

文章编号: 1007-4627(2019)02-0144-07

超越平均场模型对 Ba 同位素链八极形状演化研究

孙玮¹, 全珊¹, 向剑^{2,†}, 李志攀^{1,†}

(1. 西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715;

2. 黔南民族师范学院物理与电子科学学院, 贵州 都匀 558000)

摘要: 本文采用超越平均场模型研究了缺中子 Ba 同位素链 $^{114-124}\text{Ba}$ 的八极形变及其演化规律。计算了 Ba 链的位能曲面、低能激发谱、电四极跃迁几率、电八极跃迁几率及集体波函数的几率密度分布, 并与实验相比较。理论计算较好地再现了 Ba 核的低能激发结构。位能曲面、低能的负宇称带、较大的 $B(E3; 3_1^- \rightarrow 0_1^+)$ 和展宽的几率密度分布表明, ^{114}Ba 中存在较强的八极关联。 $^{116,118}\text{Ba}$ 具有过渡核特征, 而 $^{120-124}\text{Ba}$ 则为典型的四极形变原子核。

关键词: 超越平均场模型; 八极形变; 低能负宇称带; 协变密度泛函理论

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.02.144

1 引言

尽管大多数变形的中重核和重核呈现四极反射对称平衡形状, 但在中子(质子)数 $N(Z) \approx 34, 56, 88$ 和 134 附近存在着八极形变(反射不对称, 梨形形状)区域^[1]。原子核的八极形变源自于费米面附近量子数为 (l, j) 和 $(l+3, j+3)$ 的单粒子能级之间强的八极关联, 其特征是存在低能负宇称带以及显著的电八极矩^[1-4]。最近有报道称, 在放射性离子束库仑激发实验中, ^{224}Ra ^[5]、 ^{144}Ba ^[6] 和 ^{146}Ba ^[7] 存在明显八极形变的证据。从而引起了人们对原子核八极形变, 特别是奇特原子核八极形变的高度关注。除丰中子 Ba 核外, 人们在缺中子 Xe, Ba 核中开展了一系列谱学测量实验, 显示在 $N \approx Z \approx 56$ 区域同样存在强八极关联^[8-16]。

为研究原子核八极形变并描述低能集体激发结构, 人们发展了一系列的理论模型, 例如密度泛函理论^[17-46]、宏观+微观模型^[47-50]、相互作用玻色子模型^[51-52] 以及反射不对称壳模型^[53-54] 等。特别是, 密度泛函理论能够实现对整个核素版图统一、自洽的描述, 在原子核基态性质、形状及形状演化方面取得了巨大成功^[55]。近年来, 具有相对论协变性的密度泛函理论(CDFT)得到了人们的广泛关注^[56-60], 它能够自洽包含自旋轨道相互作用^[61-63], 被成功地应用到整个核素版图, 包括从轻核到超重核^[64-70], 从 β 稳定谷到

滴线^[71-74], 从集体转动到集体振动^[75-82]。然而为了描述激发谱、电磁跃迁等激发态性质, 理论需要超越平均场近似, 即恢复破缺的对称性并考虑多个形状之间的耦合。将生成坐标方法(GCM)与投影技术相结合是一种直接的方法。最近, 基于非相对论^[30] 和相对论^[41, 43] 的协变密度泛函理论, 这种方法被推广到了反射不对称形状原子核中。然而, GCM 在重核区的应用十分耗时, 因此使用这种方法对中重质量区域的低能四极八极激发态进行研究是十分困难的。可行的方法是基于 CDFT 的相互作用玻色子模型^[34-36] 和四极八极集体哈密顿量模型^[40, 42]。特别地, 基于协变密度泛函的集体哈密顿量可由生成坐标方法在高斯重叠近似下导出^[83], 且高斯重叠近似的有效性已在文献^[84] 中得以验证。

最近, 文献^[44] 采用基于 CDFT 的集体哈密顿量模型对 Xe, Ba, Ce, Nd, Sm, Gd, Rn, Ra, Th, U, Pu, Cm, Cf, Fm 和 No 共 15 条同位素链进行了系统研究, 模型很好地再现了四极、八极集体态随同位素链的演化规律, 低能负宇称带、平均八极形变及电八极跃迁几率表明在 $(Z \sim 58, N \sim 90)$, $(Z \sim 90, N \sim 136)$ 和 $(Z \sim 96, N \sim 198)$ 区域存在稳定八极形变^[44, 85]。然而对缺中子核区, 特别是 $N \approx Z \approx 56$ 核区, 仍缺少相应的理论计算。

本文将采用基于 CDFT 的集体哈密顿量模型对缺

收稿日期: 2018-09-17; 修改日期: 2019-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11475140, 11875225, 11765015); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2016]312); 国家级大学生创新创业训练计划(201810635045)

作者简介: 孙玮(1998-), 女, 山东泰安人, 本科生, 从事原子核物理研究; E-mail: sdweiwei_hi@126.com

† 通信作者: 向剑, E-mail: jxiang@sgmtu.edu.cn; 李志攀, E-mail: zpliphy@swu.edu.cn.

