

# 形变区超重核的合成和衰变研究\*

刘祖华<sup>1)</sup> 包景东<sup>2)</sup>

1(中国原子能科学研究院 北京 102413)

2(北京师范大学物理系 北京 100875)

**摘要** 理论预言超重核  $^{270}\text{Hs}$  是形变双幻数核. 利用二参量 Smoluchowski 方程计算了不同弹靶组合下合成  $^{266-270}\text{Hs}$  反应的形成截面, 提出了最佳弹靶组合和轰击能量, 预言了  $\alpha$  衰变半衰期.

**关键词** 超重核 质子形变壳 Smduchowski 方程

## 1 引言

超重核的基态性质, 尤其是核形变的研究非常重要. 宏观-微观模型<sup>[1-4]</sup> 预言, 在  $Z = 108$  存在强的质子形变壳. 而相应的中子壳位于  $N = 162$ . 预计  $^{270}\text{Hs}$  是一双幻数形变核. 因此, 实验上合成  $^{270}\text{Hs}$  及相邻核, 研究其核结构将很有意义. 然而超重核合成截面很低, 在 pb ( $10^{-12}$  barn) 数量级, 因而难度大. 为了能成功的合成超重核, 选择最佳弹靶组合和轰击能量至关重要. 在此篇报告中, 我们将对不同弹靶组合下的俘获截面, 复合核形成与准裂变竞争, 以及存活几率进行深入研究和探讨. 并在此基础上提出合成超重核  $^{266-270}\text{Hs}$  的最佳反应和轰击能量. 此外, 超重核合成实验需预知  $\alpha$  衰变半衰期. 为此, 利用势垒穿透模型预言了超重核  $^{266-270}\text{Hs}$  的  $\alpha$  衰变半衰期. 在半衰期计算中, 考虑了子核四极形变.

## 2 超重核合成截面

超重核合成截面可写成,

$$\sigma_{ER}(E) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \sum_{J=0}^{\infty} (2J+1) T_J(E) P_{CN}(E, J) W_{\text{sur}}(E, J). \quad (1)$$

其中  $T_J$  是  $J$  分波的入射道穿透系数. 利用 Zagrebaev 等人提出的模型<sup>[5, 6]</sup> 计算. 在此模型中 Zagrebaev 等人利用半唯象的势垒分布公式, 考虑了入射道与碰撞核的动态形变的耦合. 他们的模型比较成功地再现了一

些重核俘获反应激发函数, 因此计算结果比较可信.

$P_{CN}$  是复合核形成几率, 包含了复合核形成与准裂变竞争的信息. 复合核形成与准裂变竞争的动力学演化过程用类似于布朗运动的扩散过程描述. 计算中, 考虑了二核之间有效表面的相对距离  $s$  和轻核的中子数  $N$ . 令  $x = s, y = N$ . 相应的几率分布  $W(x, y, t)$  用二参量的 Smduchowski 方程计算<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial W(x, y, t)}{\partial t} = [L_x(x, y) + \gamma L_y(x, y)] W(x, y, t). \quad (2)$$

算符  $L_x$  和  $L_y$  分别为

$$L_x(x, y) = -\frac{\partial}{\partial x} D_x(x, y) + D_{xx} \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \quad (3)$$

$$L_y(x, y) = -\frac{\partial}{\partial y} D_y(x, y) + D_{yy} \frac{\partial^2}{\partial y^2}. \quad (4)$$

假定扩散系数  $D_{xx}, D_{yy}$  是常数, 即  $D_{xx} = kT/\alpha_x, D_{yy} = kT/\alpha_y, T$  是核温度;  $\alpha_x, \alpha_y$  正比作用在自由度  $x$  和  $y$  的耗散.

