

推广的液滴模型对超重核²⁸⁸115及其 α 衰变链性质的研究*

张鸿飞^{2,4;1)} 陈宝秋^{1,3} 马中玉^{1,3} 左维^{1,2} 李君清^{1,2} 任秀宰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 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

4 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 运用推广的液滴模型来确定新核素²⁸⁸115及其 α 衰变链上核的衰变位垒,采用量子力学中处理 α 衰变的WKB方法,对该链上各原子核的 α 衰变半寿命进行了研究.计算结果表明推广的液滴模型结合WKB方法可以很好地在超重区符合 α 衰变半寿命的实验值.同时把推广的液滴模型的计算结果和采用密度相关的M3Y微观核力的结果做了详细的比较,宏观模型(推广的液滴模型)和微观模型(密度相关的M3Y微观核力)计算的 α 衰变半寿命以及实验值三者之间的符合是对新核素²⁸⁸115及其 α 衰变链上核半寿命很好的检验.

关键词 推广的液滴模型 WKB方法 超重核 α 衰变半寿命

1 引言

实验上合成超重核^[1-6]和理论上对它们的性质、熔合过程及 α 衰变半寿命的研究^[7-13]是当前核物理的热门课题之一.对超重核合成和性质的研究是检验和完善现有原子核理论以及加深对核结构和反应机制认识的重要途径.在超重区,原子核的衰变模式主要是 α 衰变.其机制是,当母核形成 α 粒子和子核时,它们之间的距离非常接近,核力起主要作用,它克服库仑排斥力,因此主要是吸引力;而当距离增加时,由于核力是短程力,而库仑作用是长程力,因此核力会逐渐地消失,而只有库仑力起作用,这样就可以从母核中释放出 α 粒子. α 衰变的过程是量子位垒穿透问题,采用WKB方法可以很好地描述 α 衰变寿命.在这一理论处理过程中,能否得到合理的 α 衰变半寿命有两个关键因素:一个是合理的位垒,另一个是穿透位垒的位置.熔合反应研究表明,在接触点纯库仑位垒高度不能重复实验上的熔合位垒高度^[14],由于推广

的液滴模型(GLDM)^[13-15]考虑了精确的核半径、质量和电荷的不对称性、形变、亲和力和因素,所以它能同时描述裂变、熔合反应和 α 衰变.在GLDM中考虑亲和力和能降低位垒的高度并移动其位置,所以在GLDM中, α 衰变的位垒主要由库仑力和亲和力的平衡来控制.研究表明,GLDM结合准分子形状机制^[15]可以得到合理的位垒高度、位置和宽度^[16],它能够很好地描述大部分的熔合反应、裂变和集团发射,同时它还可以很好地描述 α 衰变的位置和寿命^[14, 16].在文章中,我们采用WKB方法结合GLDM的位垒计算了新核素²⁸⁸115及其 α 衰变链上核的半寿命.

2 GLDM和准分子形状机制

2.1 GLDM

对于任意的形变核,宏观的总能量可定义为^[13, 14]

$$E(\text{def}) = E_{\text{LDM}}(\text{def}) + E_{\text{N}}(\text{def}), \quad (1)$$

2005-04-18 收稿

*国家自然科学基金(10175082, 10235020, 10235030, 10275094, 10075080),国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400),中国科学院知识创新工程重大项目(KJCX2-SW-N02)和科技部重大前期研究专项基金(2001CCB01200, 2002CCB01200)资助

1) E-mail: zhanghongfei@impcas.ac.cn

其中 $E_{\text{LDM}}(\text{def})$ 和 $E_{\text{N}}(\text{def})$ 分别表示液滴能和亲和能. 假定密度不变和体积守恒, 液滴能可表示为

$$E_{\text{LDM}}(\text{def}) = E_{\text{v}}(\text{def}) + E_{\text{s}}(\text{def}) + E_{\text{C}}(\text{def}), \quad (2)$$

