

# 超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的基态性质\*

周芳<sup>1,2;1)</sup> 郭建友<sup>1</sup>

1 (安徽大学物理与材料科学学院 合肥 230039)

2 (安徽海军蚌埠士官学校基础部 蚌埠 233012)

**摘要** 用形变约束的相对论平均场理论系统研究了超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的基态性质,给出了这些原子核的每核子结合能和 $\alpha$ 衰变能以及基态形变,并与实验结果进行了比较,发现理论计算和实验结果符合得很好,表明相对论平均场理论对超重核基态性质的描述是合理有效的.

**关键词** 超重核 相对论平均场理论  $\alpha$ 衰变 基态性质

## 1 引言

20世纪60年代,核物理学家们提出了“超重核稳定岛”假说,预言在质子数为114、中子数为184的壳层附近存在着超重核稳定区域,从此寻找超重核成为人们一直努力探索的重要课题之一.近年来,随着现代大型加速器的发展,超重核的合成取得了重要进展<sup>[1-10]</sup>.德国GSI实验室的科学家连续合成了107号到112号元素.在俄国Dubna,科学家们成功发现了第114号和116号元素.最近,Oganessian等人声称:他们利用<sup>249</sup>Cf+<sup>48</sup>Ca反应合成了超重核<sup>294</sup>118及其同位素<sup>[11]</sup>.新合成的超重核素及其实验数据可以用来检验现有各种核理论模型在超重核区域的有效性和可靠性.相对论平均场(RMF)模型自从提出以来,就被广泛应用于原子核性质的研究<sup>[12-20]</sup>.一些理论研究表明相对论平均场对超重核的研究是可靠的和有效的<sup>[16-19]</sup>.本文将用形变约束的相对论平均场理论研究超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的基态性质,并与可获得的实验数据比较,进一步确认相对论平均场理论研究超重核的可靠性和稳定性.

## 2 理论框架

本文采用形变约束的相对论平均场(RMF)理论研究超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的基态性质,计算细

节可参考文献[13].为叙述方便,下面首先简单介绍相对论平均场理论框架,然后分析超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的性质.

RMF模型把核子描述为在介子的经典场中运动的Dirac粒子,核子通过交换各种介子和光子相互作用.在考虑了介子和介子的非线性作用后,相对论平均场的拉格朗日量可以写成:

$$L = \bar{\psi} \left[ i\gamma^\mu \partial_\mu - m - g_\sigma \sigma - g_\omega \gamma^\mu \omega_\mu - g_\rho \gamma^\mu \tau \cdot \rho_\mu - e\gamma^\mu \frac{1-\tau_3}{2} A_\mu \right] + \frac{1}{2} \partial^\mu \sigma \partial_\mu \sigma - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \frac{1}{4} g_3 \sigma^4 - \frac{1}{4} \omega^{\mu\nu} \omega_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega^\mu \omega_\mu + \frac{1}{4} c_3 (\omega^\mu \omega_\mu)^2 - \frac{1}{4} \rho^{\mu\nu} \cdot \rho_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho^\mu \cdot \rho_\mu - \frac{1}{4} A^{\mu\nu} A_{\mu\nu}, \quad (1)$$

其中 $\psi$ 是核子的Dirac旋量, $\sigma$ 和 $\omega$ 分别是同位旋标量-标量和同位旋标量-矢量介子,它们分别提供中程吸引作用和短程排斥作用. $\rho$ 是同位旋矢量-矢量介子,描述中子和质子的区别.光子场 $A$ 提供了原子核的电磁属性.相应的场张量分别为

$$\begin{aligned} \omega^{\mu\nu} &= \partial^\mu \omega^\nu - \partial^\nu \omega^\mu, \\ A^{\mu\nu} &= \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu, \\ \rho^{\mu\nu} &= \partial^\mu \rho^\nu - \partial^\nu \rho^\mu - 2g_\rho \rho^\mu \times \rho^\nu. \end{aligned} \quad (2)$$

2007-03-09 收稿

\* 国家自然科学基金(10475001, 10675001), 教育部新世纪优秀人才支持计划基金(NCET-05-0558), 安徽省高等学校拔尖人才基金, 安徽省教育厅基金(2006KJ259B)和安徽大学研究生创新计划(20073040)资助

