

文章编号: 1007-4627(2003)02-0116-05

超重核的基态性质*

裴俊琛, 许甫荣¹⁾, 吴哲英, 赵恩广

(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;

北京大学物理学院技术物理系, 北京 100871;

中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

摘要: 用 Skyrme-Hartree-Fock+BCS 方法计算了超重核的基态性质, 讨论了结合能、 α 衰变、形变、壳结构和自发裂变等问题. 计算得到的结合能较好地反映了实验测量值, α 衰变能与实验值符合很好. 发现基本上有两种类型的超重核形变: 在 $^{270}108$ 核附近的 $\beta_2 \approx 0.2$ 的长椭球形变和在 $^{298}114$ 核附近的近球形形变. 单粒子能级分布计算表明: 在质子 $Z=108$ 和中子 $N=162$ 存在变形壳, 在质子 $Z=114$ 和中子 $N=184$ 存在球形壳. 用得到的 α 衰变能和 Viola-Seaborg 公式估算了 α 衰变半寿命, 能合理地符合实验测量值.

关键词: 超重核; Skyrme-Hartree-Fock 理论; 基态性质; 衰变

中图分类号: O571.2; O571.6 **文献标识码:** A

1 引言

自从 20 世纪 60 年代末期理论上预言超重核存在的可能性以来^[1,2], 寻找或合成超重核就成为众多核物理学家努力的方向. 在实验上, 超重核的研究驱动并伴随着重离子物理的成长. 近年来, 在 Dubna 和 GSI 相继合成了一批超重核^[3,4], 更使超重核成为核物理的研究热点. 在理论上, 核物理学家应用很多成功的理论模型来预言超重核的性质, 大体上分为宏观-微观模型^[5]、相对论^[6-8]或非相对论微观模型^[9]. 这些模型各有优缺点, 对超重核区的预言也存在明显的差异.

在超重核的理论研究中, 核的基态性质是最基本的. 正确地预言基态性质可以帮助实验寻找和识别超重核. 结合能、 α 衰变能、 α 衰变寿命、自发裂变寿命、形变和能级结构等是超重核基态最基本的性质. 在本文中, 我们用自洽的 Skyrme-Hartree-Fock 方法对超重核的基态性质进行了计算, 并讨论了一些相关问题.

2 理论框架

我们用 Skyrme-Hartree-Fock (SHF) 模型计算了超重核的性质, 详细的模型理论见文献[9]. 计算采用柱坐标空间并假设反射对称. 在模型方面需要指出的是, 我们用扩展 Skyrme 势, 即自旋轨道耦合势为

$$V_{ls}(r) = -iW_q^{\text{ext}} \cdot \nabla \times \hat{\sigma}, \quad (1)$$

其中

$$W_q^{\text{ext}} = b_l \nabla \rho + b'_l \nabla \rho_q, \quad (2)$$

这里, ρ_q ($q=n, p$) 表示中子或质子的密度, $\rho = \rho_n + \rho_p$ 为总的核子密度, b_l 和 b'_l 为参数. 当 $b_l = b'_l$ 时,

$$W_q^{\text{ext}} = b_l (\nabla \rho + \nabla \rho_q), \quad (3)$$

即是标准的自旋轨道势. 使用扩展 Skyrme 势相当于添加了同位旋自由度, 由此拟合的势参数具有更好的同位旋性质. 当选用 SkI4 参数时, $b_l = 183.097 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^4$, $b'_l = -180.351 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^4$ ^[9]. 选取不同参数得到的计算结果可能有差别,

收稿日期: 2003-01-30; 修改日期: 2003-04-20

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10175002); 国家重大基础研究发展规划资助项目(G2000077400); 国家教育部骨干教师基金资助项目; 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJCX2-SW-N02)

作者简介: 裴俊琛(1980-), 男(汉族), 湖北松滋人, 硕士研究生, 从事理论核理论研究.

1) 通讯作者: 许甫荣(1962-), 男(汉族), 浙江嘉善人, 教授, 博士生导师, 从事核理论研究工作. E-mail: frxu@pku.edu.cn.