对于单体情况, 体积能 E_{v} 、表面能 E_{s} 和库仑能 E_{C} 分别表示为:

$$E_{\text{v}}(\text{def}) = -a_{\text{v}}(1 - \kappa_{\text{v}}I^2)A, \quad (3)$$

$$E_{\text{s}}(\text{def}) = a_{\text{s}}(1 - \kappa_{\text{s}}I^2)A^{2/3} \frac{S}{4\pi R_0^2}, \quad (4)$$

$$E_{\text{C}}(\text{def}) = 0.6e^2 \frac{Z^2}{R_0} \frac{1}{2} \int \frac{V(\theta)}{V_0} \left(\frac{R(\theta)}{R_0} \right)^3 \sin\theta d\theta, \quad (5)$$

其中 A , Z 和 $I = (N - Z)/A$ 分别表示母核的质量、电荷和相对中子过剩, $V(\theta)$ 是形变体表面的静电位, V_0 是球体表面的静电位. 体系数 a_{v} 和面系数 a_{s} 分别为: $a_{\text{v}}(T) = 15.494$, $a_{\text{s}} = 17.9439$. 有效半径 R_0 采用如下形式:

$$R_0(T) = (1.28A^{1/3} - 0.76 + 0.8A^{-1/3}), \quad (6)$$

式中 R_0 的选取可以使 $r_0 = R_0A^{-1/3}$ 随质量的增大有一点增加, 体积和表面不对称系数分别为 $\kappa_{\text{v}} = 1.8$, $\kappa_{\text{s}} = 2.6$. 当两体分开时, 体积能 E_{v} 、表面能 E_{s} 、库仑能 E_{C} 分别为:

$$E_{\text{v}} = -a_{\text{v}}[(1 - \kappa_{\text{v}}I_1^2)A_1 + (1 - \kappa_{\text{v}}I_2^2)A_2], \quad (7)$$

$$E_{\text{s}} = a_{\text{s}}[(1 - \kappa_{\text{s}}I_1^2)A_1^{2/3} + (1 - \kappa_{\text{s}}I_2^2)A_2^{2/3}], \quad (8)$$

$$E_{\text{C}} = \frac{0.6e^2Z_1^2}{R_1} + \frac{0.6e^2Z_2^2}{R_2} + \frac{e^2Z_1Z_2}{r}, \quad (9)$$

其中 A_i , Z_i , R_i 和 I_i 分别表示两个原子核的质量、电荷、半径和相对中子过剩, 各系数的取值与单体情况相同.

在通常的液滴模型中, 位能包括体积能、表面能和库仑能. 表面能 E_{s} 仅考虑表面张力效应, 而不包括在脖子区子核和 α 粒子之间的吸引核力的贡献. 引入亲和力就是要考虑这些附加的表面效应, 亲和能可表示为

$$E_{\text{N}}(\text{def}) = E_{\text{prox}} = 2\gamma \int_{h_{\text{min}}}^{h_{\text{max}}} \phi(D/b)2\pi h dh, \quad (10)$$

h 是横向距离, D 是脖子区对无穷小面之间的距离, b 是面的宽度, ϕ 是 Feldmeier 函数^[17], 表面参数 γ 是两个核表面参数的几何平均:

$$\gamma = 0.9517 \sqrt{(1 - 2.6I_1^2)(1 - 2.6I_2^2)} \quad (\text{MeV} \cdot \text{fm}^{-2}), \quad (11)$$

引入亲和力后, 库仑力和亲和力之间的平衡控制着位垒的高度和位置, 可以降低位垒的高度并移动其位

置, 所以亲和力的引入对正确描述 α 衰变位垒非常关键^[16].