中子Ba同位素链进行研究, 计算其位能曲面、低能激发谱、电磁跃迁和集体波函数等, 并与实验值相比较, 探索 ($Z \sim 56, N \sim 56$) 区域可能存在的八极形变和八极形状演化规律。

2 理论模型

四极-八极集体哈密顿量(QOCH)可以同时处理与原子核四极-八极集体振动和转动自由度相关的激发模式。QOCH可以由描述原子核内禀四极、八极形变的 β_2, β_3 以及定义原子核内禀主轴方向的欧拉角 $(\phi, \theta, \psi) \equiv \Omega$ 来确定, 其形式为

$$\hat{H}_{\text{coll}} = -\frac{\hbar^2}{2\sqrt{w\mathcal{I}}} \left[\frac{\partial}{\partial \beta_2} \sqrt{\frac{\mathcal{I}}{w}} B_{33} \frac{\partial}{\partial \beta_2} - \frac{\partial}{\partial \beta_2} \sqrt{\frac{\mathcal{I}}{w}} B_{23} \frac{\partial}{\partial \beta_3} - \frac{\partial}{\partial \beta_3} \sqrt{\frac{\mathcal{I}}{w}} B_{23} \frac{\partial}{\partial \beta_2} + \frac{\partial}{\partial \beta_3} \sqrt{\frac{\mathcal{I}}{w}} B_{22} \frac{\partial}{\partial \beta_3} \right] + \frac{\hat{J}^2}{2\mathcal{I}} + V_{\text{coll}}(\beta_2, \beta_3), \quad (1)$$

\hat{J} 表示在原子核内禀系中总角动量垂直于对称轴方向上的分量。式中的五个集体参量, 即三个质量参量 B_{22}, B_{23}, B_{33} , 转动惯量 \mathcal{I} 以及集体势场项 V_{coll} 均为 β_2, β_3 的函数。其中 $w = \sqrt{B_{22}B_{33} - B_{23}^2}$, 集体空间中的不变积分元为

$$\int d\tau_{\text{coll}} = \int \sqrt{w\mathcal{I}} d\beta_2 d\beta_3 d\Omega. \quad (2)$$

本文采用基展开的方法求解集体哈密顿量^[44], 最后解得体系的集体波函数为

$$\Psi_{\alpha}^{IM\pi}(\beta_2, \beta_3, \Omega) = \psi_{\alpha}^{I\pi}(\beta_2, \beta_3) |IM0\rangle, \quad (3)$$

通过集体波函数可以计算多个观测量, 如约化的电磁跃迁几率为

$$B(E\lambda, I_i \rightarrow I_f) = \langle I_i 0 \lambda 0 | I_f 0 \rangle^2 \left| \int d\beta_2 d\beta_3 \sqrt{w\mathcal{I}} \psi_i \mathcal{M}_{E\lambda}(\beta_2, \beta_3) \psi_f^* \right|^2, \quad (4)$$

$\mathcal{M}_{E\lambda}$ 为 λ 阶电矩期望值, 微观表达形式为 $\mathcal{M}_{E\lambda} = \langle \Phi(\beta_2, \beta_3) | \hat{\mathcal{M}}(E\lambda) | \Phi(\beta_2, \beta_3) \rangle$, 其中 $\Phi(\beta_2, \beta_3)$ 表示原子核在形变 (β_2, β_3) 处的波函数。

QOCH中的五个集体参量可以通过微观自洽的协变密度泛函理论计算得到, 其中转动惯量由 Inglis-Belyaev 公式^[86-87]计算:

$$\mathcal{I} = \sum_{i,j} \frac{(u_i v_j - v_i u_j)^2}{E_i + E_j} |i \hat{J} | j\rangle|^2, \quad (5)$$

\hat{J} 是垂直于对称轴的角动量。准粒子能量 E_i 、占有几率 v_i 和单核子波函数 ψ_i 由协变密度泛函理论计算得出。集体质量 B_{22}, B_{23}, B_{33} 由推转近似^[44, 88]得到:

$$B_{\lambda\lambda'}(q_2, q_3) = \frac{\hbar^2}{2} \left[\mathcal{M}_{(1)}^{-1} \mathcal{M}_{(3)} \mathcal{M}_{(1)}^{-1} \right]_{\lambda\lambda'}, \quad (6)$$

其中:

$$\mathcal{M}_{(n), \lambda\lambda'}(q_2, q_3) = \sum_{i,j} \frac{\langle i | \hat{Q}_{\lambda} | j \rangle \langle j | \hat{Q}_{\lambda'} | i \rangle (u_i v_j + v_i u_j)^2}{(E_i + E_j)^n}, \quad (7)$$

\hat{Q}_2 和 \hat{Q}_3 分别为质量四极和八极算符, $q_{\lambda} = \langle \hat{Q}_{\lambda} \rangle$ 。集体势场 V_{coll} 可由原子核总能量扣除零点修正能(ZPE)得到:

$$V_{\text{coll}}(\beta_2, \beta_3) = E_{\text{MF}}(\beta_2, \beta_3) - \Delta V_{\text{vib}}(\beta_2, \beta_3) - \Delta V_{\text{rot}}(\beta_2, \beta_3). \quad (8)$$

振动零点修正能和转动零点修正能的表达式^[88]分别为

$$\Delta V_{\text{vib}}(\beta_2, \beta_3) = \frac{1}{4} \text{Tr} \left[\mathcal{M}_{(3)}^{-1} \mathcal{M}_{(2)} \right] \quad (9)$$

和

$$\Delta V_{\text{rot}}(\beta_2, \beta_3) = \frac{\langle \hat{J}^2 \rangle}{2\mathcal{I}}. \quad (10)$$

