

Z=117 和 119 超重核素的理论研究*

任中洲^{1,2;1)} 陈鼎汉² 许昌²

1(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2(南京大学物理系 南京 210008)

摘要 在相对论平均场模型下系统地计算 Z=117 和 119 超重核同位素链的基态性质, 包括结合能、 α 衰变能、四极形变等. 通过将相对论平均场计算的结果与 Skyrme-Hartree-Fock 模型的结果进行比较, 发现两者在结合能和 α 衰变能上符合较好, 而两者计算的四极形变显示出一定的模型依赖性.

关键词 超重核 基态性质

1 引言

自从 20 世纪 60 年代, 核理论预言可能存在长寿命的超重核素岛, 合成新的超重元素就成为核物理的热点之一. 最近合成的新元素 Z=110—116, 118 进一步推动了该领域的发展^[1-5]. 由于实验的进展, 许多关于重核结构的重要数据如 α 衰变能、形变、子壳结构以及同质异能态都有了实验结果. 这些实验结果也进一步推动了理论的发展. 例如, 在理论方面自洽的平均场模型、液滴模型、Hartree-Fock 方法以及宏观—微观模型等被广泛用于对超重核基态性质的计算, 均获得了很大的成功^[6, 7]. 我们利用相对论平均场模型(RMF), 系统研究了偶-Z 超重核的结合能、衰变能以及形变等基态性质, 发现形变对于超重核特别重要, 超重核存在形状共存现象, 指出了这可能是超重核稳定存在的新机制^[8-10]. 其他小组的计算也表明超重核有形状共存现象, 形变特别重要^[11-14]. 另外, 国内理论工作者也利用自洽平均场模型进行了大量的计算^[15-18].

在相对论平均场模型的框架下, 理论计算的偶-Z 超重核素的基态性质能和实验很好地符合, 从而验证了 RMF 模型在超重区域的可靠性. 对于奇-Z 超重核素, 相应的计算还比较少. 已有的奇-Z 核计算主要是关于 Z=113 和 115 的超重核素^[9]. 考虑到第 117 和 119 号元素可能是实验上合成新元素的下一步目标, 本文系统地计算了 Z=117 和 119 的奇-偶核和奇-奇核同位

素链的基态性质, 并将相对论平均场计算的结果与 Skyrme-Hartree-Fock 模型的结果进行了比较和讨论.

2 相对论平均场理论框架

相对论平均场模型把核子视为通过交换介子进行相互作用的 Dirac 旋量: 标量 σ 介子场通过 Yukawa 项 $\bar{\psi}\sigma\psi$ 同核子场 ψ 耦合, 提供强的吸引势. 同位旋矢量 ω 介子场同守恒的核子流 $\bar{\psi}\gamma_\mu\psi$ 耦合, 产生强的排斥势. 同位旋矢量 ρ 介子场与同位旋矢量流及光子耦合产生电磁相互作用势. 在 Hartree 框架下, 假定 A 个独立的单粒子旋量波函数 ψ_i ($i=1, \dots, A$) 的核子构成一个 Slater 行列式, 并各自独立地在介子场中运动, 这样可以从一个拉氏密度出发

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \bar{\Psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - M)\Psi - g_\sigma \bar{\Psi}\sigma\Psi - g_\omega \bar{\Psi}\gamma^\mu\omega_\mu\Psi - \\ & g_\rho \bar{\Psi}\gamma^\mu\rho_\mu^a\tau^a\Psi + \frac{1}{2}\partial^\mu\sigma\partial_\mu\sigma - \frac{1}{2}m_\sigma^2\sigma^2 - \frac{1}{3}g_2\sigma^3 - \\ & \frac{1}{4}g_3\sigma^4 + \frac{1}{4}c_3(\omega_\mu\omega^\mu)^2 - \frac{1}{4}\Omega^{\mu\nu}\Omega_{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\omega^2\omega^\mu\omega_\mu - \\ & \frac{1}{4}R^{a\mu\nu}\cdot R_{\mu\nu}^a + \frac{1}{2}m_\rho^2\rho^{a\mu}\cdot\rho_\mu^a - \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - \\ & e\bar{\Psi}\gamma^\mu A^\mu \frac{1}{2}(1-\tau^3)\Psi, \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\Omega^{\mu\nu} = \partial^\mu\omega^\nu - \partial^\nu\omega^\mu, \quad (2)$$

$$R^{a\mu\nu} = \partial^\mu\rho^{a\nu} - \partial^\nu\rho^{a\mu}, \quad (3)$$

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu, \quad (4)$$

* 国家自然科学基金(10125521, 10535010)和国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)资助

1) E-mail: zren@nju.edu.cn

通过变分原理, 得到耦合的相对论平均场方程组, 可求出原子核基态性质. 具体相对论平均场理论的框架可以参见文献[8—14]等, 这里我们就不作具体说明了.