不对称裂变谷中的势垒  $V_{af}(x, y)$  按中子平衡后的系统计算. 计算中考虑了反应系统的质量不对称, 脖子和相对距离 3 个自由度<sup>[8, 9]</sup>. 图 1 显示  $^{26}\text{Mg} + ^{244}\text{Cm}, ^{27}\text{Al} + ^{243}\text{Am}$  和  $^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$  的势垒  $V_{af}(x, y)$ . 用抛物线近似不对称裂变谷势  $V_{af}(x, y) = -a(y)[x - x_{\text{max}}(y)]^2/2$ . 其中  $x_{\text{max}}$  为势的极大处, 相应的势垒称为条件鞍点. 漂移系数  $D_x = a(y)(x - x_{\text{max}})/\alpha_x$ . 扩散运动在排斥势  $V_{af}(x, y)$  中进行. 越过  $x_{\text{max}}$  的事件进入复合核, 没有越过  $x_{\text{max}}$  的事件发生准裂变. 漂移系数  $D_y$  正比于  $y$  方向的驱动力, 由控制中

\* 国家自然科学基金(10235020, 10235030)资助

1) E-mail: zhliu@iris.ciae.ac.cn

子流动势<sup>[7]</sup>计算.

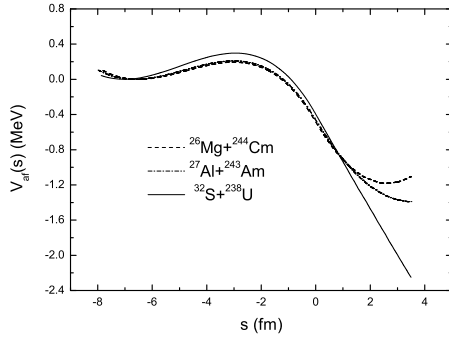


图 1 反应系统  $^{26}\text{Mg}+^{244}\text{Cm}$ ,  $^{27}\text{Al}+^{243}\text{Am}$ ,  $^{32}\text{S}+^{238}\text{U}$  在不对称裂变谷的位垒

公式(2)中, 引入参量  $\gamma$ , 以表明不同的时标. 众所周知, 在低能重离子碰撞中,  $N/Z$  平衡比其它集体自由度, 例如核系统的整体长度的改变, 快得多的时标内发生. 在  $\gamma \gg 1$  的条件下, 二参量 Smoluchowski 方程约化为单参量方程<sup>[7]</sup>,

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = L_{00}W(x,t). \quad (5)$$

算符  $L_{00}$  取以下形式,

$$L_{00} = -\frac{\partial}{\partial x} \bar{D}_x(x) + D_{xx} \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \quad (6)$$

$$\bar{D}_x(x) = \int D_x(x,y) \phi_0(y,x) dy. \quad (7)$$

$\phi_0(y,x)$  是算符  $L_y(y,x)$  对于  $n=0$  的本征函数<sup>[7]</sup>,

$$\phi_0(y,x) = \sqrt{\frac{b(x)}{2\pi kT}} \exp\left[-\frac{b(x)(y-y_{eq})^2}{2kT}\right], \quad (8)$$

Fokker-Plank 方程(5)有 Gaussian 型解. 而到达复合核组态的几率等于  $x \leq x_{\max}$  区域的积分, 得

$$P_{CN}(E,J) = \frac{1}{2} \text{erfc} \sqrt{\bar{\beta}}. \quad (9)$$

$\bar{\beta} = \bar{B}/kT$ ,  $\text{erfc}$  是误差函数互补, 即  $(1-\text{erf})$ . 按公式(7)势垒平均高度为,

$$\bar{B} = \int B(y) \phi_0(y,x_0) dy. \quad (10)$$

$B(y)$  是不对称裂变谷中不同  $y$  值的势垒高度.

存活几率  $W_{\text{sur}}(E_0^*, J)$  是复合核通过发射轻粒子和  $\gamma$  射线衰变到最终残余核的基态的几率. 蒸发  $x$  个中子的存活几率可写成

$$W_{\text{sur}}(E, J) = G_{xn}(E_0^*, J) \times \prod_k \left[ \frac{\Gamma_n(U_k^{\max}, J)}{\Gamma_f(U_{k,f}^{\max}, J) + \Gamma_n(U_k^{\max}, J)} \right]. \quad (11)$$

$E_0^* = E_{\text{c.m.}} + Q$  是质心系能量与反应  $Q$  值之和.  $G_{xn}$  是初始激发能为  $E_0^*$  的复合核刚好蒸发  $x$  个中子的

