

文章编号: 1007-4627(2010)02-0146-04

Se 同位素的形状共存^{*}

刘颖¹, 许甫荣^{1, 2, #}, 曹钟斌¹

(1 北京大学物理学院核科学与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

2 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于形变 Woods-Saxon 势下的推转壳模型对 Se 同位素进行 Total-Routhian-Surface (TRS) 计算。结果表明, 原子核的形状随中子数变化很明显。对^{66, 72, 92, 94}Se 基态 TRS 图进行分析, 发现缺中子同位素和中子滴线附近核素均存在扁椭球和长椭球的形状共存。分别对⁷²Se 和⁹⁴Se 进行推转计算, 长椭球和扁椭球形状在低推转频率下共存, 由于 $g_{9/2}$ 闯入轨道的影响, 随着推转频率的增加, 扁椭球形变逐渐消失, 长椭球形变带成为转晕带。

关键词: 形状共存; 推转壳模型; Total Routhian Surface 计算

中图分类号: O571.2 **文献标识码:** A

1 引言

形状是原子核的一个基本性质。原子核的形状是由核子在不同的轨道填充引起的。对质量数在 80 区附近的原子核, 核结构随着核子数的不同, 会发生显著的变化。这是因为此区域单粒子能级密度比较小。对于缺中子同位素, 核子的费米面靠近 $g_{9/2}$ 轨道, 该轨道具有很强的形状驱动作用。同时, $g_{9/2}$ 轨道因形变发生劈裂, 在核子数为 34 和 36 扁椭球一侧, 以及核子数为 38 和 40 长椭球大形变($\beta_2 = 0.35-0.4$)处, 各出现一个比较大的能隙。由于这些能隙的相互竞争, 使质量数在 80 区的缺中子同位素, 存在大量的形状共存态。对于丰中子同位素, 中子数为 60 附近, 费米面位于 $h_{11/2}$ 子壳的底部, 中子在 $h_{11/2}$ 轨道的填充将驱使原子核发生长椭球形变。

实验上, 在质量数为 80 区发现了少见的扁椭球形变态和形状共存现象^[1-7]。近年来随着实验技术的进步, 远离 β 稳定线核素的谱学研究逐步展开, 并成为目前实验上的一个研究热点。对于 Se 同位素, 实验上发现存在很多四极形变的核态^[1-5]。对于质子数和中子数均为 34 的核素⁶⁸Se, 实验上证实基态为扁椭球, 并发现一个扁椭转动带和长椭转

动带^[1]。很多实验证实^{69, 70, 72, 74}Se 存在形状共存^[2-6]。很多理论, 如投影壳模型(PSM)^[4, 8], 基于 Gogny D1S 相互作用的 Hartree-Fock Boglyubov 组态混合计算方法^[6], 相互作用玻色子模型(IBM)^[9]等都研究过这个区域的形状共存现象。本文将对 Se 同位素的形状变化和形状共存进行研究, 分析核子占据轨道对原子核形状的影响。

2 理论模型

Total-Routhian-Surface(TRS) 计算^[10]是以推转壳模型为基础的^[11], 在形变空间(β_2, γ, β_4)的每个格点上, 对于每个给定的推转频率求解推转 Lipkin-Nogami 方程^[12]。由计算的 TRS 能量极小点可得到形变大小。原子核(Z, N)在推转频率 ω 和形变 $\hat{\beta}$ 下的总 Routhian $E^\omega(Z, N, \hat{\beta})$ 写为

$$E^\omega(Z, N, \hat{\beta}) = E^{\omega=0}(Z, N, \hat{\beta}) + \langle \Psi^\omega | \hat{H}^\omega | \Psi^\omega \rangle - \langle \Psi^\omega | \hat{H}^\omega | \Psi^\omega \rangle_{\omega=0}, \quad (1)$$

其中, $E^{\omega=0}(Z, N, \hat{\beta})$ 为原子核在转动频率为零时的能量, 包括由液滴模型得到的宏观能量^[13], 微观的壳修正能量和对能; 方括号中的两项代表由原子核转动引起的能量改变。方程(1)中的总哈密顿量