1) E-mail: fangzhou1266@126.com

从包括核子、介子和光子场及其相互作用的拉格朗日量出发, 利用变分原理, 可得核子运动的Dirac方程:

$$\left[ i\gamma^\mu \partial_\mu - m - g_\sigma \sigma - g_\omega \gamma^\mu \omega_\mu - g_\rho \gamma^\mu \tau \cdot \rho_\mu - e\gamma^\mu \frac{1-\tau_3}{2} A_\mu \right] \psi = 0. \quad (3)$$

和介子和光子运动的Klein-Gordon方程:

$$\begin{cases} (\partial^\mu \partial_\mu + m_\sigma^2) \sigma = -g_\sigma \bar{\psi} \psi - g_2 \sigma^2 - g_3 \sigma^3, \\ \partial_\mu \omega^{\mu\nu} + m_\omega^2 \omega^\nu + c_3 (\eta^\nu \omega^\nu)^3 = g_\omega \bar{\psi} \gamma^\nu \psi, \\ \partial_\mu \rho^{\mu\nu} + m_\rho^2 \rho^\nu = g_\rho \bar{\psi} \gamma^\nu \tau \psi + g_\rho \rho_\mu \times \rho^{\mu\nu}, \\ \partial_\mu A^{\mu\nu} = e \bar{\psi} \gamma^\mu \frac{1-\tau_3}{2} \psi. \end{cases} \quad (4)$$

耦合方程(3)和(4)是非线性的场方程, 严格求解十分困难. 为此, 一般采用平均场近似处理, 介子场用它们的经典期望值代替, 核子被处理成在经典的介子场中独立运动. 考虑到时间反演对称性, 系统没有流,  $\omega^\mu$ ,  $\rho^{\mu\nu}$  和  $A^\mu$  的空间分量消失. 电荷守恒性保证了仅仅同位旋矢量介子的第三分量  $\rho^{00}$  存在. 具体计算细节可参看文献[13]. 本文采用轴对称谐振子基展开的办法求解Dirac方程和Klein-Gordon方程, 具体计算中, 展开的谐振子基取为  $N_f = N_b = 20$ . 为计算简便, 对关联采用常数对力的BCS近似处理, 对能隙取  $\Delta_n = \Delta_p = 11.2/\sqrt{A}$ .

### 3 计算结果与分析

结合能和 $\alpha$ 衰变能是反映超重核基态性质的两个重要参量, 表1列出了用RMF计算给出的超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的结合能、 $\alpha$ 衰变能和四极形变, RMF计算中采用了TMA相互作用参数组<sup>[22]</sup>. 为比较, 表中也列出了可获得的实验数据.

表 1 RMF理论计算给出的超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的结合能、 $\alpha$ 衰变能和四极形变及其与实验的比较(#为估计值)

Nuclei	$B/A$	$Q_\alpha$	$\beta_2$	$B/A(\text{Expt})$	$Q_\alpha(\text{Expt})$
<sup>258</sup> 100	7.422	6.66	0.26	7.418#[ <sup>21</sup> ]	6.66#[ <sup>21</sup> ]
<sup>262</sup> 102	7.392	6.71	0.26	7.385#[ <sup>21</sup> ]	7.10#[ <sup>21</sup> ]
<sup>266</sup> 104	7.358	7.64	0.26	7.353#[ <sup>21</sup> ]	7.50#[ <sup>21</sup> ]
<sup>270</sup> 106	7.325	7.88	0.20	7.315#[ <sup>21</sup> ]	9.10#[ <sup>21</sup> ]
<sup>274</sup> 108	7.289	8.9	0.20	7.276#[ <sup>21</sup> ]	9.50#[ <sup>21</sup> ]
<sup>278</sup> 110	7.248	10.42	0.18	7.238#[ <sup>21</sup> ]	10.00#[ <sup>21</sup> ]
<sup>282</sup> 112	7.207	10.82	0.16	7.200#[ <sup>21</sup> ]	$\leq 10.69$ [ <sup>7</sup> ]
<sup>286</sup> 114	7.169	10.37	0.48	7.161#[ <sup>21</sup> ]	$10.33 \pm 0.06$ [ <sup>7</sup> ]
<sup>290</sup> 116	7.132	10.38	0.50	7.120#[ <sup>21</sup> ]	$11.00 \pm 0.08$ [ <sup>7</sup> ]
<sup>294</sup> 118	7.092	11.62	0.52		$11.81 \pm 0.06$ [ <sup>7</sup> ]

