

文章编号: 1007-4627(2009)02-0107-05

通过 $^{48}\text{Ca}+^{249}\text{Bk}$ 合成 $Z=117$ 的可能性研究^{*}

张群武¹, 沈彩万^{1, #}, 赵恩广²

(1 湖州师范学院理学院, 浙江 湖州 313000;

2 中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

摘要: 利用两步模型对可能合成 $Z=117$ 的核反应 $^{48}\text{Ca}+^{249}\text{Bk}$ 进行了研究。模型将熔合过程分为弹靶接触前的粘连过程和从弹靶接触到形成复合核的形成过程。结合统计蒸发模型, 计算了 $^{297}117$ 蒸发数个中子的剩余截面。结果表明, 在激发能 $E^* = 31 \text{ MeV}$ 且复合核蒸发3中子时的剩余截面最大, 为 0.34 pb , 已经可以用实验方法进行探测。

关键词: 超重元素; 朗之万方程; 截面

中图分类号: O571.43⁺²

文献标识码: A

1 引言

自1965年以来, 原子核理论预言, 在已知稳定核的顶端以外, 还可能存在一系列相当稳定的超重元素稳定岛, 第一个岛中心的原子核是中子数和质子数填满闭壳的双幻核: 大约在 $Z=114$, $N=184$ 附近。除了这个稳定岛外, 理论还预言了另外一些可能的更重的超重元素稳定区及超重元素的性质。许多物理学家尝试以各种不同的方法在实验室合成或者在自然界寻找稳定的超重元素, 甚至包括对地球外样品的分析, 但至今还没有得到肯定的结果。由于未知的双幻核位置在一定程度上是与模型相关甚至与模型的参数相关^[1], 且现有核反应理论在多大程度上适用于超重核区还有待深入研究, 这些都增加了从实验上合成超重核的难度。如果核结构理论预言了某个幻数核的存在, 实验上如何合成这个幻数核还需要核反应理论提供可能的反应道及相应激发函数, 以便实验物理学家选择相应的弹靶组合和入射能量。

人们一般用复合核反应的理论来描述超重核的形成过程, 即弹核和靶核先以一定的概率形成复合核(熔合过程), 然后复合核通过蒸发粒子降低激发能、在一定条件下最终冷却成超重核(蒸发过程)。对于后者, 统计蒸发模型可以较好地加以描述^[2]。

而对于前者, 准确的描述还比较困难。针对重核熔合这一复杂过程, 人们发展出了不同的模型。如将融合过程看成是体系核子在驱动势的作用下在弹靶之间不断转移而最终形成复合核的双核模型^[3]; 有将核子看成是量子波包而将熔合过程视为量子相互作用与演化的QMD模型^[4]; 有将融合过程看成是俘获过程及考虑中子流的一维势垒穿过程^[5]。这些模型都能从某一方面对原子核反应进行了正确描述, 但要模型能全面正确地描述各种类型的重核反应, 还需进一步研究。

即使理论上对超重核的预言还有一定的不确定性, 很多实验室仍然根据理论的结果试图在实验室合成超重核。实验上合成超重核的反应可以分为两类, 一类是热熔合, 另一类是冷熔合。到目前为止, 在合成质子数在113—118之间的超重核中, 除了 $Z=113$ 采用冷熔合、 $Z=117$ 还未发现之外, 其余的都是采用以 ^{48}Ca 为弹核的热熔合^[6]。目前还没有实验室尝试合成 $Z=117$ 的超重核。本文试图利用两步模型对 $^{48}\text{Ca}+^{249}\text{Bk}$ 进行研究, 探讨合成 $Z=117$ 的可能性。

2 熔合过程和两步模型

根据复合核反应理论, 核反应的生成截面为

* 收稿日期: 2008-07-11; 修改日期: 2008-08-26

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10675046); 浙江省自然科学基金资助项目(Y605476); 浙江省新世纪高等教育教学改革研究项目(YB08064)

作者简介: 张群武(1985-), 男(汉族), 浙江温州人, 助教, 从事原子核反应方面的研究, E-mail: czzwu1985@126.com

通讯联系人: 沈彩万, E-mail: cwshen@hutc.zj.cn

$$\sigma_{\text{res}}(E^*) = \pi\lambda^2 \sum_J (2J+1) \times P_{\text{fusion}}^J(E_{\text{cm}}) P_{\text{surv}}^J(E^*), \quad (1)$$

