

文章编号: 1007-4627(2006)04-0366-04

超重核 α 衰变寿命的理论研究*

任中洲^{1,2}, 许 昌²

(1 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

2 南京大学物理系, 江苏 南京 210008)

摘要: 建立了计算球形核 α 衰变寿命的新模型——密度依赖的结团模型 (DDCM)。在此基础上, 通过引入子核的形变自由度, 发展了形变的密度依赖的结团模型, 编写了形变的 DDCM 程序。并系统计算了 $Z=106-110$ 的超重核 α 衰变寿命。通过与已有的实验数据的对比分析, 发现理论结果和实验数据符合得很好, 验证了 DDCM 在超重核区域的适用性。

关键词: α 放射性; 半衰期; 超重核

中图分类号: O571.32⁺¹ **文献标识码:** A

1 引言

近年来, 超重元素和超重核成为国内外核物理研究的一个热门领域。研究超重核不仅可以检验和发展原有的核结构和核衰变模型, 还可以进一步推进对原子核结构和原子结构的深入研究。在超重核的实验研究方面, 从 20 世纪 80 年代以来德国 GSI 重离子研究中心先后合成了 107—109 号新元素和 110—112 号新元素^[1]。俄罗斯 Dubna 实验室则成功合成了 114—116 号以及 118 号新元素^[2]。中国科学院近代物理研究所在这方面也取得突破并成功合成了新核素 ²⁵⁹Db 和 ²⁶⁵Bh^[3]。在超重核的理论研究方面, 理论工作者基于不同的核结构模型, 例如自洽的平均场模型、液滴模型、Hartree-Fock 方法以及宏观-微观模型等, 对超重核的基态性质进行了广泛的计算并获得了很大的成功^[4]。在相对论平均场模型的框架下, 我们系统研究了超重核的结合能、衰变能以及形变等基态性质, 发现超重核有形状共存现象, 形变特别重要, 提出了这可能是超重核稳定存在机制的新观点^[5-7]。最近, 越来越多的计算支持超重核有形状共存现象和形变特别重要的观点^[8-11]。最近我们也注意到 Bethe 和 Wheeler 等

也认为形变对于超重核十分重要^[12, 13]。除了原子核结合能等基态性质外, 原子核的衰变性质也是研究超重核的一种重要途径。在超重核区域, α 放射性和自发裂变是超重核的两种最主要的衰变模式, 人工合成的新元素和新核素大多是通过探测它们的 α 衰变产物鉴别的, 理论研究超重核的 α 衰变性质对将来的超重核实验十分有利。我们提出了计算 α 衰变寿命的密度依赖的结团模型 (DDCM)^[14-16], DDCM 基于微观的 M3Y 核子-核子势并正确包括了核子-核子之间相互作用的低密度行为和核子交换行为^[17]。通过对整个质量区域的系统计算, 发现 DDCM 给出的理论半衰期能和现有的实验数据符合得很好, 上述计算主要基于球形版本的 DDCM^[14, 15]。尽管球形的 DDCM 对 α 衰变寿命的计算十分成功, 但仍有必要在模型中进一步考虑 α 衰变中的其它因素。最近, 我们在 DDCM 中考虑了子核的形变自由度并发展了相应形变的 DDCM 计算程序^[18]。本文通过结合相对论平均场 (RMF) 和宏观-微观 (MM) 模型计算的形变参数^[5-7, 19], 利用 DDCM 模型对 $Z=106-110$ 的超重核进行了系统的计算, 给出了详细的计算结果并进行了相应的

* 收稿日期: 2006-05-30; 修改日期: 2006-11-20

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10535010); 教育部博士点基金资助项目(20010284036); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000077400)

作者简介: 任中洲(1962-), 男(汉族), 河南南阳人, 教授, 博士生导师, 从事核物理理论和量子混沌研究;