本文采用常用的 SkI4 参数。一方面是由于 SkI4 的结合能在超重核区的误差小于 0.2%；另一方面，SkI4 参数能较好的反映同位旋相关性^[10]。

本文采用 BCS 理论处理对关联作用，对相互作用取为 δ 力形式，表示成 $V_{\text{pair}}(r, r') = V_q \delta(r - r')$ ，这里 V_q 即是 BCS 模型中的对作用强度 G_q ，是通过拟合中重核区和重核区的实验质量奇偶差得到的^[11]。当选 SkI4 参数时， $V_p = 310 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^3$ ， $V_n = 323 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^3$ ，对作用的详细处理见文献^[11]。

3 结合能与 α 衰变能

结合能和 α 衰变能是与能量有关的超重核的两个基本物理量，通常是判定一个模型的最初指标。在结合能的计算中，宏观-微观模型是较理想的，如 Möller 等^[5] 计算的结合能误差小于 0.7 MeV。我们用以上提到的 SHF-BCS 模型以及标准的参数系统计算了质子数 $Z=100-120$ 的偶偶超重核，计算的结合能比实验值有一个系统的偏小(约 2.0—3.5 MeV)，但计算的 α 衰变能(Q_α)偏差不大，最大误差为 0.6 MeV，原因是 Q_α 值只依赖于母核与子核结合能差，结合能的系统偏差可以抵消。在超重核实验测量中， Q_α 值更容易测量准确。图 1 给出了实验上已知的偶偶超重核的 3 条 α 衰变链，可以看到理论计算与实验测量合理地符合。用不同的参数计算，结果可能不同。为此，我们还同时采用参数 Sly7 和 Sly4 进行了计算，发现 Sly7 的结合能误差和 SkI4 的相差不大，但是 Q_α 值总体要差一些。Sly4 的 Q_α 值和实验值更好地符合，这和最近的一

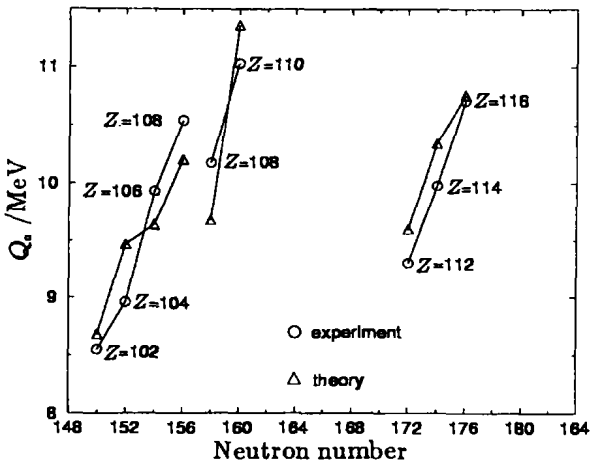


图 1 实验和计算的超重核 α 衰变能

些文献给出的结果是一致的^[12,13]，但我们发现 Sly4 计算的结合能有更大的偏差。

4 α 衰变与自发裂变

α 衰变和自发裂变是超重核的两种主要衰变模式。在现有的实验条件下，探测器可以探测到寿命 $1 \mu\text{s}$ 的核，核化学可以研究寿命大于 1 s 的元素性质。由于超重核的事例很少，实验寿命测量往往有较大的误差。 α 衰变寿命的理论计算非常敏感于 Q_α ， Q_α 值相差 1.0 MeV 可导致寿命差 3 或 4 个量级。从实验值可以看到， α 衰变寿命与 Q_α 值有一个简单的近似指数关系，目前理论一般采用 Viola-Seaborg(VS)经验公式^[14]估算 α 衰变寿命。对于偶偶核，

$$\log(T_\alpha) = (aZ + b)Q_\alpha^{-1/2} + (cZ + d), \quad (4)$$

其中， Z 为母核的核电荷数， Q_α (MeV) 为 α 衰变能；参数 $a = 1.66175$ ， $b = -8.5166$ ， $c = -0.20228$ 和 $d = 33.9069$ ，他们是通过拟合实验值得到的^[14,15]。这里我们用 VS 公式计算了超重核区有实验数据的偶偶核 α 衰变寿命。图 2 是我们计算的相应于图 1 的 3 条 α 衰变链的结果。可以看出基本能反映实验测量，但个别核与实验比较相差可达 3 个量级。

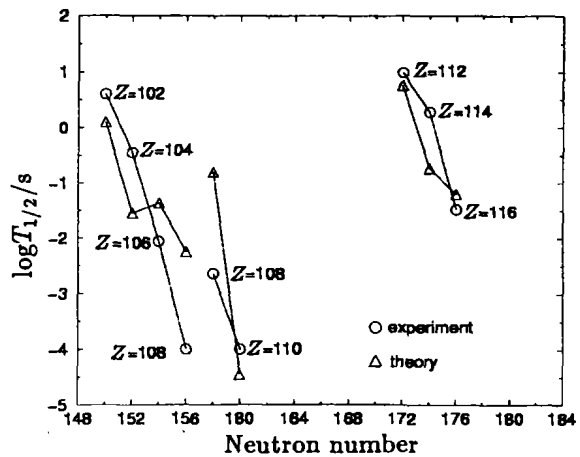


图 2 实验和计算的超重核 α 衰变半寿命

超重核的另一种衰变是自发裂变，自发裂变的寿命计算一般采用 WKB 方法。在这种方法中，需要在多维变形空间(如 $\beta_2, \beta_4, \beta_6 \dots$)中寻找一条最可能的动力学衰变路径^[16,17]。影响自发裂变的因素反映在位能曲面势垒的形状和高度。Bender 等^[18]