* 收稿日期: 2009-05-04; 修改日期: 2010-03-17

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10525520, 10735010, 10875172); 国家重大基础研究发展规划资助项目(2007CB815000)

作者简介: 刘颖(1985-), 男(汉族), 山东聊城人, 硕士研究生, 从事理论核物理研究; E-mail: fancyliu2004@163.com

通讯联系人: 许甫荣, E-mail: frxu@pku.edu.cn

\hat{H}^ω 为如下形式^[10]：

$$\begin{aligned} \hat{H}^\omega = & \sum_{ij} [\langle i|h_{ws}|j\rangle - \lambda\delta_{ij})a_i^\dagger a_j - \\ & \omega\langle i|\hat{j}_x|j\rangle a_i^\dagger a_j] - \\ & G \sum_{i, i' > 0} a_i^\dagger a_i^\dagger a_{i'} a_{i'}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中， G 为对力强度， λ 为费米能^[9]。对于单粒子哈密顿量 h_{ws} ，采用形变 Woods-Saxon (WS) 势^[14]。WS 势的形状与核子密度相似^[15]，并且符合核力的有限程要求，能比较合理地描述核子从核的边界往外移动时受到的力的变化，因此基于 WS 势的势能面计算方法，能够很好地描述稳定原子核^[16, 17]和滴线附近核^[18]的形变性质。对关联处理中，采用粒子数近似守恒的 Lipkin-Nogami (LN) 方法^[12]，包括单极对力和四极对力。单极对力强度由平均对能隙方法得到^[19]，四极对力强度由哈密顿量的对称性恢复确定^[20]。对关联依赖于形变和推转频率，对于给定的形变和推转频率，对能自洽地由推转的 Hartree-Fock-Boglyubov 方程得到。总的集体角动量 I_x 由以下方程得到^[16]

$$\begin{aligned} I_x = & \sum_{\alpha, \beta > 0} \langle \beta|\hat{j}_x|\alpha\rangle \rho_{\alpha, \beta} + \\ & \sum_{\alpha, \tilde{\beta} > 0} \langle \tilde{\beta}|\hat{j}_x|\tilde{\alpha}\rangle \rho_{\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\rho_{\alpha, \beta}$ 为旋称基 α, β ($\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}$ 为相反的旋称) 表象下的密度矩阵。

3 结果与讨论

图 1 给出了计算的⁶⁴⁻⁹⁰Se 偶偶核的基态形变。可以看出，中子数在幻数 50 附近，核素⁷⁸⁻⁸⁸Se 为近球形($\beta_2 < 0.2$)，其中，中子幻数核⁸⁴Se 的形变参数 β_2 为 0，显示出明显的壳效应。在滴线附近，原

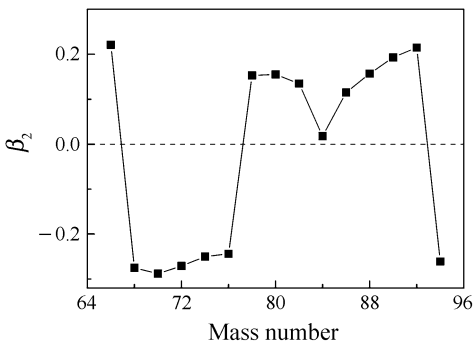


图 1 计算得到的 Se 同位素的基态形变

子核的形变随中子数变化很剧烈。极端缺中子同位素⁶⁶Se 基态为长椭球，而⁶⁸⁻⁷⁶Se 存在很好的扁椭球形变。⁹²Se 为长椭球，而当 $N = 60$ 靠近中子滴线时，变成了扁椭球形变。这是因为对缺中子 Se 同位素，质子和中子在长椭球和扁椭球两侧的能隙相互竞争，使得原子核的形状随核子数显著变化。对于丰中子 Se 同位素，质子偏向于扁椭球形变，中子填充的 $h_{11/2}$ 轨道具有很强的长椭球形状驱动作用，这两种效应使原子核出现形状共存。

