

核对称轴不同相对取向对熔合动力学的影响^{*}

贾 飞^{1)†} 徐珊珊¹⁾ 陈若富^{1)‡} 张宏斌¹⁾

Avazbek Nasirov³⁾ 李君清¹⁾ Scheid W.⁴⁾

1) 中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2) 中国科学院研究生院 北京 100049)

3) Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR, Dubna 141980, Russia)

4) Institute for Theoretical Physics of Justus-Liebig-University, Giessen 35392, Germany)

(2006 年 5 月 9 日收到 2006 年 6 月 12 日收到修改稿)

计算了核对称轴不同相对取向时的熔合位垒. 基于双核模型观念, 考虑了熔合与准裂变的竞争, 通过数值法求解主方程, 计算了⁷⁶Ge + ²⁰⁸Pb, ⁴⁸Ca + ²⁴⁴Pu 核对称轴不同相对取向对熔合概率的影响, 探索了最有利于超重元素合成的弹靶相对取向. 取向不同时, 对熔合反应的影响较大, 计算结果表明弹靶碰撞为腰对腰时, 更有利于发生熔合反应.

关键词: 超重元素, 熔合概率, 变形核, 方向角度

PACC: 2570J

1. 引 言

超重元素的合成一直是核物理研究的一个热门话题. 当前描述超重核合成的主要的理论模型有宏观动力学模型^[1,2]、涨落-耗散模型^[3]、核子集体化模型^[4]以及双核系统模型^[5]等. 各种模型从不同的角度描述了重离子的熔合过程, 但是至今还没有一个非常可靠的理论模型来预言超重核的蒸发剩余截面. 实验方面, Hofmann 小组以²⁰⁸Pb, ²⁰⁹Bi 为靶通过冷熔合反应合成了一系列超重核, 但是蒸发剩余截面呈指数下降的趋势, 到 112 号元素时, 其反应截面小于 3 pb^[6]. 近来 Oganessian 等人完成了经热熔合反应合成 114 号和 116 号超重元素的实验^[7]. $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{292-x}\text{114} + x\text{n}$, $^{48}\text{Ca} + ^{245}\text{Cm} \rightarrow ^{293-x}\text{116} + x\text{n}$. 以冷熔合反应合成的超重复合核激发能比较低, 而这种由热熔合反应生成的超重复合核则激发能比较高, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{288}\text{114} + 4\text{n}$ 该反应合成的超重复合核在激发能为 40 MeV 时蒸发剩余截面大约为 6 pb. 这是不是意味着存在其他反应机制使得入射炮弹能量较大时合成超重元素的反应截面更大呢?

众所周知, 原子核是有形变的. 当弹靶相对取向不同时, 熔合位垒也不相同^[8]. 极对极时, 熔合位垒较低, 腰对腰时, 位垒较高. 如果入射束流的能量足够大, 核对称轴各种相对取向的弹靶都有可能越过位垒而发生熔合与准裂变反应. 考虑了熔合与准裂变的竞争, 通过数值法求解主方程, 本文主要研究了核对称轴不同相对取向对熔合与准裂变反应的影响, 探索了最有利于超重元素合成的弹靶相对取向.

2. 理论模型

2.1. 主方程

Adamian 等^[5,9-11]在双核模型基础上研究了超重元素合成时熔合与裂变的竞争, 得到了与实验比较符合的结果. 其蒸发剩余截面可以写为

$$\sigma_{\text{ER}}(E_{\text{CM}}) = \sum_{J=0}^{J=J_f} \sigma_c(E_{\text{CM}}, J) P_{\text{CN}}(E_{\text{CM}}, J) \times W_{\text{sur}}(E_{\text{CM}}, J), \quad (1)$$

其中 σ_c 为碰撞核以穿透概率 $T(E_{\text{CM}}, J)$ 越过入射

^{*} 中国科学院“百人计划”基金、中国科学院知识创新工程重点方向性项目(批准号:KJXC2-SW-N02, KJXC2-SW-N07)和国家自然科学基金(批准号:30505016, 10235020, 10235023)资助的课题.

