

文章编号: 1007-4627(2008)01-0015-05

RMF 理论对 $N = 60$ 同中子核素形状演化的研究*

周健虹, 郭健友, 方向正

(安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230039)

摘要: 利用形变约束的相对论平均场理论系统研究了 $N = 60$ 同中子核素的形状演化, 给出了这些核的基态结合能、形变、单粒子能级以及形变激发的位能曲线。通过比较和分析发现, 随着质子数的增加, $N = 60$ 同中子核的基态形变向轴对称形变方向演化, ^{114}Xe 和 ^{116}Ba 位于球形 $U(5)$ 和轴对称 $SU(3)$ 的过渡区, 存在形状相变的临界点结构, 这些结果与实验观测一致。

关键词: 相对论平均场; 四级形变; 相变

中图分类号: O571.21 **文献标识码:** A

1 引言

目前原子核结构中的临界点对称性已经引起了许多人的关注。一些物理体系(原子核、分子和原子结团等)在它们的平衡态结构的形状上有一定的特征, 这些核的形状在有些情况下是刚性的, 然而, 在少数几种情况下核的结构是非常松软的。当前, 一个值得考虑的问题是如何去描述相变点的特征。

在传统的相互作用玻色子(IBM)模型下^[1], 原子核的结构可以被看作是由 $U(6)$ 对称的玻色子组成的系统, 它存在 3 种动力学对称性: $U(5)$, $SU(3)$ 和 $O(6)$, 几何学上分别对应为球型振动、轴向形变旋转和 γ 不稳定旋转。在 IBM 模型下, $X(5)$ 对称是介于 $U(5)$ 和 $SU(3)$ 对称之间的临界点结构, 而 $E(5)$ 对称可以描述 $U(5)$ 和 $O(6)$ 动力学对称之间的相变区域。 $X(5)$ [$E(5)$] 临界点对称可以应用到原子核的球形和 γ 不稳定对称之间的第 1 或第 2 形状相变^[2, 3]。

近年来, 相对论平均场(RMF)理论在描述原子核的性质方面取得了很大成功, 许多人已把 RMF 理论应用到原子核形状演化的研究中^[4-6]。孟杰等^[7]已经把 RMF 理论应用到 Sm 同位素链的研究中, 并且指出^{148, 150, 152}Sm 具有介于球形 $U(5)$ 和轴

对称 $SU(3)$ 之间的临界点结构。以往的研究大多以等质子的同位素链为研究对象, 文中将选择 $N = 60$ 的等中子核素, 利用 RMF 理论对其进行系统的研究。

2 理论框架

为了用 RMF 理论分析原子核的形状演化, 我们采用了微观的方法。在 RMF 理论框架中, 核子之间的相互作用通过交换介子来实现: 标量介子 σ 提供介子之间的中程相互吸引部分, 矢量介子 ω^μ 提供核子间的短程排斥相互作用, 而 ρ^μ 介子提供了代表核性质的同位旋相关性, 所以有效的 Lagrangian 密度可以表示为

$$\begin{aligned} L = & \bar{\Psi}(i\lambda^\mu \partial_\mu - M)\Psi + \frac{1}{2}\partial_\mu\sigma\partial^\mu\sigma - \frac{1}{2}m_\sigma^2\sigma^2 - \\ & \frac{1}{3}g_2\sigma^3 - \frac{1}{4}g_3\sigma^4 - g_\sigma\bar{\Psi}\sigma\Psi - \frac{1}{4}W^{\mu\nu}W_{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2}m_\omega^2\omega^\mu\omega_\mu - g_\omega\bar{\Psi}\gamma^\mu\omega_\mu\Psi + \frac{1}{4}g_4(\omega^\mu\omega_\mu)^2 - \\ & \frac{1}{4}R^{\mu\nu}R_{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\rho^2\rho^\mu\rho_\mu - g_\rho\bar{\Psi}\gamma^\mu\tau\rho_\mu\Psi - \\ & \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - e\bar{\Psi}\gamma^\mu\frac{1-\tau_3}{2}A_\mu\Psi. \end{aligned} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2007-06-29; 修改日期: 2007-07-27