用 SHF 和相对论平均场(RMF)模型研究了超重核的位能曲面,发现当考虑反射不对称时,衰变位垒有明显变化. α 衰变和自发裂变的竞争决定了超重核的衰变方式和寿命,不过目前实验已知超重核主要是 α 衰变.

5 超重核的形状

在 Smolanczuk 的文章中提到超重核在 $Z=114, N=184$ 存在一个球形双幻壳;在 $Z=108, N=162$ 存在一个变形双幻壳^[16,17],我们的计算得到同样的结果.关于超重核能级结构特性将在下一节讨论.在 SHF(坐标空间)方法中,形变是通过 $\beta_l = 4\pi/(3AR^l) \langle r^l Y_{l0} \rangle (R=1.2 A^{1/3} \text{fm})$ 计算的,这里 $l=2, 3, 4 \dots$, 分别对应于四极,八极,十六极...形变.我们的位能曲面计算表明²⁸⁸114 有一个非常稳定的 $\beta_2=0$ 的基态形变;另外在 $\beta_2 \approx 0.5$ 处有位能次极小,但是能量比基态高约 7.5 MeV.超重核的形状共存问题已经在文献[19]中讨论.我们的计算发现“单幻”核具有更丰富的可能形变.如²⁸⁸114 核中,质子 $Z=114$ 被认为是“幻数”,图 3 是我们计算的²⁸⁸114 的位能曲面.从图中可以看到基态的形变是 $\beta_2 \approx 0.15$.在 $\beta_2 \approx -0.10$ 处有一个扁椭球形变第二极小,但能量比基态高约 0.5 MeV.由于在 $\beta_2 = -0.1$ 和 $\beta_2 = 0.15$ 之间的位垒非常低(< 0.5 MeV),所以很难说能形成一个稳定的扁椭球态,因此²⁸⁸114 基态有一个弱形变形状.在 $\beta_2 \approx 0.6$ 处,有一个比基态高 2.0 MeV 左右的位能曲面极小谷,

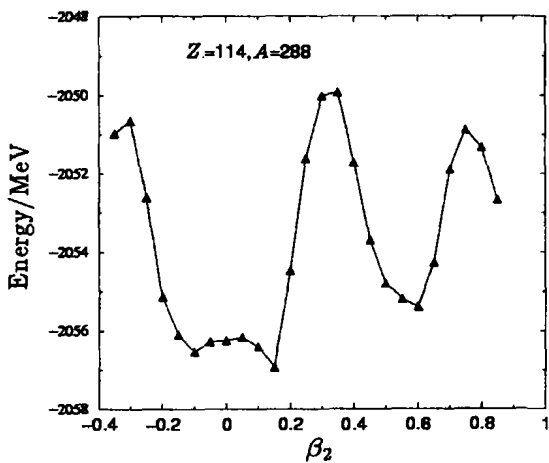


图 3 超重核²⁸⁸114 的计算位能曲面(注意:在每一个 β_2 计算点, β_4 已由能量极小确定)

这与文献[19,20]的结果总体上是一致的.从位能曲面的静态性质看,应该可以形成形状共存的亚稳态.但是这样的超形变态是否很容易产生自发裂变,从而导致不可能存在有限寿命的形状共存态,这值得进一步研究.