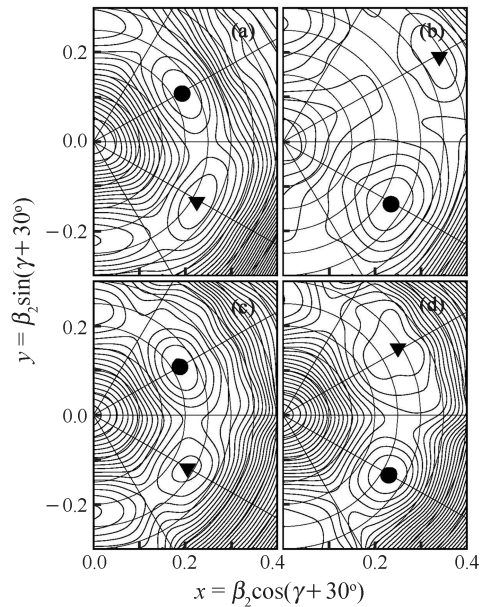


图 2 计算的⁶⁶Se(a)，⁷²Se(b)，⁹²Se(c)，⁹⁴Se(d)基态势能面。黑色圆点代表能量最小值点，黑色三角代表第二个形变极小点；相邻等势线间的能量差为 200 keV。

为了进一步解释这种现象，我们给出了^{66, 72, 92, 94}Se 基态的势能曲面。从图 2 中可以看到，这些核素都存在两个能量极小值点。⁶⁶Se 两个能量极小点分别为长椭球($\beta_2 \approx 0.22$)和扁椭球($\beta_2 \approx -0.26$)形变，能量相差 50 keV，它们之间的势能位垒约为 600 keV。⁹²Se 的第 2 个能量极小点为扁椭球($\beta_2 \approx -0.24$)形变，与长椭球基态的能量相差 400 keV。^{72, 94}Se 基态为扁椭球，其中⁷²Se 存在一个较大的长椭球形变($\beta_2 \approx 0.40$)同核异能态，与基态能量差为 450 keV，是由中子数为 38 和 40 时，长椭球大形变处的能隙引起的。⁹⁴Se 的第 2 个能量极小点为 γ -soft 长椭球形变($\beta_2 \approx 0.30$)，与基态能量差为 100 keV。

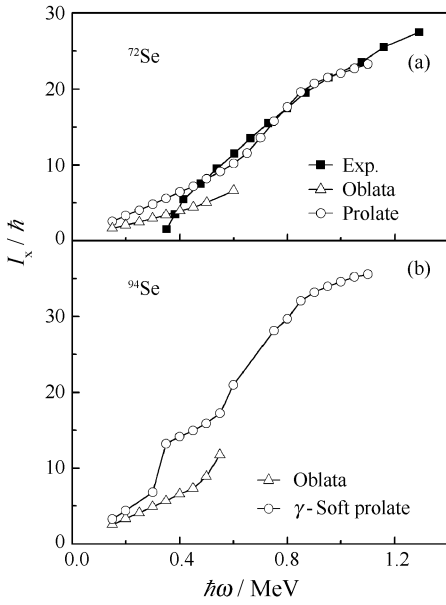


图 3 ^{72}Se 和 ^{94}Se 的总角动量随推转频率的变化

(a) 对 ^{72}Se 核计算的扁椭球和长椭球转动带的形变分别为 $\beta_2 \approx 0.27$, $\gamma \approx -60^\circ$ 和 $\beta_2 \approx 0.40$, $\gamma \approx -5^\circ$; (b) 对 ^{94}Se 核扁椭球和长椭球形变分别为 $\beta_2 \approx 0.27$, $\gamma \approx 60^\circ$ 和 $\beta_2 \approx 0.32$, $\gamma \approx 8^\circ$ 。