[†] E-mail: jiafei@impcas.ac.cn

道位垒(库仑位垒)而形成双核系统的俘获截面

$$\sigma_{\text{c}}(E_{\text{CM}}, J) = \pi \lambda^2 (2J + 1) T(E_{\text{CM}}, J), \quad (2)$$

$$T(E_{\text{CM}}, J) = \frac{1}{1 + \exp\left\{\frac{2\pi}{\hbar \omega_{\text{B}}(J)} \left[B + \frac{J(J+1)\hbar^2}{2\mu R_{\text{B}}^2(J)} - E_{\text{CM}} \right]\right\}}, \quad (3)$$

ω_{B} 为在库仑位垒处的曲率刚度^[12], 我们对该曲率刚度进行了谐振子形式的拟合, 则 ω_{B} 为相对应的谐振子频率. B 为库仑位垒, R_{B} 为位垒所处的位置. $P_{\text{CN}}(E_{\text{CM}}, J)$ 为入射能为 E_{CM} 时, J 分波的双核系统演化为一个超重复合核的概率. $W_{\text{sur}}(E_{\text{CM}}, J)$ 为入射能为 E_{CM} 时, J 分波的超重复合核通过蒸发中子退激而存活下来的概率. 双核系统两核间可进行核子、角动量、能量等的转移和交换. 如果反应中始终保持两体过程, 设在 t 时刻, 碎片 1 的质量数为 A_1 和激发能为 E_1 的分布概率为 $P(A_1, E_1, t)$, 其满足主方程^[13-18]:

$$\begin{aligned} \frac{dP(A_1, E_1, t)}{dt} = & \sum_{A'_1} W_{A_1 A'_1} [d_{A'_1} P(A'_1, E'_1, t) \\ & - d_{A_1} P(A_1, E_1, t)] \\ & - \Lambda_{A_1, E_1}^{qf}(\Theta) P(A_1, E_1, t) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $W_{A_1 A'_1}$ 表示碎片 1 的质量数为 A_1 , 内部激发能为 E_1 时 (A_1, E_1) 态向 (A'_1, E'_1) 态跃迁的概率. d_{A_1} 表示碎片在 (A_1, E_1) 宏观状态时包含的微观状态的维度. 求和对碎片 1 所能取的所有状态进行. 这里内部激发能 E_1 作为参数, 由入射道相对运动提供.

在相互作用核中核子的运动由下面的单粒子哈密顿量描述:

$$H(t) = H_0(t) + V(t), \quad (5)$$

$$H_0(t) = \sum_K \sum_V \varepsilon_{VK}(t) a_{VK}^+(t) a_{VK}(t),$$

$$\begin{aligned} V(t) = & \sum_{K, K'} \sum_{a_K, a_{K'}} u_{a_K, a_{K'}}(t) a_{a_K}^+(t) a_{a_{K'}}(t) \\ = & \sum_{K, K'} V_{k, k'}(T), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} u_{a_K, a_{K'}}(t) = & U_{KK'} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{a_K}(t) - \varepsilon_{a_{K'}}(t)}{\Delta_{kk'}} \right)^2 \right] \right. \\ & \left. - \delta_{a_K, a_{K'}} \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

$\varepsilon_{VK}(t)$ ($K=1, 2$) 表示碎片 K 的单粒子能级.

随着时间的演化双核间有核子的转移, 即系统

质量不对称度 $\eta = (A_1 - A_2)/(A_1 + A_2)$ 发生变化. 当 $\eta < \eta_{\text{BC}}$ 时就认为发生了熔合反应, η_{BC} 为双核系统势能面上最高点对应的质量不对称度. 因此熔合概率定义为 $\eta < \eta_{\text{BC}}$ 的所有分布概率的总和:

$$P_{\text{CN}}(E_{\text{CM}}, J) = \int_0^{A_{\text{BG}}} P(A_1, E_{\text{CM}}(J), \tau_{\text{int}}) dA_1 \quad (8)$$

其中相互作用时间 τ_{int} 由经典的参数化的偏转函数法得到^[19, 20].

2.2. 局域激发能及反应系统驱动力

双核系统的总能量随着双核系统质量不对称度 η 的变化而改变. 设 $U(A_1, A_2, R, J)$ 是双核系统中碎片 1 的核子数为 A_1 时双核系统的总能量, 则 $U(A_1, A_2, R, J)$ 随着 A_1 的变化曲线给出了核子转移驱动力, 即

$$\begin{aligned} U(A_1, A_2, R, J) = & U_{\text{LD}}(A_1) + U_{\text{LD}}(A_2) + V(R, J) \\ & - [U_{\text{LD}}(A_{\text{tot}}) - V_{\text{rot}}(J)], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V(R, J) = & U_{\text{C}}(R) + U_{\text{N}}(R) \\ & + V_{\text{rot}}(R, J), \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $A_{\text{tot}} = A_1 + A_2$.