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10475001, 10675001); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET-05-0558); 安徽省高等学校拔尖人才基金和安徽省教育厅基金资助项目(2006KJ259B)

作者简介: 周健虹(1980—), 男(汉族), 安徽淮南人, 在读硕士研究生, 主要从事核理论研究; E-mail: zjmp3@sina.com

通过经典变换可以得到核子自旋的狄拉克方程:

$$[-i\alpha \cdot \nabla + V(r) + \beta(M + S(r))] \Psi_i = \varepsilon_i \Psi_i \quad (2)$$

下面是介子的 Klein-Gordon 方程

$$\begin{cases} (-\Delta + m_\sigma^2)\sigma(r) = -g_\sigma \rho_s(r) - g_2 \sigma^2(r) - g_3 \sigma^3(r), \\ (-\Delta + m_\omega^2)\omega^\mu(r) = g_\omega j^\mu(r) - g_4(\omega^\nu \omega_\nu)\omega^\mu(r), \\ (-\Delta + m_\rho^2)\rho^\mu(r) = g_\rho j^\mu(r), \\ -\Delta A^\mu(r) = e j_\rho^\mu(r) \end{cases} \quad (3)$$

分别给出了它们的矢量势和标量势:

$$\begin{cases} V(r) = \beta[g_\omega \gamma^\mu \omega_\mu(r) + g_\rho \gamma^\mu \tau_\rho \rho_\mu(r) + e\gamma^\mu \frac{1 - \tau_3}{2} A_\mu(r)], \\ S(r) = g_\sigma \sigma(r). \end{cases} \quad (4)$$

方程(2)和(3)可以通过叠代的方法自恰地解出来,计算细节可以参考文献[8,9]。当原子核发生形变时,结合能可以通过在哈密顿量的期望值中引入参数 μ_2 来约束四级动量 $\langle Q_2 \rangle$ 而获得^[10]:

$$\langle H' \rangle = \langle H \rangle + \frac{1}{2} C_\mu (\langle Q_2 \rangle - \mu_2)^2, \quad (5)$$

式中的 C_μ 是约束因子。质子和中子分布的形变参数 β_2 可以通过四级动量 $\langle Q_2 \rangle$ 计算得到:

$$\langle Q_2 \rangle = \langle Q_{1p} \rangle + \langle Q_{2n} \rangle = \frac{3}{\sqrt{5\pi}} AR_0^2 \beta_2, \quad (6)$$

这里的 $R_0 = 1.2 A^{1/3}$ 。

3 计算结果与分析

我们在形变约束的 RMF 理论下研究了 $N = 60$ 等中子核素 ($Z = 38 - 60$), 考虑了对关联的作用。为了计算方便, 我们采用固定能隙的 BCS 近似来描述对关联, 对能隙取 $\Delta_n = \Delta_p = 11.2/A^{1/2}$ MeV, 采用 NL3^[11] 和 PK1^[12] 相互作用。

图 1 和图 2 分别给出了结合能和四级形变的理论值和实验值^[13, 14]。通过与实验值比较, 可以发现 RMF 理论不同参数组计算的结果和实验值非常吻合, 最大差值不超过 0.036 MeV。而四级形变 β_2 的值与实验值有一定的误差, 特别是 $^{100}_{40}\text{Zr}$ 的 β_2 值与实

验值的偏差最大, 这主要是由于形变参数的选取与期望的形变值有一定的偏差造成的。从图 2 中的曲线变化趋势可以看到, 最低点 $^{100}_{50}\text{Sn}$ 的 β_2 值是 -0.008, 说明这是一个球形核, 而 $^{100}_{50}\text{Sn}$ 是一个双幻核, 很接近球形。这说明 RMF 理论的计算值与原子核的实际情况还是比较相符的。同时还可以看到, ^{116}Ba 和 ^{118}Ce 是很明显的变形核, 所以这组等中子核素处于一个从变形核到球形核的过渡区, 存在临界点结构。