E-mail: zren@nju.edu.cn

分析和讨论。

2 DDCM 以及结果讨论

在形变的 DDCM 中, 我们假定一个球形的 α 粒子和一个具有轴对称形状的子核相互作用。 α 粒子相对于子核的总作用势 V_{total} 可以表示为^[18]

$$V_{\text{total}}(R, \beta) = V_{\text{N}}(R, \beta) + V_{\text{C}}(R, \beta) + \frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{\left(L + \frac{1}{2}\right)^2}{R^2}, \quad (1)$$

这里 V_{N} 是核势项(强作用势), 第二项和第三项分别是库仑势项 V_{C} 和 Langer 修正离心势项。 R 是 α 粒子的质心与子核的质心之间的距离, β 是 α 粒子相对于子核对称轴的方位角。DDCM 中的核势和库仑势均由微观的折叠势给出^[17]:

$$V_{\text{N or C}}(R, \beta) = \int \mathrm{d}\mathbf{r}_1 \mathrm{d}\mathbf{r}_2 \rho_1(\mathbf{r}_1) \rho_2(\mathbf{r}_2) v(s), \quad (2)$$

其中 ρ_1 和 ρ_2 分别为 α 粒子与子核的物质(电荷)密度分布。 α 粒子的密度分布通常取高斯密度分布形式^[17]。对于子核, 其密度分布取为形变的 Femi 分布形式:

$$\rho_2(r_2, \theta) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left[\frac{r_2 - R(\theta)}{a}\right]}, \quad (3)$$

其中半密度半径 $R(\theta)$ 的表达式为

$$R(\theta) = R_0 [1 + \beta_2 Y_{20}(\theta) + \beta_4 Y_{40}(\theta)]. \quad (4)$$

库仑势的核子-核子相互作用 $v(s)$ 是标准的质子-质子库仑相互作用, 核势的核子-核子相互作用项是微观的 M3Y 有效核子-核子势^[17]

$$g(E, |s|) = 7.999 \frac{\exp(-4s)}{4s} - 2.134 \frac{\exp(-2.5s)}{2.5s} + J_{00} \delta(s), \quad (5)$$

$$J_{00} = -276 \left(1 - 0.005 \frac{E_{\alpha}}{A_{\alpha}}\right). \quad (6)$$

由于在 DDCM 计算中, 子核存在形变, 因此 α 粒子与子核之间的折叠势涉及到复杂的六维积分问题。在计算中我们采用多极展开的方法对子核的密度进行展开^[20]:

$$\rho(r, \theta) = \sum_{l=0, 2, 4, \dots} \rho_l(r) Y_{l0}(\theta), \quad (7)$$

$\rho_l(r)$ 对应的内禀形状因子为

$$\bar{\rho}^{(l)}(k) = \int_0^{\infty} \mathrm{d}r r^2 \rho_l(r) j_l(kr). \quad (8)$$

双折叠核势或库仑势可以写成一系列多极项求和的形式:

$$V_{\text{N or C}}(R, \beta) = \sum_{l=0, 2, 4, \dots} V_{\text{N or C}}^l(R, \beta), \quad (9)$$

其中

$$V_{\text{N or C}}^l(R, \beta) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{2l+1}{4\pi}\right)^{1/2} \int_0^{\infty} \mathrm{d}k k^2 j_l(kR) \bar{\rho}_1^{(l)}(k) \bar{\rho}_2^{(l)}(k) \bar{v}(k) P_l(\cos\beta). \quad (10)$$

对于 α 发射核, 其半衰期长短主要依赖于 α 粒子的穿透因子的大小。在形变的计算中, 对于一个给定的方位角 β , α 粒子相应的穿透几率为^[18]

$$P_{\beta} = \exp\left[-2 \int_{R_2(\beta)}^{R_3(\beta)} \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} |Q_{\alpha} - V_{\text{total}}(R, \beta)|} \mathrm{d}R\right]. \quad (11)$$