3 计算结果与讨论

在本节中, 我们采用基于 CDFT 的 QOCH 研究中子数 $N = 58 \sim 68$ 的 Ba 同位素链。为确定 QOCH 中的集体参量, 需进行约束的 Relativistic Hartree-Bogoliubov(RHB) 计算, 其中粒子-空穴相互作用道采用 DD-PC1 泛函^[89], 粒子-粒子相互作用道采用可分离对力^[90]。Dirac 方程由轴对称谐振子基展开方法求解^[91], Dirac 旋量的上分量主壳截断选取为 $N_f = 16$, 下分量截断为 $N_g = 17$ 。

表 1 列出了理论计算得到的 $^{114-124}\text{Ba}$ 的结合能和

表 1 理论计算得到的 $^{114-124}\text{Ba}$ 的结合能和双质子分离能, 并与实验结果^[92]作对照 MeV

	BE(Th.)	BE(Exp.)	S_{2p} (Th.)	S_{2p} (Exp.)
^{114}Ba	922.49	922.23	0.61	0.46(10)
^{116}Ba	947.58	947.02	2.54	2.07(20)
^{118}Ba	971.58	970.90	4.28	3.89(20)
^{120}Ba	994.42	993.60	5.70	5.4(3)
^{122}Ba	1016.35	1015.50	7.02	7.01(3)
^{124}Ba	1037.20	1036.12	8.32	8.313(17)

双质子分离能，并与实验结果相比较，理论结果与实验很好得符合。计算结果显示，Ba 同位素链的质子滴线在 ^{114}Ba 处，与目前实验上给出的质子滴线位置^[92]一致。图 1 为自洽 RHB 计算得到的 $^{114}\text{--}^{124}\text{Ba}$ 在 $(\beta_2\text{--}\beta_3)$ 平面上分布的位能曲面。由图可见， ^{114}Ba 的极小值

出现在 $(\beta_2, \beta_3) \approx (0.27, 0.12)$ 附近，其相对于非八极的轴对称鞍点 $(\beta_2, \beta_3) \approx (0.26, 0.00)$ 低约 0.32 MeV。 $^{116,118}\text{Ba}$ 极小点附近的位能曲面在 β_2 和 β_3 方向上均比较软，具有过渡核特征。 $^{120\text{--}124}\text{Ba}$ 为典型的四极形变原子核，其形变值约为 0.34。

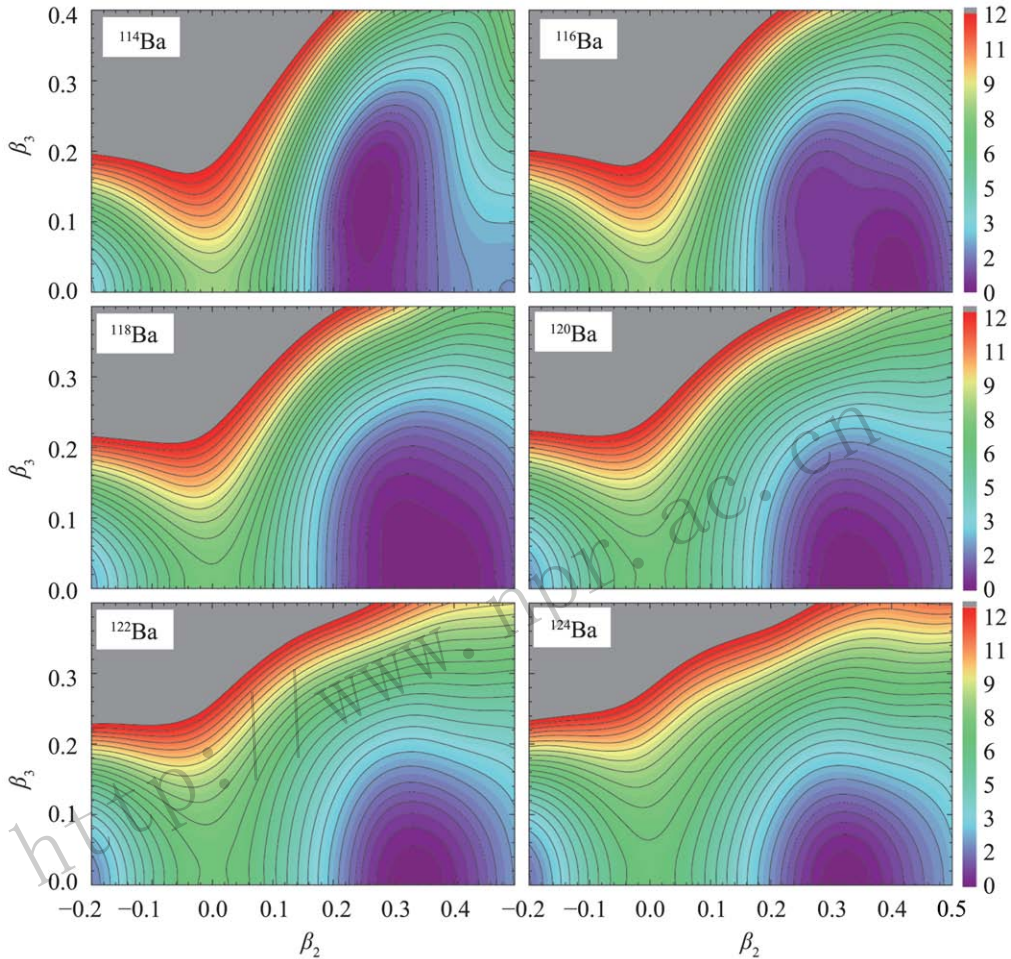


图 1 (在线彩图) 自洽 RHB 计算得到的 $^{114}\text{--}^{124}\text{Ba}$ 在 (β_2, β_3) 平面上分布的位能曲面
所有能量值都相对极小值作平移，相邻的 contour 实线与虚线之间相差 0.25 MeV，实线与实线之间相差 0.5 MeV。