率<sup>[10, 11]</sup>. 中子宽度  $\Gamma_n$  和裂变宽度  $\Gamma_f$  按文献[10,12]中的相关公式计算. 其中  $U_k^{\max} = E_0^* - S_n(k) - E^{\text{rot}}(k)$ .  $E^{\text{rot}}(k)$  是母核蒸发  $k$  个中子后的子核的转动能.  $U_{k,f}^{\max}$  是母核蒸发  $k-1$  个中子后, 子核在鞍点处的最大热激发能,  $U_{k,f}^{\max} = E_k^* - B_f(k) - E_{sd}^{\text{rot}}$ .  $E_{sd}^{\text{rot}}$  是相应核在鞍点处的转动能. 裂变位垒与核激发能有关,

$$B_f(k) = B_{\text{LD}} - \Delta_{\text{sh}} \exp(-E_k^*/E_D). \quad (12)$$

$B_{\text{LD}}$  是裂变位垒的液滴部分,  $\Delta_{\text{sh}}$  是壳修正能,  $E_D = 25\text{MeV}$ <sup>[13]</sup> 为壳效应衰减因子. 裂变位垒包含宏观液滴能部分  $B_{\text{LD}}$ <sup>[14]</sup> 和微观壳修正部分  $\Delta_{\text{sh}}$ , 其值取自文献[15]. 发射  $k-1$  个中子后的余核激发能,  $E_k^* = E_0^* - \sum_{i=1}^{k-1} (S_n(i) + 2T_i)$ . 作为一个典型例子, 图2显示,  $^{34}\text{S}+^{238}\text{U}$  融合蒸发反应经  $3n$ ,  $4n$ ,  $5n$  形成  $^{269}\text{Hs}$ ,  $^{268}\text{Hs}$ ,  $^{267}\text{Hs}$  的蒸发残余截面. 其中实点是  $^{238}\text{U}(^{34}\text{S}, 5n)^{267}\text{Hs}$  的实验值<sup>[16]</sup>. 计算结果与实验比较一致. 说明我们的计算结果较可靠. 我们计算了一系列不同弹靶组合下的超重核形成截面. 表1列出合成  $^{266}-^{270}\text{Hs}$  的最佳反应, 形成截面和轰击能量.

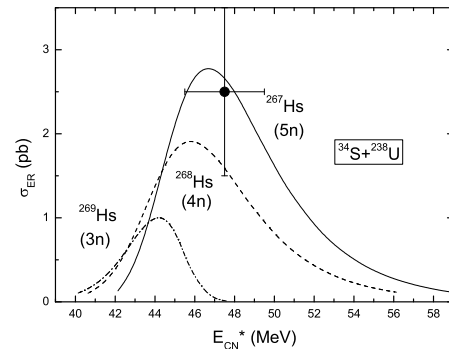


图 2  $^{34}\text{S}+^{238}\text{U}$  融合蒸发反应经  $3n$ ,  $4n$ ,  $5n$  形成  $^{269}\text{Hs}$ ,  $^{268}\text{Hs}$ ,  $^{267}\text{Hs}$  的蒸发残余截面. 实点是  $^{238}\text{U}(^{34}\text{S}, 5n)^{267}\text{Hs}$  的实验值<sup>[16]</sup>

表 1 合成  $^{266}-^{270}\text{Hs}$  的最佳反应, 轰击能量, 蒸发残余截面和  $\alpha$  衰变半衰期

反应	形成核	激发能/MeV	$\sigma_{\text{ER}}/\text{pb}$	$T_{\alpha}/\text{ms}$
$^{244}\text{Cm}(^{26}\text{Mg}, 4n)$	$^{266}\text{Hs}$	44.68	0.128	0.3
$^{244}\text{Cm}(^{26}\text{Mg}, 3n)$	$^{267}\text{Hs}$	42.18	1.56	0.007
$^{238}\text{U}(^{34}\text{S}, 4n)$	$^{268}\text{Hs}$	45.64	1.92	13.58
$^{238}\text{U}(^{34}\text{S}, 3n)$	$^{269}\text{Hs}$	44.14	1.02	0.039
$^{226}\text{Ra}(^{48}\text{Ca}, 4n)$	$^{270}\text{Hs}$	36.94	30.6	71.38

### 3 $\alpha$ 衰变半衰期

利用势垒穿透模型预言了超重核  $^{266}-^{270}\text{Hs}$  的  $\alpha$  衰变半衰期. Denisov<sup>[17]</sup> 等人通过对半衰期和重离子