这里的 $\lambda = \hbar / \sqrt{2\mu E_{\text{cm}}}$ 是弹核的折合德布罗意波长 (μ 为折合质量), J 为体系总角动量子数。 P_{fusion} 和 P_{surv} 分别是熔合概率和复合核的存活概率。 E^* 为复合核的激发能。

在实验上, 重核反应要实现熔合过程, 除克服库仑位垒所需能量外, 还需要一个额外的推动动能^[7, 8]。这其中具体的物理反应机制并不是很清楚, 但有种解释是比较合理的: 在重核熔合过程中, 在弹核克服库仑位垒后, 还需要克服液滴能位垒, 最后才能形成复合核。这种将熔合过程分为两个阶段的模型称为两步模型(Two-Step model), 利用这个模型计算的熔合截面与实验结果符合得较好^[9]。

第一个阶段, 即粘连阶段, 弹核从远距离运动到表面与靶核接触。在此期间, 弹核要跨越库仑位垒才能达到表面相接触, 体系克服库仑位垒的概率称为粘连概率 P_{stick} 。在第二个阶段, 即形成阶段, 弹核和靶核从表面接触到形成复合核, 其间弹核需要克服另外一个位垒——液滴能位垒, 而将克服液滴能位垒的概率称为形成概率 P_{form} 。这两个阶段的动力学过程都可以用带随机力的朗之万方程来描述, 随机力的引入是因为原子核在形成复合核的过程中处于激发态, 核子处于随机运动状态, 从而使原子核形状发生变化。由于这两个阶段相互独立, 因此总的熔合概率为

$$P_{\text{fusion}}^J(E_{\text{cm}}) = P_{\text{stick}}^J(E_{\text{cm}}) P_{\text{form}}^J(E_{\text{cm}})。 \quad (2)$$

Swiatecki等^[10, 11]通过拟合大量实验数据, 在假设位垒高度在库仑位垒附近呈高斯分布的条件下(以此模拟俘获阶段的能量耗散), 得出了一个计算轻核俘获截面的经验公式:

$$\sigma_{\text{capture}} = \pi R_B^2 \frac{H}{2E_{\text{cm}}} \left\{ X [1 + \text{erf}(X)] + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-X^2) \right\}, \quad (3)$$

其中, R_B 为在位垒处弹靶中心的距离, H 为位垒的高斯分布宽度, $X = (E_{\text{cm}} - V_B) / H$, V_B 为库仑位垒高度。为考虑各个分波的影响, 根据文献^[10, 11]容易得到对应角动量 L 的俘获概率:

$$P_{\text{capture}}^J(E_{\text{cm}}) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \text{erf} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{H}{H} \right] \times \right.$$

$$\left. \left(E_{\text{cm}} - V_B - \frac{\hbar^2 J(J+1)}{2\mu R_B^2} \right) \right\}。 \quad (4)$$

上式实际反映的是弹核克服库仑位垒的概率, 故而可以用来代替公式(2)中的 $P_{\text{stick}}^J(E_{\text{cm}})$ 。针对 $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$, 相应的粘连概率如图1所示。

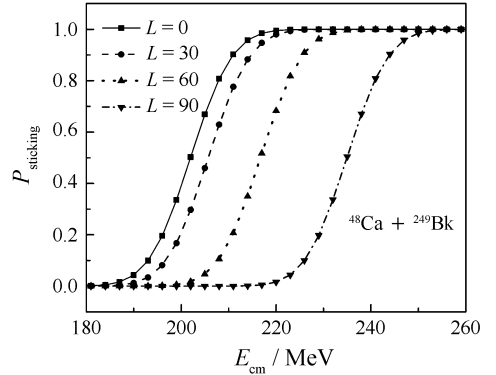


图1 $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ 在 $J = 0, 30, 60, 90$ 时的粘连概率
在 $J = 0$ 时的库仑位垒为 202 MeV。