通过对各个方位进行平均, 总的穿透因子表达式为^[18]

$$P = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} P_{\beta} \sin(\theta) \mathrm{d}\theta. \quad (12)$$

类似地, 可以求得衰变宽度中的归一化因子^[18], 最后 α 衰变寿命可以用衰变宽度表示为

$$T_{1/2} = \hbar \ln \frac{2}{P}. \quad (13)$$

我们计算了超重核 ($Z=106-110$) 的 α 衰变半衰期, 表 1 给出了具体的计算结果。表中第 1 列为 α 衰变的母核和子核, 第 2 列为实验测量的 α 衰变能, 第 3 列和第 4 列分别为 MM 模型^[19] 和 RMF 模型^[5-7] 给出的四极形变值, 第 5 列为实验测量的 α 衰变半衰期, 根据两套形变参数计算的理论半衰期分别列在第 6 列和第 7 列。从表 1 的第 3 列和第 4 列可以看出, MM 模型和 RMF 模型给出的四极形变参数比较接近。但对于 $Z > 110$ 的超重核, 不同模型给出的理论结果差异非常大。例如, MM 模型预言超重核区域的幻数是 $Z=114$ 和 $N=184$, 而 RMF 模型的计算结果显示超重核区域的质子幻数可能是 $Z=120$ 或 $Z=122$ 。Bethe 和其合作者的计算也表明超重核区域的质子幻数可能不在 $Z=114$ 处^[12]。鉴于不同模型理论结果的差异性, 这些超重

核没有包括在具体的形变计算中, 将来可以从实验 和理论两方面对这些超重核做进一步的研究。

表 1 超重核的 α 衰变能、四极形变和 α 衰变寿命的实验值和理论值 ($Z=106-110$)

Nuclei	Q_α/MeV	β_2		$T_\alpha(\text{Exp.})/\text{s}$	$T_\alpha(\text{Cal. 1})/\text{s}$		$T_\alpha(\text{Cal. 2})/\text{s}$	
		MM	RMF		MM	RMF		
$^{273}\text{Ds} \rightarrow ^{269}\text{Hs} + \alpha$	11.291	0.231	0.220	1.1×10^{-4}	7.1×10^{-5}	7.8×10^{-5}	7.8×10^{-5}	
$^{271}\text{Ds} \rightarrow ^{267}\text{Hs} + \alpha$	10.958	0.230	0.230	6.2×10^{-4}	4.4×10^{-4}	4.4×10^{-4}	4.4×10^{-4}	
$^{270}\text{Ds} \rightarrow ^{266}\text{Hs} + \alpha$	11.242	0.230	0.240	1.0×10^{-4}	6.4×10^{-5}	5.9×10^{-5}	5.9×10^{-5}	
$^{269}\text{Ds} \rightarrow ^{265}\text{Hs} + \alpha$	11.345	0.230	0.240	2.7×10^{-4}	6.1×10^{-5}	5.6×10^{-5}	5.6×10^{-5}	
$^{268}\text{Mt} \rightarrow ^{264}\text{Bh} + \alpha$	10.299	0.229	0.250	7.0×10^{-2}	1.8×10^{-2}	1.5×10^{-2}	1.5×10^{-2}	
$^{269}\text{Hs} \rightarrow ^{265}\text{Sg} + \alpha$	9.354	0.229	0.220	7.1×10^0	1.7×10^0	1.8×10^0	1.8×10^0	
$^{267}\text{Hs} \rightarrow ^{263}\text{Sg} + \alpha$	10.076	0.229	0.260	7.4×10^{-2}	1.7×10^{-2}	1.3×10^{-2}	1.3×10^{-2}	
$^{266}\text{Hs} \rightarrow ^{262}\text{Sg} + \alpha$	10.381	0.229	0.250	2.3×10^{-3}	1.8×10^{-3}	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	
$^{265}\text{Hs} \rightarrow ^{261}\text{Sg} + \alpha$	10.777	0.238	0.250	5.8×10^{-4}	2.9×10^{-4}	2.6×10^{-4}	2.6×10^{-4}	
$^{264}\text{Hs} \rightarrow ^{260}\text{Sg} + \alpha$	10.590	0.239	0.250	5.4×10^{-4}	5.4×10^{-4}	4.9×10^{-4}	4.9×10^{-4}	
$^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db} + \alpha$	9.009	0.229	0.260	1.7×10^1	8.6×10^0	6.4×10^0	6.4×10^0	
$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} + \alpha$	9.477	0.229	0.260	1.0×10^0	6.4×10^{-1}	4.8×10^{-1}	4.8×10^{-1}	
$^{265}\text{Bh} \rightarrow ^{261}\text{Db} + \alpha$	9.380	0.228	0.260	9.4×10^{-1}	7.0×10^{-1}	5.2×10^{-1}	5.2×10^{-1}	
$^{264}\text{Bh} \rightarrow ^{260}\text{Db} + \alpha$	9.671	0.239	0.260	4.4×10^{-1}	1.8×10^{-1}	1.5×10^{-1}	1.5×10^{-1}	
$^{266}\text{Sg} \rightarrow ^{262}\text{Rf} + \alpha$	8.836	0.229	0.210	2.6×10^1	8.2×10^0	9.7×10^0	9.7×10^0	
$^{265}\text{Sg} \rightarrow ^{261}\text{Rf} + \alpha$	8.949	0.228	0.220	2.4×10^1	6.0×10^0	6.4×10^0	6.4×10^0	
$^{263}\text{Sg} \rightarrow ^{259}\text{Rf} + \alpha$	9.447	0.239	0.260	1.2×10^{-1}	1.8×10^{-1}	1.5×10^{-1}	1.5×10^{-1}	
$^{261}\text{Sg} \rightarrow ^{257}\text{Rf} + \alpha$	9.773	0.238	0.260	7.2×10^{-2}	2.4×10^{-2}	2.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}	