(9) 式中 $U_{\text{LD}}(A_1)$, $U_{\text{LD}}(A_2)$ 和 $U_{\text{LD}}(A_{\text{tot}})$ 分别为双核系统中原子核 1, 原子核 2 和复合核的结合能, 来自文献 [21, 22], 因而包括了壳修正和奇偶效应. U_{C} 和 U_{N} 分别为两核的库仑相互作用能和核相互作用能, V_{rot} 为复合系统转动能. 库仑相互作用由下式给出^[23]:

$$U_{\text{C}}(R) = \rho_1^0 \rho_2^0 \iint \frac{dr_1 dr_2}{|r_1 - r_2 - R|}, \quad (11)$$

其中 ρ_1^0 , ρ_2^0 分别为两核的电荷密度, R 为两核质心间的距离, 原子核的四极形变参数来自文献 [22]. 核相互作用势 U_{N} 可以写为

$$\begin{aligned} U_{\text{N}}(R) = & C_0 \left\{ \frac{F_{\text{in}} - F_{\text{ex}}}{\rho_{00}} \left[\int \rho_1^2(r) \rho_2(r - R) dr \right. \right. \\ & \left. \left. + \int \rho_1(r) \rho_2^2(r - R) dr \right] \right\} \end{aligned}$$

$$+ \int \rho_1(r) \rho_2(r - R) dr \}. \quad (12)$$

其中 $F_{in,ex} = f_{in,ex} + f'_{in,ex} \frac{N_1 - Z_1}{A_1} \frac{N_2 - Z_2}{A_2}$, 式中采用零程 $\delta(r_1 - r_2)$ 有效相互作用, $N_{1,2}$ 和 $Z_{1,2}$ 分别是两核的中子数与质子数. 参数的选择为: $C_0 = 300 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^3$, $f_{in} = 0.09$, $f_{ex} = -2.59$, $f'_{in} = 0.42$, $f'_{ex} = 0.54$. ρ_1, ρ_2 采用 Woods-Saxon 密度分布函数, $\rho_{00} = 0.17 \text{ fm}^{-3}$, 表面弥散 a 取值范围为 $0.54\text{--}0.6 \text{ fm}$.

3. 结果与讨论

在重离子碰撞中, 弹核克服熔合位垒被靶核俘获而形成双核系统. $^{35}\text{Al} + ^{254}\text{Es}$ 该系统核对称轴不同相对取向时核核相互作用势 V_{CN} 随两核中心距离 R 的变化关系曲线如图 1, 可以看到, 极对极时, 熔合位垒最小, 也就是束流能量较低时就能越过位垒. 而腰对腰时熔合位垒较高, 如果束流能量大, 炮弹有足够的能量来克服熔合位垒, 也有可能发生熔合反应. 而且, 腰对腰时准裂变位垒也相应比较大, 这样可以抑制准裂变反应, 帮助熔合.

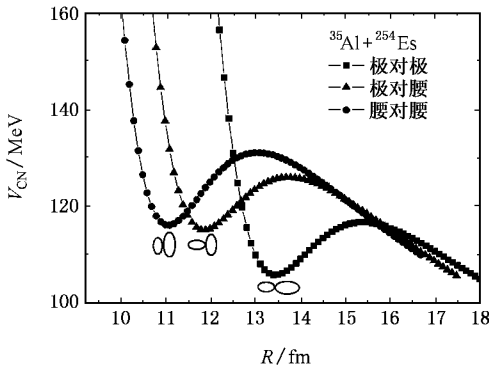


图 1 核核相互作用势随两核中心距离的变化关系

弹核被靶核俘获形成双核系统后, 双核之间可能有大量的核子交换. 核子的漂移速度正比于驱动势, 从而驱动势影响核子的转移, 决定着熔合与准裂变的竞争. $^{76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$ 该系统驱动势 U 随质量不对称度 η 的变化关系如图 2, 箭头所示为入射道. ^{208}Pb 是双幻核, 所以在入射道极对极和极对腰时驱动势值相同. 而对于 $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 这个反应道, ^{48}Ca 是双幻核, 在入射道极对腰与腰对腰的驱动势值相同. 核对称轴相对取向不同时, 势能面有很大的差别, 内部

熔合位垒^[17, 24] (入射点驱动势值与驱动势最高点值之差) 也不一样, 如表 1. 而且当系统向质量对称方向演化时, 驱动势的差别更大, 腰对腰的驱动势值远高于极对极的情况, 因而也更有利于发生熔合反应.