图 2 给出了基于 CDFT 的 QOCH 模型计算得到的 Ba 同位素链的激发谱，并与实验值做比较，黑色和蓝色箭头分别代表 $B(E2)$ 和 $B(E3)$ 跃迁值。从图中可看出，理论计算较好地再现了 Ba 同位素链的低能激发结构，尤其是正宇称基态带，而负宇称带的能量值整体偏高，可能是因为推转近似计算得到的集体质量偏小的缘故^[93]。特别值得关注的是 ^{114}Ba ，其负宇称带在所有 Ba 同位素链中最低，且正负宇称带间 $B(E3)$ 跃迁值最大， $B(E3; 3_1^- \rightarrow 0_1^+) = 28\text{W.u.}$ ，较好地符合了八极形变原子核的特征。

为进一步展示 Ba 同位素链四极、八极形变演化规律，图 3 分别给出了 Ba 核中 $E(4_1^+)/E(2_1^+)$ 、 $E(3_1^-)$ 、

$B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ 和 $B(E3; 3_1^- \rightarrow 0_1^+)$ 四个特征量随中子数的变化趋势。随着中子数的增加， $B(E3)$ 值呈现出递减的趋势，依次约为 28, 21, 18, 16, 14, 12。而 $E(3_1^-)$ 的最小值出现在 ^{114}Ba ，并且，随着中子数的增加 $E(3_1^-)$ 递增。这都体现出 $^{114}\text{--}^{124}\text{Ba}$ 的八极关联强度在逐渐减小。 $E(4_1^+)/E(2_1^+)$ 和 $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ 与四极形变有关。由图 3(a) 可以看出实验值和理论值的变化趋势相同，只是理论值整体偏高，接近转子的比值 3.33。可能是由于目前的理论模型未包含三轴形变自由度。而图 3(b) 则显示，随着中子数的增加 $B(E2)$ 先增大然后缓慢下降， ^{118}Ba 的四极集体性最强。