从表1可以看出, 平均结合能的计算值与实验估计值符合得很好, 最大相对误差小于0.12%. 尤其对于较轻的核, 平均结合能与实验估计值符合得更好, 对于较重的核, RMF计算的偏差稍微大一些. 为了更加直观地反映RMF计算与实验数据的符合程度, 图1给出了超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的平均结合能随核子数变化的曲线.

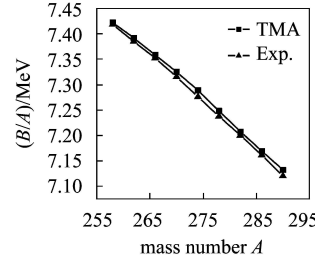


图 1 超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的平均结合能与实验值的比较

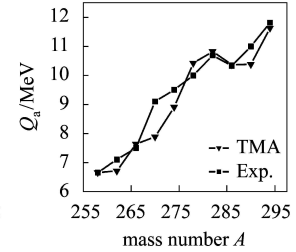


图 2 超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的 $\alpha$ 衰变能( $Q_\alpha$ )与实验值的比较

从图中可以看出, 计算曲线与实验估计曲线非常接近, 几乎重合. 而且很明显, TMA参数组计算的理论值比实验估计值略大. 当然, RMF理论计算出的理论值是否真的与这些超重核的实际情况吻合得很好还有待于未来实验的进一步验证.

图2给出了超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的 $\alpha$ 衰变能, 可以看到理论计算与实验观测的数值变化的趋势基本一致, 平均误差仅为0.37MeV. 其中, 第100和114号元素的计算值与实验值符合得最好.

除了结合能外, 形变也是反映原子核性质的一个重要参量. 表1也列出了<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的基态形变. 从表1可以看出, 超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链基本上是长椭球形变. 对于<sup>286</sup>114, <sup>290</sup>116, <sup>294</sup>118, 这3个超重核的基态四极形变较大,  $\beta_2 \approx 0.5$ ; 而对于 $Z = 100-112$ 的超重核, 基态四极形变较小,  $\beta_2 \approx 0.2$ . 在整个 $\alpha$ 衰变链中, 基态的四极形变随质量数的增加有先减小而后增加的趋势. 为进一步研究超重核<sup>294</sup>118及其 $\alpha$ 衰变链的基态形变, 图3给出了超重核<sup>294</sup>118, <sup>290</sup>116, <sup>286</sup>114和<sup>282</sup>112的位能曲线.

从图3中可以看出, <sup>294</sup>118, <sup>290</sup>116和<sup>286</sup>114核的基态, 四极形变 $\beta_2 \approx 0.5$ , 说明这些核的基态可能是大形变核, 而<sup>282</sup>112核, 基态的四极形变 $\beta_2 \approx 0.16$ , 属于形变较小的正常形变核. 从 $\beta_2 = -0.2$ 到 $\beta_2 = 0.5$ , <sup>294</sup>118, <sup>290</sup>116, <sup>286</sup>114和<sup>282</sup>112的位能曲线都是相对平坦的, 尤其是<sup>286</sup>114, 核的能量变化都在2.5MeV以下, 说明它们是 $\beta_2$ 软核, 不是刚性很好的长椭球核. 此外, 我们也可以看出, <sup>294</sup>118, <sup>290</sup>116和<sup>286</sup>114等3个核在