3 模型参数与结果讨论

在计算中我们用了两套参数: TMA与NL-Z2, 这是目前RMF模型中常用到的两套参数. 求解RMF耦合方程中使用了谐振子基展开的方法. 在计算中假定原子核为轴对称形变, 选择的基底为 $N_f = N_b = 20$, 展开的空间足以保证计算的精度. 对力输入为: $\Delta_n = \Delta_p = 11.2/\sqrt{A}(\text{MeV})$, 在核结构计算中, 这是一个标准的输入. 力参数在计算中没有作任何手工调整. 关于计算的详细步骤可参阅[8—10]. 计算结果包括结合能、四极形变参数、 α 衰变能、核密度分布的均方根半径等.

我们系统地计算了 $Z=117$ 和 119 的奇-偶核和奇-奇核同位素链, 覆盖了中子数 $N=165—190$ 整个区域. 结果分别列于表1(奇-奇链)和表2(奇-偶链)中, 其中第1列代表核素, 第2—5列是TMA参数的计算结果, 符号 B , Q_α , β_n 和 β_p 分别代表结合能、 α 衰变能、中子四极形变、质子四极形变, 第6—9列是参数NL-Z2计算的结果, 符号意义同上. 为了同其他理论模型进行比较, 我们利用Skyrme-Hartree-Fock (SHF)模型计算的质量过剩数据计算了相应的结合能^[7], 连同其四极形变值列于最后两列. 两种模型对结合能的计算相当一致, 而四极形变在大部分核素都表现为超形变 $\beta_2 = 0.45—0.65$, 除了个别核素例外, 如在TMA参数下 $^{282-286}117$ 是长椭球, SHF计算 $^{300}117$ 是球形; TMA计算 $^{284-286}119$ 是大扁椭球($\beta_2 \approx -0.4$), NL-Z2参数得到 $^{290-291}119$ 为球形. RMF和SHF两种模型计算的四极形变值表现出了一定的模型依赖性.

表1 $Z=117$ 和 $Z=119$ 奇-奇核同位素链基态性质

核素	TMA				NL-Z2				$B_{\text{SHF}}/\text{MeV}$	$\beta_2(\text{SHF})$
	B/MeV	Q_α	β_n	β_p	B/MeV	Q_α	β_n	β_p		
$^{282}117$	2001.57	13.18	0.20	0.21	2000.13	13.38	0.56	0.59	1996.68	0.45
$^{284}117$	2016.94	13.61	0.19	0.20	2015.70	12.72	0.56	0.59	2012.37	0.45
$^{286}117$	2031.60	13.85	0.25	0.26	2031.01	12.31	0.56	0.59	2027.92	0.45
$^{288}117$	2047.03	12.27	0.49	0.51	2045.85	11.95	0.56	0.59	2043.06	0.46
$^{290}117$	2062.26	10.57	0.49	0.51	2060.20	11.52	0.55	0.58	2057.35	0.46
$^{292}117$	2076.39	11.00	0.49	0.51	2074.22	10.85	0.55	0.57	2071.80	0.46
$^{294}117$	2089.54	11.21	0.50	0.52	2087.62	10.28	0.55	0.57	2085.17	0.46
$^{296}117$	2102.43	10.46	0.51	0.53	2100.42	10.06	0.56	0.58	2098.62	0.46
$^{298}117$	2115.04	9.75	0.52	0.54	2112.83	9.74	0.60	0.62	2111.24	0.47
$^{300}117$	2127.20	9.40	0.53	0.55	2125.07	9.36	0.60	0.62	2122.69	0.00
$^{302}117$	2139.01	9.18	0.57	0.58	2136.57	9.46	0.60	0.62	2135.32	0.47
$^{304}117$	2149.91	9.15	0.57	0.58	2147.26	9.63	0.61	0.62	2146.99	0.48
$^{306}117$	2160.62	8.80	0.60	0.61	2157.37	9.41	0.62	0.63	2157.79	0.48
$^{284}119$	2000.24	13.41	-0.41	-0.42	1999.53	13.25	0.56	0.60	1995.32	0.45
$^{286}119$	2016.38	13.49	-0.42	-0.42	2016.06	12.37	0.57	0.60	2011.61	0.45
$^{288}119$	2032.51	12.74	0.51	0.54	2032.16	11.84	0.57	0.60	2027.89	0.46
$^{290}119$	2048.47	11.43	0.50	0.53	2047.77	11.54	-0.00	-0.00	2043.90	0.46
$^{292}119$	2064.21	11.13	0.50	0.53	2062.70	11.45	0.56	0.59	2058.80	0.46
$^{294}119$	2079.13	11.43	0.50	0.53	2077.47	11.03	0.56	0.59	2074.08	0.47
$^{296}119$	2093.37	11.32	0.52	0.54	2091.62	10.90	0.56	0.59	2088.28	0.47
$^{298}119$	2107.23	10.61	0.53	0.55	2105.34	10.58	0.57	0.60	2102.19	0.47
$^{300}119$	2120.64	10.08	0.54	0.56	2118.49	10.22	0.59	0.61	2115.43	0.47
$^{302}119$	2133.79	9.55	0.56	0.58	2131.32	9.81	0.61	0.63	2128.35	0.48
$^{304}119$	2146.33	9.17	0.58	0.59	2143.53	9.84	0.61	0.63	2141.06	0.48
$^{306}119$	2157.96	9.35	0.59	0.60	2155.00	9.87	0.61	0.63	2153.05	0.49
$^{308}119$	2169.21	9.00	0.60	0.61	2165.86	9.70	0.63	0.64	2164.93	0.49