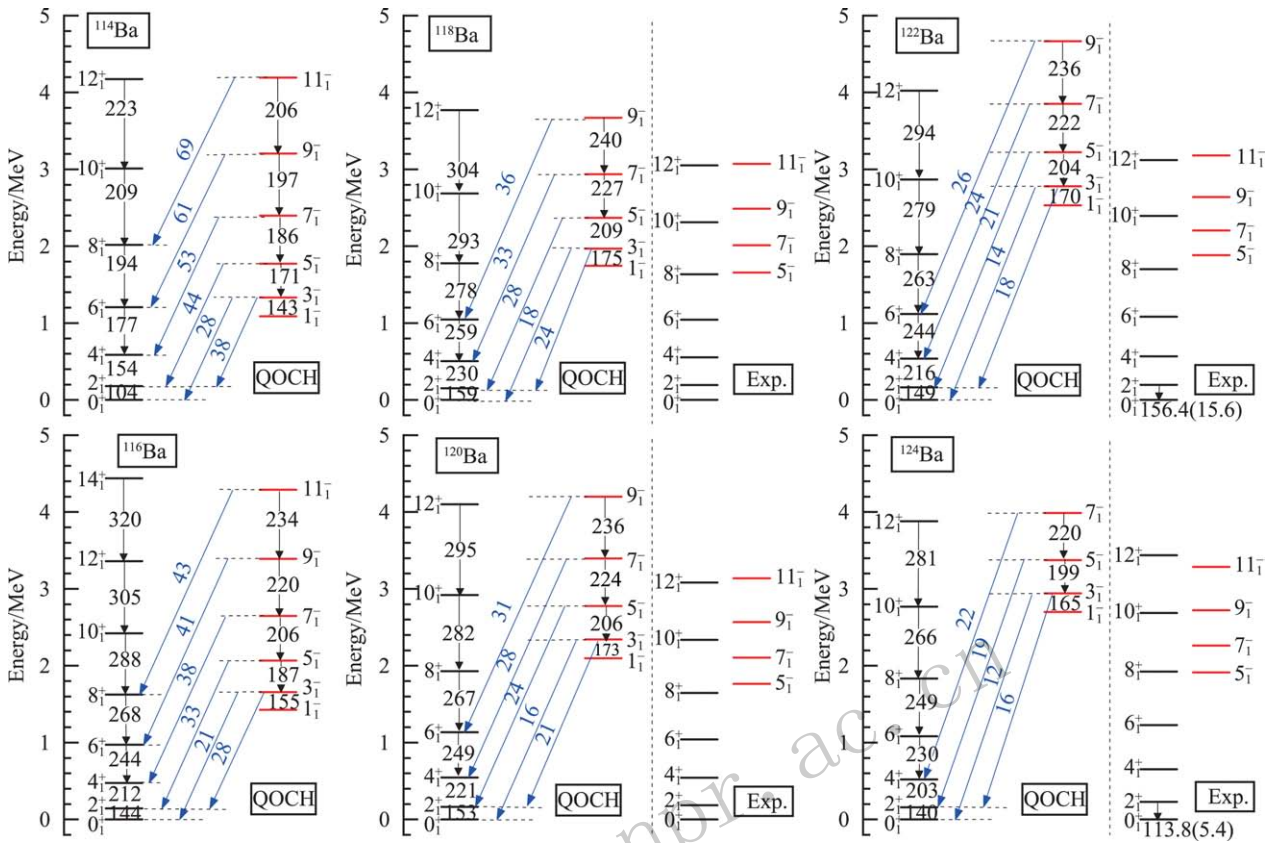


图 2 (在线彩图) 采用 QOCH 模型计算得到的 $^{114}\text{--}^{124}\text{Ba}$ 低能激发谱及电磁跃迁几率, 并与实验值^[92]相比较
黑色和蓝色箭头分别代表 $B(E2)$ 和 $B(E3)$ 跃迁值, 单位为 W.u.。

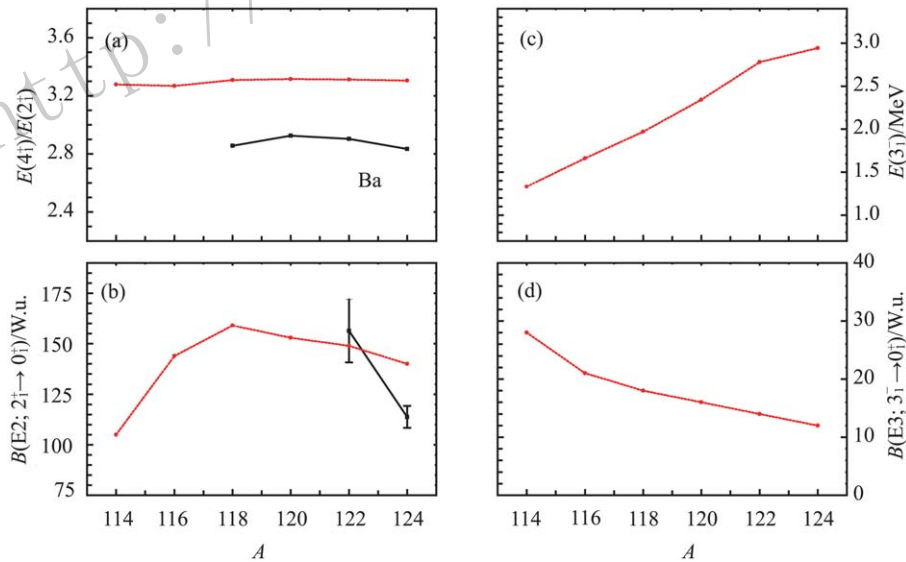


图 3 (在线彩图) QOCH 模型计算所得 $B(4_1^+)/E(2_1^+)$ (a), $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ (b), $E(3_1^-)$ (c) 和 $B(E3; 3_1^- \rightarrow 0_1^+)$ (d) 随中子数的变化并与实验值^[92]相比较

图 4 给出了 QOCH 计算得到的 Ba 同位素链基态的几率密度分布。 $^{114}\text{--}^{124}\text{Ba}$ 的几率密度峰值均出现在 $\beta_3 = 0$, ^{114}Ba 的几率密度分布在八极方向有较大展宽, 随中子数增加, 展宽逐渐减弱, 与 $B(E3; 3_1^- \rightarrow 0_1^+)$

的演化规律一致。几率密度峰值所对应的 β_2 随中子数增加先增大而后缓慢减小, 与 $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ 行为一致。整体而言, ^{114}Ba 具有较强的八极关联, 而 $^{120}\text{--}^{124}\text{Ba}$ 则为典型的四极形变原子核。