为了研究 Se 同位素形状共存随转动频率的变化, 对 $^{72, 94}\text{Se}$ 分别进行了推转壳模型计算。 $g_{9/2}$ 壳的高 j 低 Ω 轨道(如 $1/2^+[440]$, $3/2^+[431]$), 具有长椭球形状驱动力, 在转动情况下, 这些轨道上的核子受到很强的科里奥利力影响, 更容易发生顺排, 使原子核趋向于长椭球形变。图 3 给出了 $^{72, 94}\text{Se}$ 的总角动量随推转频率的变化。对于 ^{72}Se , 扁椭球形状与长椭球形状在较低的推转频率范围内 ($\hbar\omega < 0.6$ MeV) 共存。随着频率的增加, 扁椭球形变逐渐消失, 大形变长椭球能量达到最小, 成为转晕态。我们的计算结果和实验数据符合得很好^[4]。 ^{94}Se 为极端丰中子同位素, 没有转动激发态的实验数据。从图中可以看出, 与核素 ^{72}Se 类似, 低推转频率下, 长椭球和扁椭球形状共存, 高频率下扁椭球形变消失, 一个很软的长椭球形变成为转晕态。这是因为 $g_{9/2}$ 壳的高 j 低 Ω 轨道(如 $1/2^+[440]$, $3/2^+[431]$) 有长椭球形状驱动力。质子费米面位于 $g_{9/2}$ 壳的底部, 在转动情况下, 质子更倾向于填充高 j 低 Ω 轨道, 受到很强的科里奥利力影响, 更容易发生顺排, 使原子核趋向于长椭球形变。

为了进一步研究质子顺排对形状共存的影响, 图 4 给出了 ^{94}Se 分别在扁椭球形变 $(\beta_2, \gamma, \beta_4) = (0.27, -60^\circ, 0.04)$ 和长椭球形变 $(\beta_2, \gamma, \beta_4) =$

$(0.32, 8^\circ, 0.04)$ 下的准质子 Routhian 随推转频率的变化曲线。从图中看出, 对于长椭球形变(b), 当 $\hbar\omega \approx 0.6$ MeV 时, 正宇称 $g_{9/2}$ 轨道上的质子发生顺排, 使能量降低; 对于扁椭球形变(a), 推转频率直到 1.0 MeV 时仍没有发生顺排, 因此在推转情况下, 由于质子倾向于占据长椭球形变方向的高 j 低 Ω 轨道, 使得长椭球形变成为转晕态。

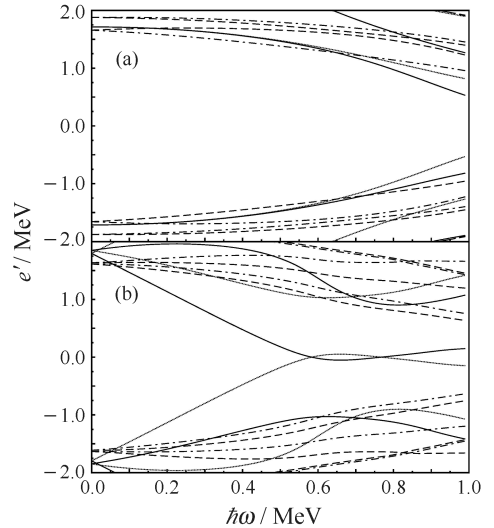


图 4 ^{94}Se 在扁椭球(a)形变和长椭球(b)形变的准质子 Routhians 随推转频率的变化

实线代表正宇称正旋称, 点线代表正宇称负旋称, 点划线代表负宇称正旋称, 短划线为负宇称负旋称。

4 结论

通过研究 Se 同位素来分析了质量数在 80 区存在的形状共存现象。运用推转壳模型对 Se 同位素进行了 TRS 计算, 结果表明, 远离 β 稳定线的同位素形状随中子数变化很明显。 $^{66, 72, 92, 94}\text{Se}$ 的 TRS 图显示存在长椭球和扁椭球的形状共存。这是因为对于缺中子同位素, 中子质子费米面附近存在扁椭球和长椭球能隙的相互竞争, 对于丰中子同位素, 中子填充的 $h_{11/2}$ 轨道具有长椭球形状驱动力。

进一步研究了转动对原子核形状共存带的影响, 对 ^{72}Se 进行推转计算的结果与它的转动带实验值符合得很好, 并预言了 ^{94}Se 在低推转频率下, 长椭球和扁椭球形状共存, 随着推转频率的增加, 扁椭球形变逐渐消失, 长椭球形变带成为转晕带。这是因为 $g_{9/2}$ 闯入轨道在转动的情况下具有长椭球形状驱动力, 使原子核更倾向于长椭球形变。