表 2 $Z=117$ 和 $Z=119$ 奇-偶核同位素链基态性质

核素	TMA				NL-Z2				$B_{\text{SHF}}/\text{MeV}$	$\beta_2(\text{SHF})$
	B/MeV	Q_α	β_n	β_p	B/MeV	Q_α	β_n	β_p		
$^{283}_{117}$	2009.43	13.35	0.19	0.20	2007.94	13.07	0.56	0.59	2004.91	0.45
$^{285}_{117}$	2023.92	14.30	0.25	0.26	2023.40	12.48	0.56	0.59	2020.72	0.45
$^{287}_{117}$	2039.29	13.25	0.49	0.52	2038.51	12.15	0.56	0.59	2035.98	0.45
$^{289}_{117}$	2054.71	11.09	0.49	0.51	2053.07	11.75	0.56	0.58	2050.75	0.46
$^{291}_{117}$	2069.54	10.64	0.49	0.51	2067.26	11.22	0.55	0.58	2065.18	0.46
$^{293}_{117}$	2083.00	11.31	0.50	0.52	2081.02	10.42	0.55	0.57	2079.03	0.46
$^{295}_{117}$	2096.02	10.86	0.51	0.53	2094.07	10.16	0.56	0.58	2092.65	0.47
$^{297}_{117}$	2108.77	10.49	0.52	0.54	2106.67	9.91	0.57	0.59	2105.63	0.46
$^{299}_{117}$	2121.21	9.51	0.53	0.54	2119.05	9.47	0.61	0.62	2118.10	0.47
$^{301}_{117}$	2133.18	9.26	0.56	0.58	2130.99	9.37	0.60	0.62	2130.11	0.47
$^{303}_{117}$	2144.59	9.16	0.57	0.58	2141.99	9.66	0.60	0.62	2141.77	0.47
$^{305}_{117}$	2155.29	9.02	0.59	0.61	2152.37	9.53	0.61	0.62	2153.16	0.50
$^{307}_{117}$	2165.79	8.73	0.60	0.62	2162.34	9.22	0.64	0.65	2164.19	0.50
$^{285}_{119}$	2008.37	13.44	-0.42	-0.42	2007.83	12.80	0.57	0.60	2003.82	0.45
$^{287}_{119}$	2024.39	13.34	0.52	0.55	2024.17	12.07	0.57	0.60	2020.28	0.45
$^{289}_{119}$	2040.50	11.73	0.51	0.54	2040.01	11.68	0.57	0.60	2036.27	0.46
$^{291}_{119}$	2056.35	11.24	0.50	0.53	2055.88	10.93	-0.00	-0.00	2051.80	0.46
$^{293}_{119}$	2071.84	11.17	0.50	0.53	2070.15	11.22	0.56	0.59	2067.00	0.46
$^{295}_{119}$	2086.29	11.55	0.51	0.54	2084.59	10.97	0.56	0.59	2081.75	0.47
$^{297}_{119}$	2100.37	10.94	0.52	0.55	2098.52	10.80	0.57	0.59	2095.83	0.46
$^{299}_{119}$	2113.98	10.34	0.53	0.55	2112.01	10.36	0.58	0.60	2109.97	0.49
$^{301}_{119}$	2127.19	9.88	0.55	0.57	2125.02	9.95	0.61	0.63	2122.62	0.47
$^{303}_{119}$	2140.21	9.31	0.57	0.59	2137.56	9.80	0.61	0.63	2135.37	0.48
$^{305}_{119}$	2152.20	9.28	0.58	0.60	2149.36	9.92	0.61	0.63	2147.72	0.49
$^{307}_{119}$	2163.64	9.25	0.59	0.61	2160.48	9.81	0.62	0.63	2159.92	0.50
$^{309}_{119}$	2174.63	8.97	0.60	0.61	2171.14	9.52	0.64	0.65	2171.30	0.49