2.2 准分子形状机制

需要强调指出的是在 GLDM 中, 亲和力考虑了脖子区表面之间的张力效应, 它与核的形状有关. 而准分子机制的巧妙之处, 就是它可以用统一的表达式来描述自两球形核接触到最后形成一个球形核的全过程, 是一种连续变化的过程, 包括深而窄的脖子的形成. 在极坐标下, 给定系统的形状定义为^[15]:

$$R^2(\theta) = \begin{cases} a^2 \sin^2 \theta + c_1^2 \cos^2 \theta, & 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ a^2 \sin^2 \theta + c_2^2 \cos^2 \theta, & \pi/2 \leq \theta \leq \pi \end{cases}, \quad (12)$$

其中 a 是脖子的半径, c_1 与 c_2 是拉长系数. 假定体积守恒, c_1 和 c_2 ($c_2 \leq c_1$) 有下面的关系:

$$c_2^2 = a^2 + (c_1^2 - a^2)\beta^2, \quad (13)$$

其中 $\beta = R_2/R_1$, 从两个球形核 ($a = 0$) 到形成一个球形核 ($a = c_1 = c_2$) 的整个形状顺序都已经考虑. 形状参数定义为:

$$s_1 = \frac{a}{c_1}, \quad (14)$$

$$s_2 = \frac{a}{c_2}, \quad (15)$$

对于给定的衰变道, 由方程(13)—(15)很容易知道 s_1 和 s_2 满足如下关系:

$$s_2^2 = \frac{s_1^2}{s_1^2 + (1 - s_1^2)\beta^2} \quad (0 \leq s_1, s_2 \leq 1), \quad (16)$$

s_1 的变化范围为 1 到 0 时, 可以描述从一个球形核连续地变化到两个相接触球形核的全过程.

3 超重核 α 衰变的半寿命

我们知道 α 衰变可以发生的条件是 α 衰变能

$$Q_{\alpha} = M - (M_{\alpha} + M_{\text{d}}) \quad (17)$$

为正值, 即 α 衰变要释放出能量. 其中 M , M_{d} , M_{α} 分别表示母核, 子核和 α 粒子的质量. 在 WKB 方法中, α 衰变半寿命为^[18]

$$T_{1/2} = [(h \ln 2)/(2E_{\nu})][1 + \exp(K)], \quad (18)$$

其中 E_{ν} 为零点振动能量:

$$E_{\nu} = \frac{1}{2} \hbar \omega = \frac{1}{2} h \nu, \quad (19)$$

式中 ν 为零点振动频率, 即没有位垒时的穿透几率. 对 α 衰变, 零点振动能量 E_{ν} 的确定采用以下的经验表达

式^[18]:

$$E_\nu = \begin{cases} 0.1045Q_\alpha, & \text{偶偶核} \\ 0.0962Q_\alpha, & \text{奇}Z\text{偶}N\text{核} \\ 0.0907Q_\alpha, & \text{偶}Z\text{奇}N\text{核} \\ 0.0767Q_\alpha, & \text{奇奇核} \end{cases} \quad (20)$$

在该表达式中已经考虑了壳效应和对关联^[18]. 我们研究的超重核²⁸⁸115及其 α 衰变链中核均为奇奇核, E_ν 选取(20)式中的最后一种形式. 在WKB近似下, (18)式中 K 的值由以下的积分得到:

$$K = \frac{2}{\hbar} \int_{R_a}^{R_b} [2\mu(E(R) - E_\nu - Q_\alpha)]^{1/2} dR, \quad (21)$$

其中, 积分上下限 R_b 和 R_a 是穿透位垒点, 通过以下方程来确定:

$$E_a = E_b = Q_\alpha + E_\nu; \quad (22)$$

μ 为子核和 α 粒子的折合质量; $E(R)$ 是由GLDM计算得到的 α 衰变位垒; Q_α 衰变能采用实验值.

4 计算结果和讨论

在公式(21)中 α 衰变位垒 $E(R)$ 由GLDM计算得到. 对²⁸⁸115及其 α 衰变链, α 衰变位垒 $E(R)$ 显示在图1中.