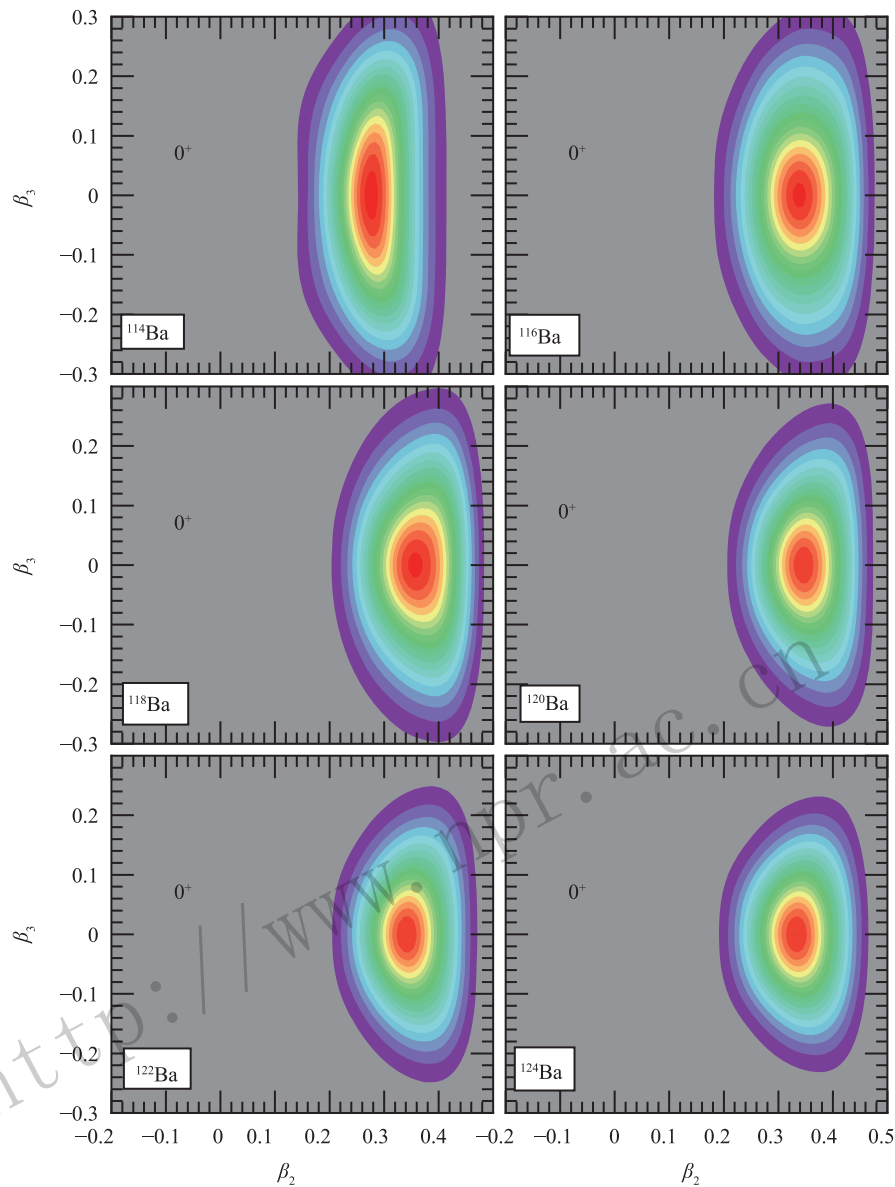


图 4 (在线彩图)QOCH模型计算得到的 $^{114-124}\text{Ba}$ 基态的几率密度分布

4 结论

本文采用超越平均场模型,即基于协变密度泛函的集体哈密顿量模型,研究了缺中子Ba同位素链 $^{114-124}\text{Ba}$ 的八极形变及其演化规律。计算了Ba链的位能曲面、低能激发谱、电四极跃迁几率、电八极跃迁几率及集体波函数的几率密度分布,并与实验相比较。理论计算较好地再现了Ba核的低能激发结构。 $B(4_1^+)/E(2_1^+)$ 、 $B(E2;2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ 、 $E(3_1^-)$ 、 $B(E3;3_1^- \rightarrow 0_1^+)$ 以及集体几率密度分布明确展示了Ba同位素链的四极八极形状演化趋势,随中子数增加,八极关联强度逐渐减小,四极集体性先增大而后缓慢减小。特别值得强调的是,位能曲面、低能的负宇称带、较大的 $B(E3;3_1^- \rightarrow 0_1^+)$ 和展宽的几率密度分布表

明 ^{114}Ba 中存在较强的八极关联。除本文所讨论的偶偶核外,实验上对Ba的缺中子奇A核中八极关联效应也很感兴趣^[8, 12, 14, 16]。基于微观QOCH的核芯准粒子耦合模型可用于研究奇A核八极关联,相关工作正在进行中。

参考文献:

- [1] BUTLER P A, NAZAREWICZ W. *Rev Mod Phys*, 1996, **68**: 349.
- [2] AHMAD I, BUTLER P A. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 1993, **43**: 71.
- [3] BUTLER P A, WILLMANN L. *Nucl Phys News*, 2015, **25**: 12.
- [4] BUTLER P A. *J Phys G*, 2016, **43**: 073002.
- [5] GAFFNEY L P, BUTLER P A, SCHECK M, *et al. Nature*