参考文献 (References):

- [1] Fischer S M, Balamuth D P, Hausladen P A, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, **84**: 4064.
- [2] Jenkins D G, Balamuth D P, Carpenter M P, *et al.* Phys Rev, 2001, **C64**: 064311.
- [3] Rainovski G, Schnare H, Schwengner R, *et al.* J Phy, 2002, **G28**: 2617.
- [4] Palit R, Jain H C, Joshi P K, *et al.* Phys Rev, 2001, **C63**: 024313.
- [5] Cottle, Holcomb J W, Johnson T D, *et al.* Phys Rev, 1990, **C42**: 1254.
- [6] Ljungvall J, Girod M, Dewald A, *et al.* Phys Rev Lett, 2008, **100**: 102502.
- [7] Bai Erjun, Wang Zhikui, Li Xianfeng, *et al.* Nuclear Physics Review, 2000, **17**(4): 212(in Chinese).
(白尔隽, 王智魁, 李险峰等. 原子核物理评论, 2000, **17**(4): 212.)
- [8] Sun Y, Wiescher Michael, Aprahamian Ani, *et al.* Nucl Phys, 2005, **A758**: 765.
- [9] Mu Liangzhu, Liu Yuxin. Nuclear Physics Review, 2005, **22** (4): 358(in Chinese).
(穆良柱, 刘玉鑫. 原子核物理评论, 2005, **22**(4): 358.)
- [10] Nazarewicz W, Wyss R, Johnson A. Nucl Phys, 1989, **A503**: 285.
- [11] Ring P, Schuck P. The Nuclear Many-body Problem (Springer—Verlag), 1980
- [12] Prahān H C, Nogami Y, Law J. Nucl Phys, 1973, **A201**: 357.
- [13] Myer W D, Swiatecki W J. Nucl Phys, 1966, **81**: 1.
- [14] Cwiok S, Dudek J, Nazarewicz W. Comp Phys Comm, 1987, **46**: 379.
- [15] Hu Jimin, Yang Bojun, Zheng Chunkai. Theoretical Nuclear Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1987, 45—49(in Chinese).
(胡济民, 杨伯君, 郑春开. 原子核理论. 北京: 原子能出版社, 1987, 45—49.)
- [16] Xu F R, Wyss R, Walker P M. Phys Rev, 1999, **C60**: 051301.
- [17] Deacon A N, Freeman S J, Janssens R V F, *et al.* Phys Lett, 2005, **B622**: 151.
- [18] Liu H L, Xu F R, Xu S W, *et al.* Phys Rev, 2007, **C76**: 034313.
- [19] Möller P, Nix J R. Nucl Phys, 1992, **A536**: 20.
- [20] Sakamoto Hideo, Kishimoto Teruo. Phys Lett, 1990, **B245**: 321.

Shape Coexistence in Selenium Isotopes^{*}LIU Ying¹, XU Fu-rong^{1, 2, #}, CAO Zhong-bin¹

(1 School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;

2 Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Nuclear shape change and shape coexistence in the Selenium isotopes have been investigated by Total-Routhian-Surface(TRS) calculations. It is found that nuclear shapes vary significantly with increasing neutron number. The TRS calculations for the ground states of ^{66, 72, 92, 94}Se isotopes show that both neutron-deficient and neutron-dripline Selenium isotopes have oblate and prolate shape coexistence. The cranking shell-model calculations for ^{72, 94}Se give that prolate and oblate shape coexistence in low rotational frequency. However, oblate rotational bands disappear and prolate rotational bands become yrast bands with increasing rotational frequency, which is due to the intrusion of the $g_{9/2}$ orbitals.

Key words: shape coexistence; cranking shell model; Total Routhian Surface calculation

* Received date: 4 May 2009; Revised date: 17 Mar. 2010

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10525520, 10735010, 10875172); Major State Basic Research Development Program(2007CB815000)

Corresponding author: Xu Fu-rong, E-mail: frxu@pku.edu.cn