6 壳结构与能级分布

能级分布和壳结构是原子核结构研究中最基本的问题之一.从壳结构可以分析原子核的稳定性等性质,比如能级的分布可以确定幻数.目前理论一般预言质子数 $Z=108$ 为形变满壳和 $Z=114$ 为球形满壳^[5,17],但是不同的模型有不同的预言,如相对论平均场预言 $Z=120$ 为幻数^[10].图 4 和图 5 是

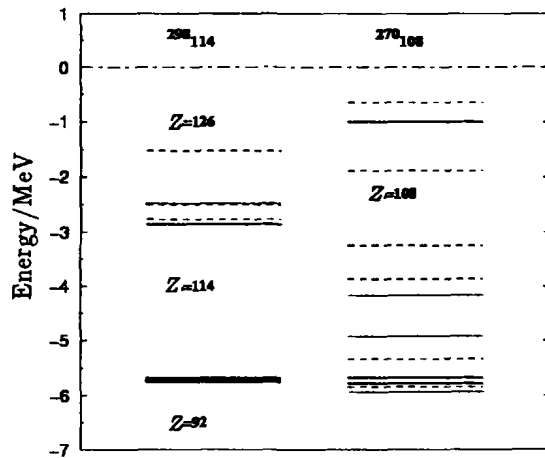


图 4 超重核²⁸⁸114 ($\beta_2 = \beta_4 \approx 0.0$)和²⁷⁰108 ($\beta_2 = 0.25, \beta_4 = -0.05$)的质子能级结构

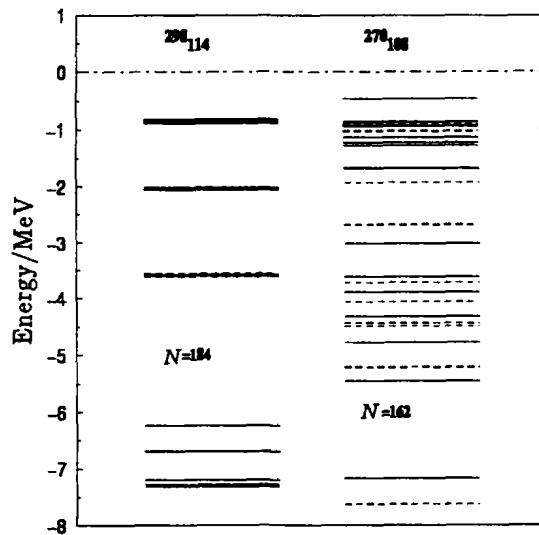


图 5 超重核²⁸⁸114 ($\beta_2 = \beta_4 \approx 0.0$)和²⁷⁰108 ($\beta_2 = 0.25, \beta_4 = -0.05$)的中子能级结构

我们用 SkI4 参数计算的两个超重核 $^{298}114$ ($\beta_2 = 0.0$) 和 $^{270}108$ ($\beta_2 = 0.25$) 费米面附近的能级分布. 对于 $^{298}114$, 在 $Z=114$ 处有一个 2.8 MeV 的大能隙, 从而可以预言 $Z=114$ 球形幻数. 另一个核 $^{270}108$ 是预言的变形双幻核. 从图 4 可以看到, $Z=108$ 处质子有一个 1.36 MeV 的能隙. 在超重核区, 虽然幻数壳不像其它核区那样明显, 但是这样大的能隙出现仍有重要的物理意义, 它应该可以导致一些相当长寿命超重核的存在.

7 总结

我们用 SHF 方法计算和讨论了超重核的结合能、 α 衰变能、 α 衰变半寿命、形变和能级结构等基

态性质. 得到的结合能和 α 衰变能与实验结果较好地符合. 用 VS 公式计算的 α 衰变半寿命总体上能反映实验结果, 但是一些情况的理论与实验差别较大, 需要进一步的理论研究. 我们的计算基本上给出两种形变: 在 $^{270}108$ 附近的形变基态 ($\beta_2 \approx 0.2$); 在 $^{298}114$ 附近的近球形基态. 本工作的计算较明显地显示: 在 $Z=108$ 和 $N=162$ 存在变形壳, 在 $Z=114$ 和 $N=184$ 存在球形壳, 但具体的壳结构在一定程度上是同位旋相关的. 在 $Z \geq 114$ 附近, 位能曲面同时给出在 $\beta_2 \approx 0.6$ 处的一个能量极小, 不过由于大形变和窄位垒, 这样的超形变态是否真正意义上存在, 还需要进一步的研究.

参 考 文 献:

- [1] Myers W D, Swiatecki W J. Nuclear Masses and Deformations [J]. Nucl Phys, 1966, **8A1**: 1.
- [2] Nilsson S G, Tsang C T, Sobiczewski A, *et al.* On the Structure and Stability of Heavy and Superheavy Elements[J]. Nucl Phys, 1969, **A131**: 1.
- [3] Oganessian Yu Ts, Yeremin A V, Popeko A G, *et al.* Synthesis of Nuclei of the Superheavy Elements 114 in Reactions Induced by ^{48}Ca [J]. Nature, 1999, **400**: 242; Observation of the Decay of $^{292}116$ [J]. Phys Rev, 2001, **C63**: 011301(R).
- [4] Hofmann S, Münzenberg G. The Discovery of the Heaviest Elements[J]. Rev Mod Phys, 2000, **72**: 733.
- [5] Möller P, Nix J R. Stability of Heavy and Superheavy Elements[J]. J Phys, 1994, **G25**: 119.
- [6] Ren Zhongzhou, Tai Fei, Chen Ding-han. Systematic Calculations of the Ground State Properties of Superheavy Nuclei[J]. Phys Rev, 2002, **C66**: 064306.
- [7] Meng J, Takigawa N. Structure of Superheavy Elements Suggested in the Reaction of ^{86}Kr with ^{208}Pb [J]. Phys Rev, 2000, **C61**: 064319.
- [8] Patra S K, Wu Cheng-Li, Prahara C R, *et al.* A Systematic Study of Superheavy Nuclei for $Z=114$ and beyond Using the Relativistic Mean Field Approach [J]. Nucl Phys, 1997, **A651**: 157.
- [9] Bender M, Rutz K, Reinhard P G, *et al.* Shell Structure of Superheavy Nuclei in Self-consistent Mean-field Models[J]. Phys Rev, 1999, **C60**: 034304.
- [10] Burvenich T, Rutz K, Bender M, *et al.* Superheavy Nuclei in Deformed Mean Field Calculations[J]. Eur Phys J, 1998, **3**: 139.
- [11] Bender M, Rutz K, Reinhard P G, *et al.* Pairing Gaps from Nuclear Mean Field Models[J]. Eur Phys J, 2000, **A8**: 59.
- [12] Cwiok S, Nazarewicz W, Heenen P H. Structure of Odd- N Superheavy Elements[J]. Phys Rev Lett, 1999, **83**: 1 108.
- [13] Nazarewicz W, Bender M, Cwiok, *et al.* Theoretical Description of Superheavy Nuclei[J]. Nucl Phys, 2002, **A701**: 165.
- [14] Viola V E, Seaborg Jr G T. Nuclei Systematics of the Heavy Elements: Lifetimes for alpha, beta and spontaneous fission decays[J]. J Inorg Nucl Chem, 1966, **28**: 741.
- [15] Möller P, Nix J R, Kratz K L. Nuclear Properties for Astrophysical and Radioactive-ion-beam Applications[J]. At Data Nucl Data Tables, 1997, **66**: 131.
- [16] Smolanczuk R. Properties of the Hypothetical Spherical Superheavy Nuclei[J]. Phys Rev, 1997, **C56**: 812.
- [17] Smolanczuk R, Skalski J, Sobiczewski A. Spontaneous Fission Half Lives of Deformed Superheavy Nuclei [J]. Phys Rev, 1995, **C52**: 1 871.
- [18] Bender M, Rutz K, Reinhard P G, *et al.* Potential Energy Surface of Superheavy Nuclei[J]. Phys Rev, 1998, **C58**: 2 126.
- [19] Ren Zhongzhou. Shape Coexistences in Even-even Superheavy Nuclei[J]. Phys Rev, 2002, **C65**: 051304(R).
- [20] Ren Zhongzhou, Hiroshi Toki. Superdeformation in the Newly Discovered Superheavy Elements [J]. Nucl Phys, 2001, **A689**: 691.

Ground-state Properties of Superheavy Nuclei*

PEI Jun-chen, XU Fu-rong, WU Zhe-ying, ZHAO En-guang

*(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator
of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;*

Department of Technical Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The ground-state properties of superheavy nuclei are investigated using the Skyrme-Hartree-Fock model. The pairing correlation is treated by the BCS method with the pairing δ force. Binding energies, α decays, spontaneous fissions, shell structures and deformations are discussed. Our calculations reproduce experimental binding energies and α decay energies. It is found that superheavy nuclei can be grouped with two kinds of deformations: i) well deformed prolate shapes ($\beta_2 \approx 0.2$) around $^{270}108$ and ii) nearly spherical shapes around $^{298}114$. The calculated single-particle levels show that there exist deformed shell closures at $Z=108$, $N=162$ and spherical shell closures at $Z=114$, $N=184$. With the calculated α decay energies, the α -decay half-lives have been calculated using the Viola-Seaborg formula. The obtained lifetimes agree, in general, with experimental data.

Key words: superheavy nucleus; Skyrme-Hartree-Fock; ground-state property; decay

* **Foundation Item:** National Natural Science Foundation of China (10175002); Chinese Major State Basic Research Developing Program (G2000077400); Key Teacher Fund of the Education Ministry of China; Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX-SW-NO2)