- (London), 2013, **497**: 199.
- [6] BUCHER B, ZHU S, WU C Y, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2016, **116**: 112503.
- [7] BUCHER B, ZHU S, WU C Y, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2017, **118**: 152504.
- [8] DING B, LIU Z, SEWERYNIAK D, *et al.* *Phys Rev C*, 2017, **95**: 024301.
- [9] SMITH J F, CHIARA C J, FOSSAN D B, *et al.* *Phys Lett B*, 2001, **523**: 13.
- [10] DE ANGELIS G, GADEA A, FARNEA E, *et al.* *Phys Lett B*, 2002, **535**: 93.
- [11] DEGRAAF J, CROMAZ M, DRAKE T E, *et al.* *Phys Rev C*, 1998, **58**: 164.
- [12] LIU Z, SUN X, ZHOU X, *et al.* *Eur Phys J A*, 1998, **1**: 125.
- [13] SMITH J F, CHIARA C J, FOSSAN D B, *et al.* *Phys Rev C*, 1998, **57**: R1037.
- [14] CHEN X C, ZHAO J, XU C, *et al.* *Phys Rev C*, 2016, **94**: 021301.
- [15] ZHU S J, SAKHAE M, YANG L M, *et al.* *Chin Phys Lett*, 2001, **18**: 1027.
- [16] MASON P, BENZONI G, BRACCO A, *et al.* *Phys Rev C*, 2005, **72**: 064315.
- [17] AFANASJEV A V, ABUSARA H, AGBEMAVA, S E. *Phys Scr*, 2018, **93**: 034002.
- [18] FU Y, WANG H, WANG L J, *et al.* *Phys Rev C*, 2018, **97**: 024338.
- [19] MAREVIC P, EBRAN J P, KHAN E, *et al.* *Phys Rev C*, 2018, **97**: 024334.
- [20] NOMURA K, NIKSIC T, VRETENAR D. *Phys Rev C*, 2018, **97**: 024317.
- [21] ZHANG W, NIU Y F. *Phys Rev C*, 2017, **96**: 054308.
- [22] AGBEMAVA S E, AFANASJEV A V. *Phys Rev C*, 2017, **96**: 024301.
- [23] YAO J M, ENGEL J. *Phys Rev C*, 2016, **94**: 014306.
- [24] GENG L S, MENG J, TOKI H. *Chin Phys Lett*, 2017, **24**: 1865.
- [25] GUO J Y, JIAO P, FANG X Z. *Phys Rev C*, 2010, **82**: 047301.
- [26] ROBLEDO L M, BALDO M, SCHUCK P, *et al.* *Phys Rev C*, 2010, **81**: 034315.
- [27] ROBLEDO L M, BERTSCH G F. *Phys Rev C*, 2011, **84**: 054302.
- [28] RODRIGUEZ-GUZMAN R, ROBLEDO L M, SARRIGUREN P. *Phys Rev C*, 2012, **86**: 034336.
- [29] ROBLEDO L M, BUTLER P A. *Phys Rev C*, 2013, **88**: 051302.
- [30] BERNARD R N, ROBLEDO L M, RODRIGUEZ T R. *Phys Rev C*, 2016, **93**: 061302.
- [31] ROBLEDO L M. *J Phys G*, 2015, **42**: 055109.
- [32] ZHAO J, LU B N, ZHAO E G, *et al.* *Phys Rev C*, 2012, **86**: 057304.
- [33] ZHOU S G. *Phys Scr*, 2016, **91**: 063008.
- [34] NOMURA K, VRETENAR D, LU B N. *Phys Rev C*, 2013, **88**: 021303.
- [35] NOMURA K, VRETENAR D, NIKSIC T, *et al.* *Phys Rev C*, 2014, **89**: 024312.
- [36] NOMURA K, RODRIGUEZ-GUZMAN R, ROBLEDO L M. *Phys Rev C*, 2015, **92**: 014312.
- [37] AGBEMAVA S E, AFANASJEV A V, RING P. *Phys Rev C*, 2016, **93**: 044304.
- [38] YAO J M, HAGINO K. *Phys Rev C*, 2016, **94**: 011303.
- [39] ZHANG W, LI Z P, ZHANG S Q, *et al.* *Phys Rev C*, 2010, **81**: 034302.
- [40] LI Z P, SONG B Y, YAO J M, *et al.* *Phys Lett B*, 2013, **726**: 866.
- [41] YAO J M, ZHOU E F, LI Z P. *Phys Rev C*, 2015, **92**: 041304.
- [42] LI Z P, NIKSIC T, VRETENAR D. *J Phys G*, 2016, **43**: 024005.
- [43] ZHOU E F, YAO J M, LI Z P, *et al.* *Phys Lett B*, 2016, **753**: 227.
- [44] XIA S Y, TAO H, LU Y, *et al.* *Phys Rev C*, 2017, **96**: 054303.
- [45] TAO H, ZHAO J, LI Z P, *et al.* *Phys Rev C*, 2017, **96**: 024319.
- [46] EBATA S, NAKATSUKASA T. *Phys Scr*, 2017, **92**: 064005.
- [47] MOLLER P, BENGTSSON R, CARLSSON B G, *et al.* *At Data Nucl Data Tables*, 2008, **94**: 758.
- [48] WANG H L, YANG J, LIU M L, *et al.* *Phys Rev C*, 2015, **92**: 024303.
- [49] NAZAREWICZ W, OLANDERS P, RAGNARSSON I, *et al.* *Nucl Phys A*, 1984, **429**: 269.
- [50] LIU C, WANG S Y, QI B, *et al.* *Chin Phys C*, 2018, **42**: 074105.
- [51] ZAMFIR N V, KUSNEZOV D. *Phys Rev C*, 2001, **63**: 054306.
- [52] OTSUKA T, SUGITA M. *Phys Lett B*, 1988, **209**: 140.
- [53] CHEN Y S, GAO Z C. *Phys Rev C*, 2000, **63**: 014314.
- [54] CHEN Y J, GAO Z C, CHEN Y S, *et al.* *Phys Rev C*, 2015, **91**: 014317.
- [55] BENDER M, HEENEN P H, REINHARD P G. *Rev Mod Phys*, 2003, **121**: 75.
- [56] RING P. *Prog Part Nucl Phys*, 1996, **37**: 193.
- [57] VRETENAR D, AFANASJEV A V, LALAZISSIS G A, *et al.* *Phys Rep*, 2005, **409**: 101.
- [58] MENG J, TOKI H, ZHOU S G, *et al.* *Prog Part Nucl Phys*, 2006, **57**: 470.
- [59] MENG J, PENG J, ZHANG S Q, *et al.* *Front Phys*, 2013, **8**: 55.
- [60] MENG J. *Relativistic Density Functional for Nuclear Structure*[M]. Singapore: World Scientific, 2016.
- [61] MENG J, SUGAWARA-TANABE K, YAMAJI S, *et al.* *Phys Rev C*, 1999, **59**: 154.
- [62] ZHOU S G, MENG J, RING P. *Phys Rev Lett*, 2003, **91**: 262501.
- [63] LIANG H Z, MENG J, ZHOU S G. *Phys Rep*, 2015, **570**: 1.
- [64] LONG W H, MEGN J, VAN GIAI N, *et al.* *Phys Rev C*, 2004, **69**: 034319.
- [65] ZHANG W, MENG J, ZHANG S Q, *et al.* *Nucl Phys A*, 2005, **753**: 106.