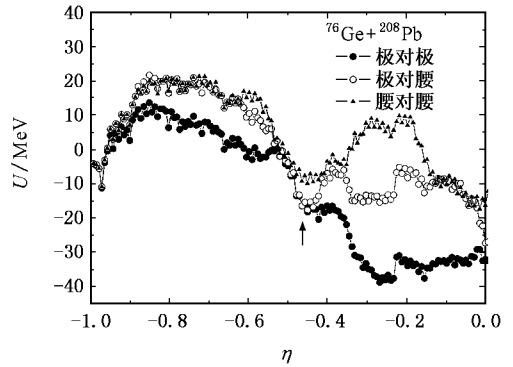


图 2 反应系统驱动势

表 1 质量不对称度 η 与核对称轴不同相对取向时的内部熔合位垒 B_{fus}

反应道	η	极对极 B_{fus}/MeV	极对腰 B_{fus}/MeV	腰对腰 B_{fus}/MeV
$^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$	-0.67	13.76	8.26	8.01
$^{76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$	-0.46	30.12	38.14	30.58

图 3 给出了 $^{76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 这两个反应系统在核对称轴不同相对取向时熔合概率 P_{CN} 对入射能量 E_{cm} 的依赖关系, 图中只显示了角动量 $J = 0\hbar$ 的情况. 整体上, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 的熔合概率要比 $^{76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$ 大 5 个数量级, 这主要是由质量不对称度 η 的不同造成的, 见表 1. 质量不对称度大, 发生熔合反应形成复合核时核子转移所经过的路径就短, 从而有利于复合核的形成. 然而, 即使同一反应系统,

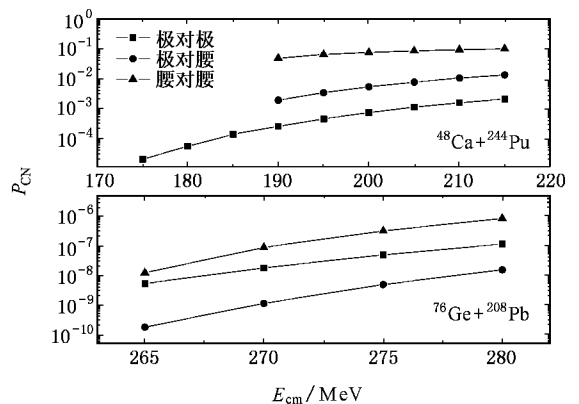


图 3 熔合概率 P_{CN} 对入射能量 E_{cm} 的依赖关系图

核对称轴相对取向不同时,熔合概率 P_{CN} 也有数量级上的差别,这是与内部熔合位垒以及准裂变位垒相关的.对于 $^{76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$ 该系统,极对腰时的内部熔合位垒远大于极对极和腰对腰时的情况,因而其熔合概率 P_{CN} 最小.极对极与腰对腰的内部熔合位垒相当,但是驱动势的形状不同,准裂变位垒也不一样,所以熔合概率差别也较大.而 $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 这个反应道,弹靶相对取向为腰对腰时,熔合概率比极对腰时大 8 倍,而极对腰时又比极对极时大 7 倍.这表明腰对腰的碰撞更有利于发生熔合反应,这与 Hinde 等人的实验结果是一致的^[25, 26].

4. 结 论

由于准裂变反应,双核系统会发生衰变,此衰变速率与用微观方法计算的双核间核子跃迁几率一起决定系统质量分布概率随时间演化过程的主方程.不必对驱动势作任何近似,我们用数值法求解主方程,计算了 $^{76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ 这两个反应系统在核对称轴相对取向不同时的熔合概率,结果表明腰对腰的碰撞更有利于发生熔合反应,这些研究有助于对超重元素合成机制的进一步理解.