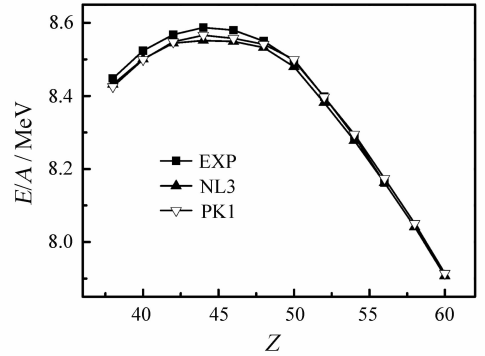


图 1 基态下结合能的实验值与 RMF 理论值的比较

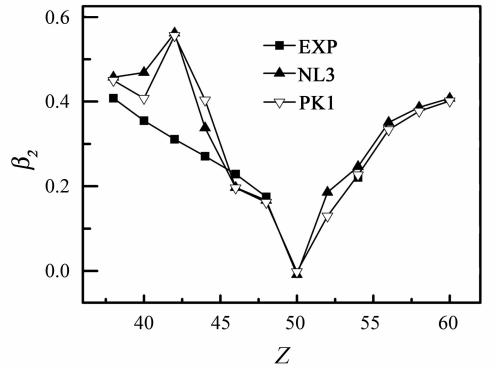


图 2 不同参数组计算的 β_2 形变值与实验值的比较

因为 RMF 理论能够成功地描述原子核的基态性质, 所以可以把它应用到形状演化的研究中。

图 3 和图 4 分别给出了 PK1 和 NL3 参数下的 $N = 60$ 等中子核素的位能曲线, 图中均以基态能量作为参考点。从图 3 和图 4 的位能曲线中能够看到 ^{110}Sn 的曲线底部相对来说比较平坦, 是一个接近球形的核。它较高的形变位垒(接近 2 MeV), 而 ^{112}Te 的位垒则比较低(约为 0.43 MeV), 与 ^{110}Sn 相比它就很容易发生形变。随着质子数的增加, 这组同中子素原子核慢慢地开始发生形变, 位能曲线开始变得柔和。例如, ^{112}Te 是容易发生形变的核,