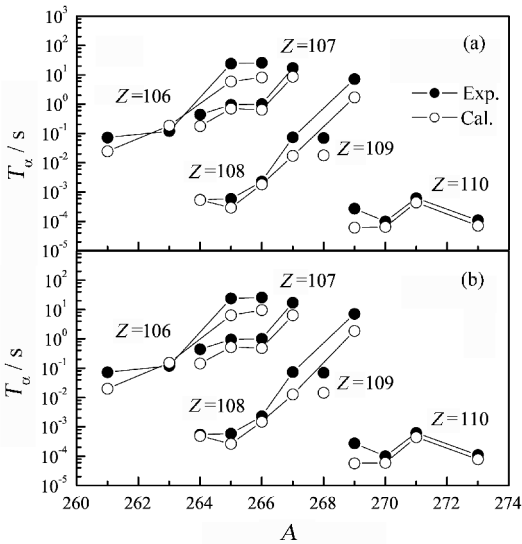


图 1 超重核实验和理论 α 衰变寿命的比较 ($Z=106-110$)

从表 1 的最后两列也可以看出两套理论寿命 $T_\alpha(\text{Cal. 1})$ 和 $T_\alpha(\text{Cal. 2})$ 均与实验值符合得很好。为了进一步比较理论寿命和实验值的符合程度, 图 1 还给出了实验寿命和理论寿命的直观比较, 其中 (a) 对应于 MM 模型形变参数计算的理论寿命, (b)

对应于 RMF 模型形变参数计算的理论寿命。图 1 表明 $Z=106-110$ 的超重核的 α 衰变寿命的实验值 (实心圆点) 和理论值 (空心圆点) 非常接近。我们统计了两套理论结果和实验数据之间的平均偏差: $S = \sum_{i=1}^N |\log_{10} T_{1/2}^{\text{Exp.}}(i) - \log_{10} T_{1/2}^{\text{Theo.}}(i)| / N$, 分别为 $S_{\text{MM}}=0.35$ 和 $S_{\text{RMF}}=0.39$, 这表明实验和理论之间的符合在 2.5 倍以内。这样的符合程度在超重核区域是令人满意的, 同时也说明了 DDCM 在这一重要区域有很好的适用性。