近垒融合截面的系统拟合, 给出 $\alpha$ 粒子与重核的相互作用势垒的参数化公式和 $\alpha$ 粒子的预形成因子. 而库仑势用函数形式给出. 利用他们的相互作用势的参数化公式计算粒子与核的势垒. 利用势垒穿透模型计算了 $^{266-270}\text{Hs}$ 的 $\alpha$ 衰变半衰期. 计算中考虑了核的四极形变. 计算结果列于表1. 偶-偶核和奇 $A$ 核的衰变 $Q$ 值和四极形变数据分别取自文献[18]和[15]. 计算结果表明 $Q$ 值和四极形变对衰变半衰期有明显的影响.

## 4 结论

宏观-微观模型<sup>[1-4]</sup>预言, 在 $Z = 108$ 存在强的质子形变壳. 而相应的中子壳位于 $N = 162$ . 预计 $^{270}\text{Hs}$ 是一“双幻数”形变核. 利用二参量的Smoluchowski方程计算了不同弹靶组合下合成 $^{266-270}\text{Hs}$ 反应的形成截面, 提出了最佳弹靶组合和轰击能量, 预言了 $\alpha$ 衰变半衰期. 以上结果有助于 $^{270}\text{Hs}$ 及相邻超重核的合成和核结构研究.

## 参考文献(References)

- 1 Cwiok S, Pashkevich V V, Dudek J, Nazarewicz W. Nucl. Phys., 1983, **A410**: 254
- 2 Patyk Z, Skalski J, Sobiczewski A. Nucl. Phys., 1989, **A502**: 591
- 3 Patyk Z, Sobiczewski A. Nucl. Phys., 1991, **A533**: 132
- 4 Moller P, Nix J R. J. Phys., 1994, **G20**: 1681
- 5 Zagrebaev V I. Phys. Rev., 2001, **C64**: 034606
- 6 Zagrebaev V I, Aritomo Y, Itkis M G et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 014607
- 7 LIU Z H, BAO J D. Chin. Phys. Lett., 2005, **22**: 3044
- 8 Swiatecki W J, Siwek-Wilczynska K, Wilczynski J. Acta Phys. Pol., 2003, **34**: 2049
- 9 Swiatecki W J, Siwek-Wilczynska K, Wilczynski J. Phys. Rev., 2005, **C71**: 014602
- 10 Vandenbosch R, Huizenga J R. Nuclear Fission (Academic Press, New York, 1973), 233
- 11 LI W F et al. Chin. Phys. Lett., 2004, **21**: 636
- 12 Siwek-Wilczynska K, Skwira I. Phys. Rev., 2005, **C72**: 034605
- 13 Adamian G G, Antonenko N V, Ivanova S P et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 064303
- 14 Cohen S, Swiatecki W J. Ann. Phys. (N. Y.), 1963, **22**: 406
- 15 Moller P, Nix J R, Myers W D et al. At. Data Nucl. Data Tables, 1995, **59**: 185
- 16 Lazarev Yu A et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**: 1903
- 17 Denisov V Yu, Ikezoe H. Phys. Rev., 2005, **C72**: 064613
- 18 REN Z Z, TAI F, CHEN D H. Phys. Rev., 2002, **C66**: 064306

# Synthesis and Decay of Superheavy Nuclei in the Deformed Region<sup>\*</sup>

LIU Zu-Hua<sup>1,1)</sup> BAO Jin-Dong<sup>2</sup>

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

2 (Physics Department, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract**  $^{270}\text{Hs}$  is predicted theoretically as a double magic nucleus. The formation cross sections of  $^{266-270}\text{Hs}$  with different projectile-target combinations are calculated using a two-parameter Smoluchowski equation. The optimal projectile-target combination and bombarding energy for the formation of superheavy nuclei  $^{266-270}\text{Hs}$  are suggested. The half-lives of  $\alpha$  decay for superheavy nuclei  $^{266-270}\text{Hs}$  are predicted.

**Key words** superheavy nuclei, proton deformed closure shell, Smoluchowski equation

<sup>\*</sup> Supported by National Natural Science Foundation of China (10235020, 10235030)

1) E-mail: zhliu@iris.ciae.ac.cn