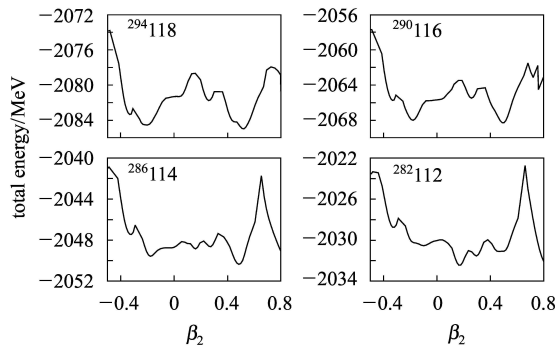


图 3 RMF 计算给出的超重核  $^{294}_{118}$ ,  $^{290}_{116}$ ,  $^{286}_{114}$  和  $^{282}_{112}$  的位能曲线

$\beta_2 \approx -0.2$  处都有一个扁椭球形变第二极小, 能量比其

基态能量略高. 说明这些核的基态有可能是扁椭和长椭的形状共存态.

## 4 结论

本文利用形变约束的相对论平均场理论, 对超重核  $^{294}_{118}$  及其  $\alpha$  衰变链的基态性质进行了系统研究, 给出了这些原子核的基态平均结合能、 $\alpha$  衰变能以及形变等, 并与实验估计值进行了比较. 结果表明: RMF 理论计算和实验估计的结果非常一致, 超重核  $^{294}_{118}$  及其  $\alpha$  衰变链的基态是长椭球核, 其中较重的核  $\beta_2$  形变偏软, 不是稳定性的长椭球核.

## 参考文献 (References)

- Hofmann S et al. Rep. Prog. Phys., 1998, **61**: 639
- Hofmann S et al. Z. Phys., 1995, **A350**: 277
- Hofmann S et al. Z. Phys., 1996, **A354**: 229
- Hofmann S, Miinzenberg G. Rev. Mod. Phys., 2000, **72**: 733
- Oganessian Yu Ts et al. Nature, 1999, **400**: 242
- Oganessian Yu Ts et al. Phys. Rev., 2001, **C63**: 011301
- Oganessian Yu Ts et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 064609
- Ginter T N et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 064609
- Morita K et al. Nucl. Phys., 2004, **A734**: 101
- GAN Z G, FAN H M, QIN Z et al. HEP & NP, 2004, **28**(4): 332 (in Chinese)  
(甘再国, 范红梅, 秦芝等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(4): 332)
- Oganessian Yu Ts et al. Phys. Rev., 2006, **C74**: 044602
- Ring P. Prog. Part. Nucl. Phys., 1996, **37**: 193
- Gambhir Y K, Ring P, Thimet A. Ann. Phys., 1990, **198**: 132
- Vrtenar D et al. Phys. Repo., 2005, **409**: 101
- MENG J, Toki H, ZHOU S G et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 2006, **57**: 470—563
- MENG J, Takigawa N. Phys. Rev., 2003, **C61**: 064319
- GENG L S, Toki H, MENG J. Phys. Rev., 2003, **C68**: 061303
- LONG W H, MENG J, ZHOU S G. Phys. Rev., 2002, **C65**: 047306
- REN Z Z et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 064302
- REN Z Z et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 064306
- Audi G, Boersillion O, Blachot J et al. Nucl. Phys., 2003, **A729**: 3
- Sugahara Y, Toki H. Nucl. Phys., 1994, **A579**: 557

# Ground-State Properties of Superheavy Nuclide $^{294}_{118}$ and Its $\alpha$ -Decay Chain\*

ZHOU Fang<sup>1,2,1)</sup> GUO Jian-You<sup>1</sup>

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

2 (Basic Department, Bengbu Navy Petty Officer Academy, Bengbu 233012, China)

**Abstract** The ground-state properties of superheavy nuclide  $^{294}_{118}$  and its  $\alpha$ -decay daughters are investigated in the deformed relativistic mean field (RMF) theory with the TMA effective interaction, where the pairing correlations are treated with the usual BCS approximation. Binding energies per nucleon, alpha decay energies and deformations are calculated and compared with the known experimental data. A good agreement between the calculated result and the data is obtained. This shows the validity of RMF theory in studying the ground state properties of super heavy nuclei.

**Key words** superheavy nuclei, RMF theory,  $\alpha$ -decay, ground-state properties

Received 9 March 2007

\* Supported by 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 Education Committee Foundation of Anhui Province (2006KJ259B) and Anhui University Innovation Program for graduate student (20073040)

1) E-mail: fangzhou1266@126.com