- [1] Blochi J L, Feldmeier H, Swiatecki W J 1986 *Nucl. Phys. A* **459** 145
- [2] Bjornholm S, Swiatecki W J 1982 *Nucl. Phys. A* **391** 471
- [3] Aritomo Y, Wada T, Ohta M, Abe Y 1999 *Phys. Rev. C* **59** 796
- [4] Zagrebaev V I 2001 *Phys. Rev. C* **64** 034606
- [5] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W 1998 *Nucl. Phys. A* **633** 409
- [6] Hofmann S, Munzenberg G 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 733
- [7] Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V *et al* 2004 *Phys. Rev. C* **59** 054607
- [8] Nasirov A, Fukushima A, Toyoshima Y *et al* 2005 *Nucl. Phys. A* **759** 342
- [9] Antonenko N V, Cherepanov E A, Nasirov A K, Permjakov B V, Volkov V V 1993 *Phys. Lett. B* **319** 425; 1995 *Phys. Rev. C* **51** 2635
Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W 1997 *Nucl. Phys. A* **618** 176
- [10] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W, Volkov V V 2000 *Nucl. Phys. A* **678** 24
- [11] Jolos R V, Nasirov A K, Muminov A I 1999 *Eur. Phys. J. A* **4** 245
- [12] Adamian G G, Anonenko N V, Jolos R V 1995 *Nucl. Phys. A* **584** 205
- [13] Weidenmuller H A 1980 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **3** 49
- [14] Ayik S, Schuermann B, Noerenberg W 1976 *Z. Phys. A* **277** 299
- [15] Ayik S, Schuermann B, Noerenberg W 1976 *Z. Phys. A* **279** 145
- [16] Schuermann B, Noerenberg W, Simbel M 1978 *Z. Phys. A* **286** 263
- [17] Li W, Wang N, Li J *et al* 2003 *Europhys. Lett.* **64** 750
- [18] Grange P, Li J Q, Weidenmuller H A 1983 *Phys. Rev. C* **27** 2063
Grange P 1995 *Nucl. Phys. A* **584** 205
- [19] Wolschin G, Noerenberg W 1978 *Z. Phys. A* **284** 209
- [20] Li J Q, Tang X T, Wolschin G 1981 *Phys. Lett. B* **105** 107
Li J Q, Wolschin G 1983 *Phys. Rev. C* **27** 590
- [21] Audi G, Wapstra A H 1995 *Nucl. Phys. A* **595** 409
- [22] Moller P, Nix J R, Myers W D, Swiatecki W J 1995 *At. Data and Nucl. Data Tables* **59** 185
- [23] Li Q F, Zuo W, Li W F *et al* 2005 *Eur. Phys. J. A* **24** 223
- [24] Li J F, Xu H S, Li W F *et al* 2003 *Nucl. Phys. Rev.* **20** 160 (in Chinese) [李剑峰、徐瑚珊、李文飞等 2003 原子核物理评论 **20** 160]
- [25] Hinde D J, Dasgupta M, Leigh J R *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 1295
- [26] Hinde D J, Dasgupta M, Leigh J R *et al* 1996 *Phys. Rev. C* **53** 1290

The influence of nuclear orientation in fusion dynamics^{*}

Jia Fei^{1,2)†} Xu Hu-Shan¹⁾ Chen Ruo-Fu^{1,2)} Zhang Hong-Bin¹⁾

Avazbek Nasirov³⁾ Li Jun-Qing¹⁾ Scheid W.⁴⁾

1) *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

2) *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

3) *Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR, Dubna 141980, Russia*

4) *Institute for Theoretical Physics of Justus-Liebig-University, Giessen 35392, Germany*

(Received 9 May 2006 ; revised manuscript received 12 June 2006)

Abstract

Fusion barriers have been calculated for different orientations of the axial symmetry axis of deformed projectile-and target-nucleus. Using the concept of dinuclear system, considering the strong competition between fusion and quasifission processes, by solving the master equation numerically to calculate the fusion probability of superheavy nuclei, we have estimated the dependence of the fusion probabilities for $^{76}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$ and $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ on the orientation angles of the symmetry axis of projectile-and target-nucleus, which shows that belly-belly is the most favorable orientation for synthesizing superheavy nuclei.

Keywords : superheavy nuclei, fusion probability, deformed nucleus, orientation angles

PACC : 2570J

^{*} Project supported by One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences, Knowledge Innovation Project of CAS (Grant Nos. KJ CX2-SW-N02, KJ CX2-SW-N07) and National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10505016, 10235020, 10235023).

[†] E-mail : jiafei@impcas.ac.cn