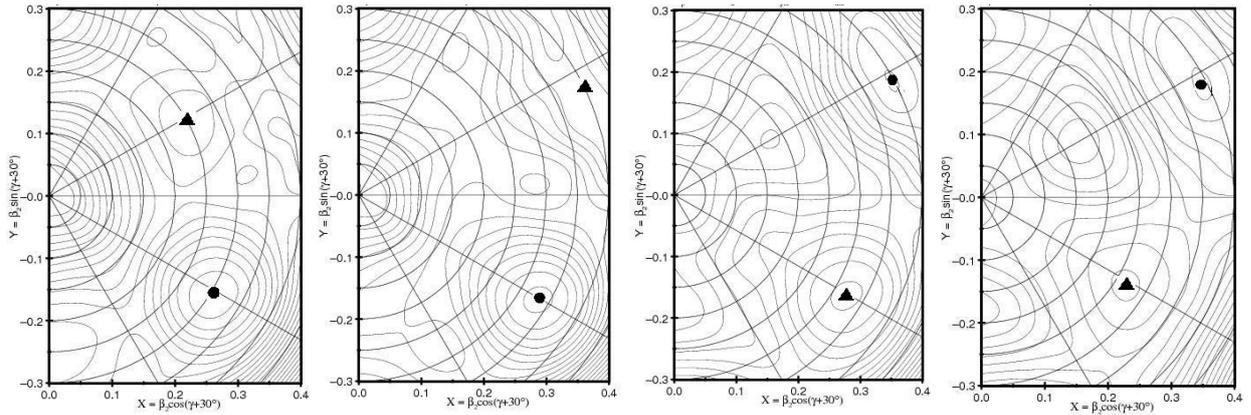


图1 $^{70,72,74,76}\text{Kr}$ 的TRS图

自左至右分别为 ^{70}Kr , ^{72}Kr , ^{74}Kr , ^{76}Kr . 相邻等势曲线间的能量差为200keV. 其中的黑色圆圈代表最小值点(基态), 黑色三角形代表第二个极小值点.

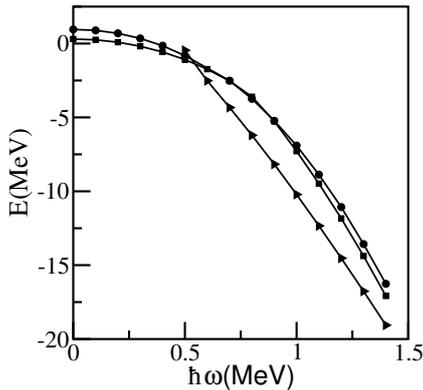


图2 ^{72}Kr 的Routhian能量随 ω 的变化曲线. 其中黑色正方形为基态时形变 $\beta=0.33$ 的扁椭球的Routhian能量, 黑色圆圈代表的是基态时形变 $\beta=0.4$ 的长椭球的Routhian能量, 黑色三角形代表形变约为0.28的长椭球的Routhian能量

为了研究它们的形状随转动频率的变化, 对 ^{72}Kr 进行了推转壳模型计算. 图2给出了 ^{72}Kr 的Routhian能量随 ω 的变化曲线图. 从图中可以看出, 当 $\omega=0$

时, 基态的扁椭球形变和长椭球形变能量差很小($\sim 600\text{keV}$), 两个形状会有很大的混合. 随着 ω 的增加, 它们的能量差进一步减小, 表明长椭球和扁椭球的混合会进一步加强. 当 $\omega=0.5$ 时, 又出现了一个比较小($\beta \sim 0.28$)的长椭球形变, 并且随着 ω 的增加, 它的Routhian能量达到最小, 成为新的晕转态. 原子核由扁椭球形变变到长椭球形变.

4 结论

为了研究Kr的远离 β 线的同位素的形状共存现象, 用自洽的推转壳模型对 $^{70,72,74,76}\text{Kr}$ 进行了TRS计算. 结果表明这几个核素都存在明显的长椭球和扁椭球共存的现象, 与现有的实验结果基本都符合. 为了进一步研究这些核的形状随转动的变化, 我们对 ^{72}Kr 进行了推转计算. 结果显示, 当 $\omega = 0.9$ 时, ^{72}Kr 的基态由长椭球变为扁椭球,

参考文献(References)

- 1 Bouchez E, Matea I, Korten W et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **90**: 082502
- 2 Piercey R B, Hamilton J H, Soundranayagam R et al. Phys. Rev. Lett., 1981, **47**: 1514
- 3 Chandler C, Regan P H, Pearson C J et al. Phys. Rev., 1997, **C56**: R2924
- 4 Becker F, Korten W, Hannachi P et al. Eur. Phys. J. A, 1999, **4**: 103
- 5 Korten W. Acta Phys. Pol. B, 2001, **32**: 729
- 6 Clement E, Gorgen A, Bouchez E et al. AIP Conf. Proc, 2005, **764**: 55
- 7 Yamagami M, Matsuyanagi K, Matsuo M. Nucl. Phys., 2001, **A693**: 579
- 8 Petrovici A, Schmid K W, Faessler Armand. Nucl. Phys., 1996, **A605**: 290
- 9 Petrovici A, Schmid K W, Faessler Armand. Nucl. Phys., 2003, **A728**: 396
- 10 Petrovici A, Schmid K W, Faessler Armand. Nucl. Phys., 2002, **A708**: 190
- 11 Petrovici A, Schmid K W, Faessler Armand. Nucl. Phys., 2002, **A710**: 246
- 12 Petrovici A, Schmid K W, Faessler Armand. Nucl. Phys., 2000, **A665**: 333
- 13 Wood J L, Heyde K, Nazarewicz W et al. Phys. Rep., 1992, **215**: 101
- 14 Nazarewicz W, Dudek J, Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1985, **A435**: 397
- 15 Pradhan H C, Nogami Y, Law J. Nucl. Phys., 1973, **A201**: 357

Shape Coexistence in Light Krypton Isotopes^{*}ZHENG Shi-Jie¹ 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 Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract The shapes of light Krypton isotopes have been investigated using cranking Woods-Saxon model. The calculated results show that nuclei $^{70,72}\text{Kr}$ have oblate ground states and coexisting low-lying prolate states, while nuclei $^{74,76}\text{Kr}$ have prolate ground states and coexisting low-lying oblate states. In addition, the cranking calculations of ^{72}Kr display that the ground-state shape of ^{72}Kr changes from oblate to prolate as ω increases.

Key words shape coexistence, Woods-Saxon potential, cranking shell model, Total Routhian Surface

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

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