在弹核和靶核表面相互接触后, 弹和靶就形成一个具有一定激发能和转动能的液滴。在液滴能的作用下, 系统会继续演化, 最后有的会形成复合核, 有的则会重新裂变为两个原子核。在该阶段的描述中, 我们采用双中心模型, 即选择无量纲的双中心距离 R/R_0 (R_0 为球形复合核的半径) 和质量非对称度 $\alpha = [(A_1 - A_2) / (A_1 + A_2)]$ 来表述体系的变化。由于颈部自由度的粘滞系数较小, 且液滴能随颈部系数的增大而增大, 因此计算中颈部系数 ϵ 固定为 0.1。对于这一过程的演化可以用多维朗之万方程加以描述^[12]:

$$\begin{aligned} \frac{dq_i}{dt} &= (m^{-1})_{ij} p_j, \\ \frac{dp_i}{dt} &= -\frac{\partial U^J}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_i} (m^{-1})_{jk} p_j p_k - \\ &\quad \gamma_{ij} (m^{-1})_{jk} p_k + g_{ij} R_j(t), \\ g_{ik} g_{jk} &= \gamma_{ij} T^J。 \end{aligned} \quad (5)$$

这里 i, j 取 1 和 2。 q_1 和 q_2 分别对应 R/R_0 和 α ; p_1 和 p_2 分别对应 R/R_0 和 α 的广义动量, 角标重复时表示求和。在式(5)中, m_{ij} 是质量张量, 势 U^J 是与角动量 J 对应的液滴能^[13, 14]。随机力 $R_i(t)$ 是一个高斯分布的随机函数, 满足 $\langle R_i(t) \rangle = 0$, $\langle R_i(t) R_j(t') \rangle = 2\delta_{ij} \delta_{tt'}$, γ_{ij} 是摩擦张量, g_{ij} 称为随机力强度。这里的质量张量、液滴能和随机力强度等均与

体系所处位置的 R/R_0 和 α 有关, 是通过双中心壳模型计算得到的。 T^J 是复合核的温度, 其值通过 $E^* - E_{\text{shell}} - E_{\text{rot}}^J = aT^2$ 得到, 这里 E_{rot}^J 为系统转动能, a 为能级密度参数, 近似地取 $A/10$, 其中 A 为复合核的质量数。图2给出了弹靶接触后系统的演化轨迹。由于随机力的存在, 即使在接触点有相同的

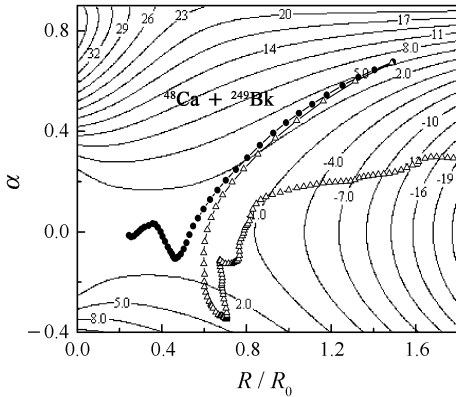


图2 弹靶接触后不同的演化轨迹

初始相对动量, 其演化轨迹也是不相同的, 图中给出了两条轨迹, 其中一条显示系统最后形成了复合核, 而另外一条则表明系统发生了准裂变。对某一个初始动量 p , 可以作 N 次同样的计算, 然后统计有 N' 次进入了熔合区域, 那么与该动量相对应的形成复合核的概率为 $F^J(p) = N'/N$ 。由于在弹靶到达接触点时, 体系能量已经耗散, 此时弹靶的相对动量呈高斯分布的形式:

$$g^J(p, \bar{p}^J, T^J) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu T}} \exp\left[-\frac{(p - \bar{p}^J)^2}{2\mu T^J}\right],$$

$$(-\infty < p < +\infty),$$

其中 \bar{p}^J 为在接触点时的平均径向动量。假设在接触点以前, 核子很难在弹和靶之间转移, 因此, 在接触点时 α 方向的初始动量为0。对每一径向动量 p , 都可以通过公式(5)得到与之相应的概率 $F^J(p)$, 然后对各种动量进行积分, 即可得形成概率:

$$P_{\text{form}}^J = \int_{-\infty}^{+\infty} F^J(p) g^J(p, \bar{p}^J, T^J) dp. \quad (6)$$