通过公式(18)—(22)可以计算出 α 衰变的半寿命. 通常人们也采用Viola-Seaborg (VS)公式来计

算 α 衰变的半寿命^[19]:

$$\log_{10}[T_{1/2}(s)] = (aZ + b)Q_\alpha^{-1/2} + cZ + d + h_{\log}, \quad (23)$$

其中 Z 为母核的原子序数, Q_α 衰变能采用实验值, 参数 a, b, c, d 和 h_{\log} 的选取见文献[19]. 我们运用以上所给出的理论模型和方法来计算新发现的超重核²⁸⁸115及其 α 衰变链中核的半寿命, 用不同的理论方法计算得到的半寿命与实验值的比较列在表1中. 在表中, 第1和第2列分别表示 α 衰变链的质子数和质量数, 第3和第5列表示 α 衰变位垒 $E(R)$ 分别由GLDM和采用密度相关的M3Y势(DDM3Y)^[20]计算得到的理论值. 第4列表示由Viola-Seaborg (VS)公式计算得到的理论值, 而最后两列表示该 α 衰变链上核半寿命和衰变能 Q_α 的实验值.

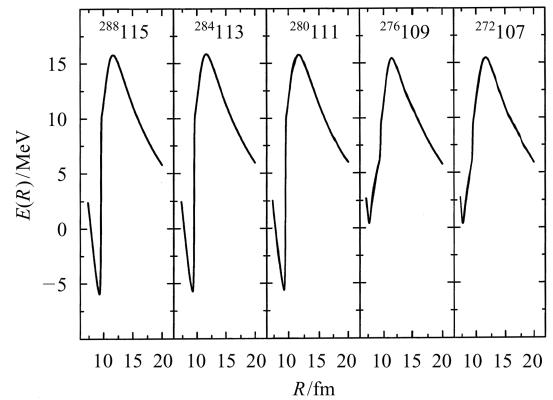


图1 由GLDM计算的新核素²⁸⁸115及其衰变链上核的 α 衰变位垒

表1 GLDM和VS理论方法计算的²⁸⁸115及其 α 衰变链中核的半寿命, 与实验值^[6]和DDM3Y^[20]所计算的结果的比较

Z	A	Theo.(GLDM)	Theo.(VS)	Theo.(DDM3Y)	Expt.	Expt.
		$T_{1/2}/s$	$T_{1/2}/s$	$T_{1/2}/s$	$T_{1/2}/s$	Q_α/MeV
115	288	1.11	0.937	0.409	$0.087^{+0.105}_{-0.030}$	10.61 ± 0.06
113	284	1.99	4.13	1.54	$0.48^{+0.58}_{-0.17}$	10.15 ± 0.06
111	280	2.71	5.7	1.9	$3.6^{+4.3}_{-1.3}$	9.87 ± 0.06
109	276	2.01	1.44	0.45	$0.72^{+0.87}_{-0.25}$	9.85 ± 0.06
107	272	5.16	33.8	9.7	$9.8^{+11.7}_{-3.5}$	9.15 ± 0.06

通过分析和比较, 可以看出: 对²⁸⁰111, GLDM的计算结果与实验数据符合得最好, 其他4个核是DDM3Y的计算结果^[20]与实验数据最接近. 总体来看, GLDM和DDM3Y计算的结果要比经验公式VS的计算结果好, 这说明运用物理图像明晰的模型来研究 α 衰变半寿命是优于直接输入或调节参数的方法, 采用GLDM计算的 α 衰变位垒 $E(R)$, WKB方法可以推广用来预示超重核的半寿命. 这是由于GLDM结合准分子形状机制来计算 α 衰变位垒时, 已考虑了体积能、表面能、库仑能、亲和力效应、质量和电荷的不对

称性以及精确的核半径等. 在过去的 α 衰变性质的研究中, 人们假定表面能和库仑能控制着位垒的高度和宽度, 表面能也只考虑表面张力效应, 并不包括颈部或刚形成的碎片之间吸引核力的贡献. 在GLDM中, 亲和力考虑了这些附加的表面效应, 在两核的接触点, 亲和力达到最大值, 它的两边逐渐减小到零, 亲和力的效果是减小位垒高度并移动位垒峰的位置. 通过全面的考虑后, GLDM可以给出合理的 α 衰变位垒, 再结合WKB方法, 采用实验的 α 衰变能, 就可得到合理的 α 衰变半寿命. DDM3Y是通过双折叠密度思

路, 假设核子之间的作用为M3Y^[20]的情况下从微观的角度得到子核和 α 粒子之间的作用势, DDM3Y结合WKB方法计算的结果也和实验值符合得很好.