而¹¹⁸Ce 和¹²⁰Nd 已经是形变很明显的核。通过以上这些分析,我们可以提出¹¹⁴Xe 和¹¹⁶Ba 是具有临界

点结构的核。同理,¹⁰⁴Ru 和¹⁰⁶Pd 也可能具有相同的结构。

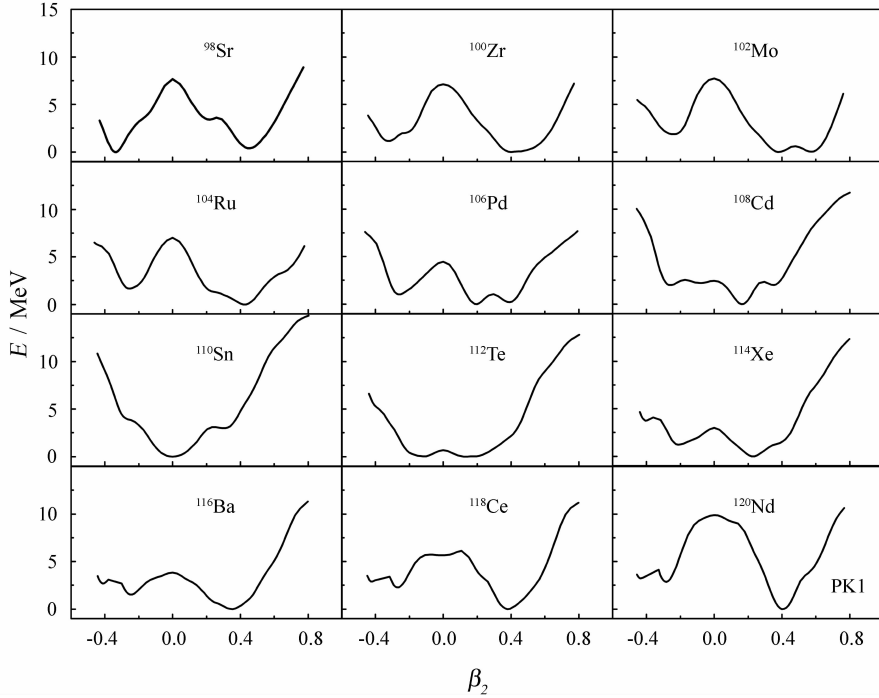


图 3 $N = 60$ 的同中子核素位能曲线, PK1 参数

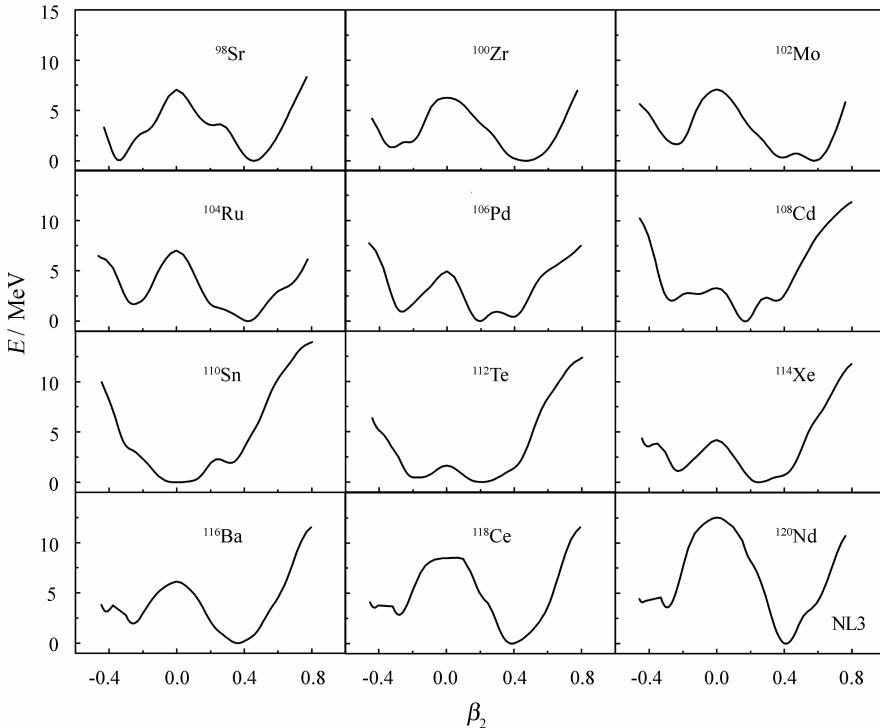


图 4 $N = 60$ 的同中子核素位能曲线, NL3 参数

RMF 理论作为原子核微观模型的一种,能够提供许多关于单粒子能级、壳结构等多方面的详细信

息。这些信息对于研究原子核结构和其形变情况具有很大的作用。图 5 给出了用 NL3 相互作用计算的

$N = 60$ 同中子核素质子的单粒子能级, 能级的范围在 $2 - -15$ MeV 之间, 黑线表示费米能。其中, 横坐标所示的质子数对应于各自的单粒子能级。从图中可以发现, 在质子幻数核 ^{110}Sn 附近的能隙比较大, ^{110}Sn 是典型的球形核, 但是随着质子数的增加, ^{116}Ba 附近的能隙与前者相比变得很小。当能隙变小的时候原子核容易发生形变。从图中可以看到 ^{114}Xe 和 ^{116}Ba 介于球形核与变形核之间, 最有可能具有形状演化的临界点结构。同理, ^{104}Ru 和 ^{106}Pd 也可能具有这种临界点结构。