4 总结

本文在相对论平均场的框架下系统计算了 $Z=117$ 和 119 超重核同位素链的结合能、 α 衰变能和四极形变等基态性质. 相对论平均场计算的结合能

和 Skyrme-Hartree-Fock (SHF) 模型的结果符合很好. 两者计算的形变参数显示出一定的模型依赖性. 本文给出的 $Z=117$ 和 119 理论结果说明超重核有形状共存现象, 形变特别重要, 可以供将来的超重核理论和实验研究参考.

参考文献(References)

- Hofmann S, Münzenberg G. Rev. Mod. Phys., 2000, **72**: 733
- Oganessian Yu Ts, Yeremin A V, Popeko A G et al. Nature (London), 1999, **400**: 242
- Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Dmitriev S N et al. Phys. Rev., 2005, **C72**: 034611
- GAN Z G, QIN Z, FAN H M et al. Eur. Phys. J., 2001, **A10**: 21
- GAN Z G, FAN H M, QIN Z et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2004, **28**: 332 (in Chinese) (甘再国, 范红梅, 秦芝等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 332)
- Möller P, Nix J R, Myers W D et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1995, **59**: 185
- Goriely S, Tondeur F, Pearson J M. Atomic Data and Nuclear Data Table, 2001, **77**: 311
- REN Zhong-Zhou, TAI Fei, CHEN Ding-Han. Phys. Rev., 2002, **C66**: 064306
- REN Zhong-Zhou, TAI Fei, CHEN Ding-Han. Nucl. Phys., 2003, **A722**: 543c
- REN Zhong-Zhou, CHEN Ding-Han, TAI Fei et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 064302
- Cwiok S, Nazarewicz W, Heenen P H. Nature, 2005, **433**: 475
- GENG L S, Toki H, ZHAO E G. J Phys., 2006, **G32**: 573
- Sharma B K, Arumugam P, Patra S K, Stevenson P D et al. J. Phys., 2006, **G32**: L1
- Sharma M M, Münzenberg G. Phys. Rev., 2005, **C71**: 054310
- PEI J C, XU F R, Stevenson P D. Phys. Rev., 2005, **C71**: 034302
- JIANG W Z, ZHAO Y L. Phys. Lett., 2005, **B617**: 33

17 ZHANG H F, LI J Q, ZUO W et al. Phys. Rev., 2005, 18 SHEN H, Sugahara Y, Toki H. Phys. Rev., 1997, **C55**: 1211
C71: 054312

Theoretical Studies on Odd- Z Superheavy Nuclei^{*}

REN Zhong-Zhou^{1,2;1)} CHEN Ding-Han² XU Chang²

1 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy-Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

2 (Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

Abstract The ground-state properties of odd- Z superheavy nuclei ($Z=117$ and $Z=119$) have been systematically studied in the framework of the relativistic mean-field model (RMF). The calculated binding energy, α decay energy, quadrupole deformation are compared with those from Skyrme-Hartree-Fock model (SHF). It is found that the binding energies given by two models agree well, while the quadrupole deformations show a certain degree of model dependence.

Key words superheavy nuclei, ground-state properties

^{*} Supported by National Natural Science Foundation of China (10125521, 10535010) and Major State Basic Research Development Program in China (G2000077400)

1) E-mail: zren@nju.edu.cn