对于重核, 平均径向动量 \bar{p}^J 通常取为零。图3给出了 ^{48}Ca 轰击 ^{249}Bk 时的形成概率 P_{form} 。可见, 随着角动量的升高, 液滴能位垒越高, 形成概率越小。而角动量不变时, 入射能越高, 相应体系的激发能也越高, 在接触点的动量分布越宽和克服库仑位垒的概率越大, 从而形成概率随入射能的增加而上升。

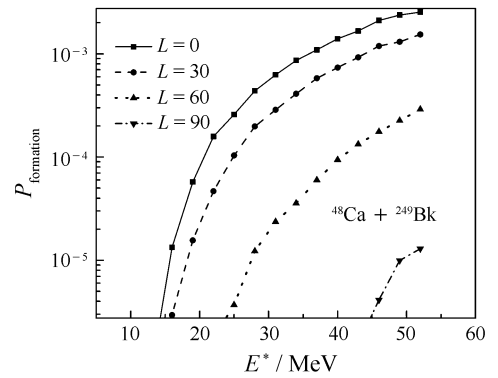


图3 $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ 在不同角动量和不同激发能时的形成概率

由公式(2), 我们可计算出由两步模型得到的熔合截面, 即:

$$\sigma_{\text{fusion}} = \pi\lambda^2 \sum_J (2J+1) P_{\text{fusion}}^J(E^*), \quad (7)$$

对于 $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$, 其结果如图4所示。

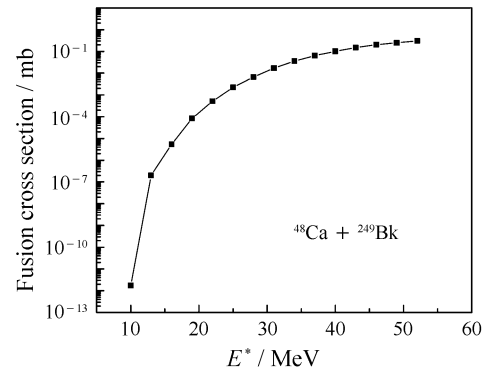


图4 $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ 核反应的熔合截面 σ_{fusion}

3 剩余截面及其讨论

弹核和靶核形成的复合核并不稳定, 它们或许通过蒸发粒子和发射 γ 射线冷却下来形成超重核, 或者蒸发0到数个中子后裂变掉。利用统计蒸发模型, 可以计算出蒸发几个中子后形成超重核的剩余截面。在统计蒸发模型中, 壳修正能量 E_{shell} 通过裂变位垒对剩余截面起着非常关键的影响。 E_{shell} 每增加1 MeV, 剩余截面就会增加一个数量级。然而不同模型预言的壳修正有较大差别, 在计算中我们采用了Möller等的计算结果^[14]。然而在文献[9]中, 如果在HIVAP计算中直接采用Möller的壳修正能量, 那么理论结果比实验值大很多。这说明Möller的壳修正能量比实际情况大。克服这一困难的方法之一, 就是将宏观-微观模型预言的壳修正

乘以一个因子, 再将计算结果与实验值比较, 从而确定这一因子。文献[9]给出的因子为1/3。在本文计算 $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ 时, 采用了相同的因子。利用HIVAP程序, 可以计算出蒸发数个中子后的剩余截面, 如图5所示。从图中可以看出, 蒸发2n和3n的剩余截面比较大。当 $E^* = 31 \text{ MeV}$, 即 $E_{\text{cm}} = 202 \text{ MeV}$ 时, 得到 $Z = 117 (^{294}117)$ 的截面最大, 为 0.34 pb 。文献[15]利用双核模型对 ^{48}Ca 引起的系列反应作了计算, 给出的 $^{48}\text{Ca} + ^{247}\text{Bk}$ 的最大截面在 1 pb 左右。在利用两步模型重复此反应的计算中得到的最大剩余截面为 0.2 pb , 与文献[15]的结果相差不到一个数量级。两步模型的计算结果表明, 在 $^{48}\text{Ca} + \text{Bk}$ 引起的系列反应中, $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ 生成 $Z = 117$ 元素的可能性最大, 所需弹核入射能量 $E_{\text{lab}} = 241 \text{ MeV}$ 。