3 总结

本文通过引入 α 衰变中子核的形变自由度, 发展了形变的 DDCM, 理论研究了 $Z \leq 110$ 的超重核的 α 衰变性质。利用 MM 模型和 RMF 模型的四极形变参数, DDCM 计算得到的两套理论 α 衰变寿命与实验数据符合很好, 说明 DDCM 在超重核区域是适用的。核形变效应的引入进一步改进和完善了球形的 DDCM, 只要结合精确的核质量模型, DDCM 能对未知区域的超重核寿命进行可靠的预

言, 可以为将来的超重核实验提供帮助。

参 考 文 献:

- [1] Hofmann S, Münzenberg G. *Rev Mod Phys*, 2000, **72**: 733.
- [2] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Dmitriev S N, *et al.* *Phys Rev*, 2005, **C72**: 034 611; Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* *Phys Rev*, 2006, **C47**: 044 602.
- [3] Gan Zaiguo, Guo Junsheng, Wu Xiaolei, *et al.* *Euro Phys J*, 2004, **A20**: 385.
- [4] Herzberg R D. *J Phys*, 2004, **G30**: R123.
- [5] Ren Zhongzhou, Tai Fei, Chen Dinghan. *Phys Rev*, 2002, **C66**: 064 306.
- [6] Ren Zhongzhou, Tai Fei, Chen Dinghan. *Nucl Phys*, 2003, **A722**: 543c.
- [7] Ren Zhongzhou, Chen Dinghan, Tai Fei, *et al.* *Phys Rev*, 2003, **C67**: 064 302.
- [8] Geng L S, Toki H, Zhao E G. *J Phys*, 2006, **G32**: 573.
- [9] Sharma B K, Arumugam P, Patra S K, *et al.* *J Phys*, 2006, **G32**: L1.
- [10] Cwiok S, Nazarewicz W, Heenen P H. *Nature*, 2005, **433**: 475.
- [11] Sharma M M, Münzenberg G. *Phys Rev*, 2005, **C71**: 054 310.
- [12] Siemens P J, Bethe H A. *Phys Rev Lett*, 1967, **18**: 704.
- [13] Werner F G, Wheeler J A. *Phys Rev*, 1958, **109**: 126.
- [14] Xu Chang, Ren Zhongzhou. *Nucl Phys*, 2005, **A753**: 174.
- [15] Xu Chang, Ren Zhongzhou. *Nucl Phys*, 2005, **A760**: 303.
- [16] Ren Zhongzhou, Xu Chang. *Nucl Phys Rev*, 2005, **22**: 344.
- [17] Satchler G R, Love W G. *Phys Repts*, 1979, **55**: 183.
- [18] Xu Chang, Ren Zhongzhou. *Phys Rev*, 2006, **C73**: 041 301 (R).
- [19] Möller P, Nix J R, Myers W D, *et al.* *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1995, **59**: 185.
- [20] Rhoades-Brown M J, Oberacker V E, Seiwert M, *et al.* *Z Phys*, 1983, **A310**: 287.

Theoretical Studies on α -decay Half-lives of Superheavy Nuclei^{*}

REN Zhong-zhou^{1, 2}, 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: We proposed a deformed version of density-dependent cluster model (DDCM) by including nuclear deformation of the daughter nucleus. A systematic calculation of α -decay half-lives of superheavy nuclei ($Z=106-110$) is carried out by the deformed DDCM. The good agreement between theory and data is obtained. It is shown that the deformed DDCM works well in the superheavy mass region.

Key words: α radioactivity; half-live; superheavy nuclei

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10535010); Doctoral Fund of Education Ministry of China (20010284036); State Key Development Program of Basic Research of China (G2000077400)