5 结论

运用GLDM结合WKB方法对超重核 $^{288}115$ 及其 α 衰变链中核的性质进行了研究, 同时也用VS公式对

这些核的半寿命做了相应的计算, 并和DDM3Y的计算值及实验值做了比较和分析. GLDM和DDW3Y的结果较VS公式的计算值与实验值符合得更好, 表明运用物理图像明晰的模型来研究 α 衰变寿命优于直接输入或调节参数的方法. 宏观模型GLDM和微观方法DDM3Y的计算结果以及实验值三者之间的符合是对新核素 $^{288}115$ 及其 α 衰变链上核半寿命很好的检验.

参考文献(References)

- 1 Hofmann S et al. Rep. Prog., 1998, **61**: 636
- 2 Oganessian Y T et al. Nature, 1999, **400**: 242
- 3 Oganessian Y T et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 041604(R)
- 4 GAN Zai-Guo, FAN Hong-Mei, QIN Zhi et al. High Energy Phys. and Nuclear Physics, 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)
- 5 Hofmann S, Muenzenberg G. Rev. Mod. Phys., 2000, **72**: 733
- 6 Oganessian Y T et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 021601(R)
- 7 REN Zhong-Zhou. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2002, **26**: 1046 (in Chinese) (任中洲. 高能物理与核物理, 2002, **26**: 1046)
- 8 ZHANG Hong-Fei, ZUO Wei, Soojae Im et al. The Commun. Theor. Phys., 2004, **42**: 871
- 9 Bend M, Rutz K, Reinhard P G et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 034304
- 10 LI W F, WANG N, LI J F et al. Europhys. Lett., 2003, **64**: 750
- 11 Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. Phys. Rev., 2004, **C69**: 011601R
- 12 Patra S K et al. Nuclear Physics, 1999, **A651**: 117
- 13 Royer G, Remaud B. Nucl. Phys., 1985, **A444**: 477
- 14 Royer G J. Phys., 2000, **G26**: 1149
- 15 Royer G, Remaud B. J. Phys., 1982, **G8**: L159
- 16 CHEN Bao-Qiu, MA Zhong-Yu. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2004, **28**: 1079 (in Chinese) (陈宝秋, 马中玉. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 1079)
- 17 Feldmeier H. 12th Summer School on Nuclear Physics. Polan: Mikolajki, 1979
- 18 Poenaru D N, Greiner W, Ivascu M et al. Z. Phys., 1986, **A325**: 435
- 19 Viola V E, Seaborg G T. J. Inorg. Nucl. Chem., 1966, **28**: 741; Moeller P, Nix J R, Lratz K L. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1997, **66**: 131
- 20 Basu D N. J. Phys., 2004, **G30**: B35

Properties of the Superheavy Nuclei $^{288}115$ and Its α -Decay Chain in a Generalized Liquid-Drop Model*

ZHANG Hong-Fei^{2,4,1)} CHEN Bao-Qiu^{1,3} MA Zhong-Yu^{1,3} ZUO Wei^{1,2} LI Jun-Qing^{1,2} Soojae Im²

1 (Center of Nuclear Theoretical Physics,

National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

2 (Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

3 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

4 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The properties of the nuclei belonging to the newly observed nuclei starting from $^{288}115$ have been studied with the generalized liquid drop model connected with WKB approximation. The calculated results have been compared with the results of the DDM3Y theory and the experimental data. The half lives of this new alpha decay chain have been well tested from the consistence of the macroscopic, microscopic and the experimental data.

Key words generalized liquid drop model, WKB approximation, superheavy nuclei, alpha-decay half-time

Received 18 April 2005

*Supported by National Natural Science Foundation of China (10175082, 10235020, 10235030, 10275094, 10075080), Major State Basic Research Development Program(G2000077400), Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-N02) and National Key Program for Basic Research of the Ministry of Science and Technology (2001CCB01200, 2002CCB01200)

1) E-mail: zhanghongfei@impcas.ac.cn