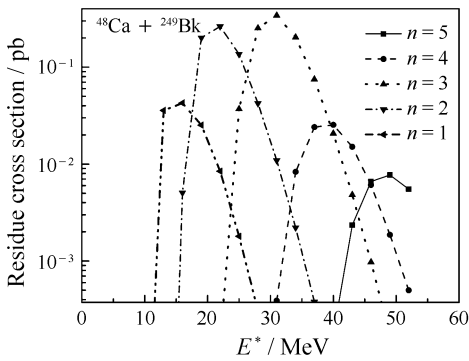


图5 $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ 复合核反应的蒸发0—5个中子的 σ_{res}

参考文献 (References):

[1] Nilsson S G, Nix J R, Sobiczewski A, *et al.* Nucl Phys,

1968, A115: 545; Nilsson S G, Tsang C F, Sobiczewski A, *et al.* Nucl Phys, 1969, A131: 1; Rutz K, Bender M, Burvenich T, *et al.* Phys Rev, 1997, C56: 283; Möller P, Nix R. J Phys, 1994, G20: 1681.

- [2] Weisskopf V. Phys Rev, 1937, 52: 295.
 [3] Li W, Wang N, Li J F, *et al.* Europhys Lett, 2003, 64: 750; Li W, Wang N, Jia F, *et al.* J Phys, 2006, G32: 1143.
 [4] Wang N, Wu X Z, Li Z X, *et al.* Phys Rev, 2006, C74: 044604; Wang N, Li Z X, Wu X Z, *et al.* Mod Phys Lett, 2005, A20: 2619.
 [5] Liu Z H, Bao J D. Phys Rev, 2006, C74: 057602.
 [6] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Phys Rev, 2006, C74: 044602; Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Phys Rev, 2004, C70: 064609; Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Phys Rev, 2004, C69: 021601.
 [7] Bjørnholm S, Swiatecki W J. Nucl Phys, 1982, A391: 471.
 [8] Gäggeler H, Sikkeland T, Wirth G. Z Phys, 1984, A316: 291.
 [9] Shen C W, Kosenko G, Abe Y. Phys Rev, 2002, C66: 061602.
 [10] Swiatecki W J, Siwek-Wilczynska K, Wilczynski J. Acta Phys Pol, 2003, B34: 2049.
 [11] Swiatecki W J, Siwek-Wilczynska K, Wilczynski J. Phys Rev, 2005, C71: 014602.
 [12] Wada T, Abe Y, Carjan N. Phys Rev Lett, 1993, 70: 3538; Abe Y, Ayik S, Reinhard P G, *et al.* Phys Rep, 1996, 275: 49.
 [13] Sato K, Yamagi S, Harada K, *et al.* Z Phys, 1979, A290: 149.
 [14] Moller P, Nix J R, Myers W D, *et al.* Atom Data Nucl Data Tabl, 1995, 59: 185.
 [15] Feng Z Q, Jin G M, Huang M H, *et al.* Chin Phys Lett, 2007, 24: 2551.

Possible Synthesis of $Z = 117$ through $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}^*$

ZHANG Qun-wu¹, SHEN Cai-wan^{1, #}, ZHAO En-guang²

(1 School of Science Huzhou Teachers College, Huzhou 313000, Zhejiang, China;

2 Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: A possible way to synthesize superheavy element ($Z = 117$) by using $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ reaction is studied with two step model. The fusion process is divided into two steps: the sticking process that the

* Received date: 11 July, 2008; Revised date: 26 Aug. 2008

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10675046); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Y605476); Research on Teaching Reformation of High Education of Zhejiang Province in New Century(YB08064)

Corresponding author: Shen Cai-wan, E-mail: cwshen@hutc.zj.cn

projectile approaches to the target to get contacted with the target by passing over the Coulomb barrier, and the formation process that the di-nuclear system evolves from contact into compound nuclear state. Combined with the statistical evaporation model, the formation cross section of $^{297}117$ is calculated. The result shows that the residue for 3 neutron evaporation is 0.34 pb at excitation energy $E^* = 31$ MeV, which is detectable in laboratory.

Key words: superheavy element; langevin equation; cross section