- [66] ZHAO P W, LI Z P, YAO J M, *et al.* *Phys Rev C*, 2010, **82**: 054319.
- [67] ZHANG W, LI Z P, ZHANG S Q. *Phys Rev C*, 2013, **88**: 054324.
- [68] QUAN S, CHEN Q, LI Z P, *et al.* *Phys Rev C*, 2017, **95**: 054321.
- [69] LU K Q, LI Z X, LI Z P, *et al.* *Phys Rev C*, 2015, **91**: 027304.
- [70] ZHANG Q S, NIU Z M, LI Z P, *et al.* *Fron of Phys*, 2014, **9**: 529.
- [71] MENG J, RING P. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**: 3963.
- [72] MENG J, RING P. *Phys Rev Lett*, 1998, **80**: 460.
- [73] MENG J, TOKI H, ZENG J Y, *et al.* *Phys Rev C*, 2002, **65**: 041302.
- [74] MENG J, ZHOU S G. *J Phys G*, 2015, **42**: 093101.
- [75] LIANG H Z, VAN GIAI N, MENG J. *Phys Rev Lett*, 2008, **101**: 122502.
- [76] LIANG H Z, VAN GIAI N, MENG J. *Phys Rev C*, 2009, **79**: 064316.
- [77] ZHAO P W, ZHANG S Q, PENG J, *et al.* *Phys Lett B*, 2011, **699**: 181.
- [78] ZHAO P W, PENG J, LIANG H Z, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2011, **107**: 122501.
- [79] ZHAO P W, PENG J, LIANG H Z, *et al.* *Phys Rev C*, 2012, **85**: 054310.
- [80] ZHAO P W, ITAGAKI N, MENG J. *Phys Rev Lett*, 2015, **115**: 022501.
- [81] ZHAO P W, ZHANG S Q, MENG J. *Phys Rev C*, 2015, **92**: 034319.
- [82] ZHAO P W. *Phys Lett B*, 2017, **773**: 1.
- [83] RING P, SCHUCK P. *The Nuclear Many-Body Problem*[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1980.
- [84] YAO J M, HAGINO K, LI Z P, *et al.* *Phys Rev C*, 2014, **89**: 054306.
- [85] XU Z, LI Z P. *Chin Phys C*, 2017, **41**: 124107.
- [86] INGLIS D R. *Phys Rev*, 1956, **103**: 1786.
- [87] BELIAEV S T. *Nucl Phys*, 1961, **24**: 322.
- [88] GIROD M, GRAMMATICOS B. *Nucl Phys A*, 1979, **330**: 40.
- [89] NIKSIC T, VRETENAR D, RING P. *Phys Rev C*, 2008, **78**: 034318.
- [90] TIAN Y, MA Z Y, RING P. *Phys Lett B*, 2009, **676**: 44.
- [91] NIKSIC T, PAAR N, VRETENAR D, *et al.* *Comm Phys Comm*, 2014, **185**: 1808.
- [92] NNDC National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. [EB/OL]. [2018-08-1]. <http://www.nndc.bnl.gov/>.
- [93] HINOHARA N, LI Z P, NAKATSUKASA T, *et al.* *Phys Rev C*, 2012, **85**: 024323.

Beyond-mean-field Study of Octupole Shape Evolution in Neutron-deficient Ba Isotopes

SUN Wei¹, QUAN Shan¹, XIANG Jian^{2,†}, LI Zhipan^{1,†}

(1. School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Physics and Electronic, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun 558000, Guizhou, China)

Abstract: The beyond-mean-field model is applied to study the octupole deformation and shape transition in $^{114-124}\text{Ba}$. Potential energy surfaces (PES), low-energy excitation spectra, electric transition rates, and probability density distributions in Ba isotopes are systematically analyzed using a quadrupole-octupole collective Hamiltonian (QOCH) model based on covariant density functional theory. The microscopic QOCH model is shown to accurately describe the empirical trend of low-energy positive- and negative-parity states. The theoretical results of PES, low-lying negative-parity bands, rather large $B(E3; 3_1^- \rightarrow 0_1^+)$, and extended probability density distributions show evidence of strong octupole correlations in ^{114}Ba . $^{116,118}\text{Ba}$ present as transitional nuclei, while $^{120-124}\text{Ba}$ are well quadrupole deformed nuclei.

Key words: beyond-mean-field model; octupole deformation; low-lying spectrum; covariant density functional theory

Received date: 17 Sep. 2018; **Revised date:** 27 Mar. 2019

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11475140, 11875225, 11765015); Joint Fund Project of Education Department in Guizhou Province(Qianjiaohe KY Zi[2016]312); National Undergraduate Training Programs for Innovation and Entrepreneurship (201810635045)

† **Corresponding author:** XIANG Jian, E-mail: jxiang@sgmtu.edu.cn; LI Zhipan, E-mail: zpliph@swu.edu.cn.