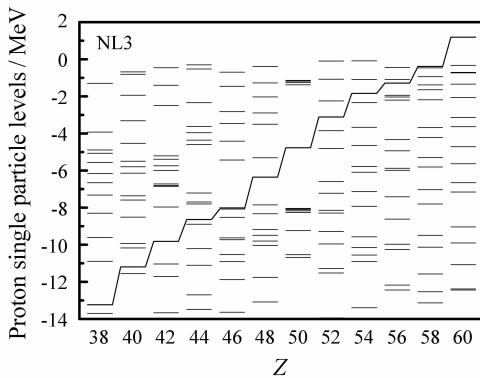


图 5 由约束条件下 RMF 理论得到的质子的单粒子能级 (NL3 参数)

4 总结

本文运用形变约束的 RMF 理论, 对 $N = 60$ 同中子核素的形状演化做了系统的分析和研究, 采用了 NL3 和 PK1 相互作用, 得到了它们的结合能和四级形变值, 发现与实验值吻合得很好, 偏差在允

许的范围内。这表明 RMF 理论可以很好地描述原子核的基态性质。通过这种微观的方法对 $N = 60$ 同中子核素位能曲线和单粒子能级做了系统分析和比较, 提出了 ^{114}Xe 和 ^{116}Ba 可能具有形状演化的临界点结构。由于 RMF 理论在某些方面还存在不足, 所以这里得到的结论还需要进一步验证。

参考文献 (References) :

- [1] Iachello F, Arima A. The Interaction Boson Model. Cambridge (England): Cambridge University Press, 1987.
- [2] Iachello F. Phys Rev Lett, 2001, **87**: 052 502.
- [3] Iachello F. Phys Rev Lett, 2000, **85**: 3 580.
- [4] Serot B, Walecka J D. Adv Nucl Phys, 1986, **16**: 1.
- [5] Ring P. Prog Part Nucl Phys, 1996, **37**: 193.
- [6] Meng J, Ring P. Phys Rev Lett, 1996, **77**: 3 963; 1998, **80**: 460.
- [7] Meng J, Zhang W, Zhou S G, *et al.* Euro Phy J, 2005, **A25**: 23.
- [8] Gambhir Y, Ring P, Thimet A. Ann Phys (N. Y.), 1990, **198**: 132.
- [9] Zhou S G, Meng J, Ring P. Phys Rev, 2003, **C68**: 034 324.
- [10] Ring P, Schuck P. The Nuclear Many Body Problem. Springer, 1980.
- [11] Lalazisis G A, König J, Ring P. Phys Rev, 1997, **C55**: 540.
- [12] Long W H, Meng J, Giai N V, *et al.* Phys Rev, 2004, **C69**: 034 319.
- [13] Audi G, Wapstra A H. Nucl Phys, 2003, **A729**: 337.
- [14] Raman S, Nestor C W, Tikkanen P. Atomic Data Nucl Data Table, 2001, **78**: 1.

Systematic Analysis of Shape Evolution for $N = 60$ Isotonic Chain in Relativistic Mean-field Model*

ZHOU Jian-hong¹⁾, GUO Jian-you, FANG Xiang-zheng

(School of Physics and Material Science, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: The shape phase transition between spherical $U(5)$ and axially $SU(3)$ deformed nuclei is investigated

* Received date: 29 Jun. 2007; Revised date: 27 Jul. 2007

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10475001, 10675001); Program for New Century Excellent Talents in University of China (NCET-05-0558); Program for Excellent Talents in Anhui Province University, and the Education Committee Foundation of Anhui Province (2006KJ259B)

1) E-mail: zjmp3@sina.com

systemically for $N = 60$ isotonic chain by the constrained relativistic mean-field theory with the interactions NL3 and PK1. The values of bind energy and quadruple deformation β_2 are calculated and a good agreement is obtained as compared with the experiments. By examining the potential energy curve and single particle spectra obtained with this microscopic approach, the possible critical point nuclei with the structure of shape phase transition are suggested to be ^{114}Xe and ^{116}Ba , which is favored by the experiments.

Key words: relativistic mean field; quadruple deformation; shape phase transition