

文章编号: 1007-4627(2005)04-0315-08

## 重离子熔合反应与双核模型\*

赵恩广<sup>1, 2, 4</sup>, 李君清<sup>1, 2</sup>, W. Scheid<sup>3</sup>

(1 中国科学院理论物理研究所, 北京 100080;

2 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;

3 Institute for Theoretical Physics of Justus-Liebig University, Giessen 35392, Germany;

4 北京大学物理学院, 北京 100871)

**摘要:** 简单介绍了兰州-北京-吉森合作组对合成超重核的重离子反应进行的初步研究。研究的重点是熔合阶段的反应机制。在原有双核模型的基础上做了一些改进, 把耗散相对运动过程与核子转移过程耦合起来, 从更微观的角度来描写双核系统向全熔合复合核的演化。在双核过程中的每一步求解主方程, 不对驱动势做谐振子近似。同时, 还探讨了原子核形变与相对取向对驱动势的影响, 存活几率与复合核蒸发中子的奇偶效应, 以及入射道中原子核非弹性激发对俘获截面的影响等。

**关键词:** 重离子熔合反应; 超重元素; 主方程; 准裂变; 复合核衰变

**中图分类号:** O571.6      **文献标识码:** A

### 1 引言

从 20 世纪 60 年代起, 超重元素的合成就一直 是核物理的重大前沿领域之一, 同时, 它也是当代自然科学中的基本问题之一。近年来, 有关的实验和理论研究变得更加活跃。我国的实验和理论工作者也进行了大量富有成效的努力, 取得很多重要进展。本文将着重介绍近几年我们合作组在超重熔合反应方面的一些进展。

工作基本上是在所谓的双核模型的概念基础上进行的。实际上, 当前国际流行的有关超重合成反应的理论模型很多。按俄罗斯学者 V. V. Volkov 在 2002 年的一次国际会议的报告所说, 主要的模型有 4 个<sup>[1]</sup>。在 2004 年的一篇综述文章里, 又扩充为 8 个<sup>[2]</sup>。由于篇幅所限, 这里仍然按前 1 篇的 4 个模型做介绍。

#### (1) 宏观动力学模型<sup>[3]</sup>

这个模型能完整地、定性地描写两个原子核从接近到完全熔合为复合核的全过程。它做了两个重要简化: 1) 把碰撞过程的两个原子核都用粘滞液滴

描写; 2) 用纯动力学的观点处理两核的熔合过程。这样, 它实际上忽略了原子核的壳效应以及反应过程的统计性质。因此, 这个模型的定量结果与实验偏离很大。

#### (2) 涨落-耗散模型<sup>[4]</sup>

此模型在宏观动力学模型基础上做了两点改进。首先, 在计算原子核体系的位能时, 把壳效应考虑进来; 其次, 把统计涨落引入到碰撞核的相互作用过程中。这个模型已经能较好地给出很多现有熔合反应的实验蒸发剩余截面、裂变和准裂变产物的质量分布等。但是, 对于质量比较对称的弹-靶组合, 却给出过大的蒸发剩余截面。

#### (3) 共有核子模型<sup>[5]</sup>

在这个模型中, 弹-靶接触后, 有一些核子逐渐从两核中逸出, 被两个原子核共有。随着共有核子的增多, 弹-靶的区别逐渐消失, 最后, 导致复合核的形成。此模型由 Zagrebaev 提出, 已经发表了多篇论文, 计算了很多生成重核和超重核的冷熔合与

收稿日期: 2005 - 10 - 19

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10235020, 10505016, 10435010); 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJ9XZ-SW-N01); 973 国家重点研究发展规划资助项目(G2000077400); 科技部基础研究重大项目前期研究专项基金资助项目; 德国 DFG 基金资助项目

作者简介: 赵恩广(1940-), 男(汉族), 辽宁人, 研究员, 从事超重核合成途径和极端条件下核结构研究;  
E-mail: egzhao@itp.ac.cn

热熔合反应的截面, 结果与实验符合较好。但是, Volkov 认为这个模型的物理观念与实际核过程不相容<sup>[2]</sup>。

#### (4) 双核(DNS)模型<sup>[6-8]</sup>

此模型认为, 原子核间的全融合过程与深度非弹转移反应是相似的过程, 同样是保守的耗散力在发挥作用。在俘获阶段结束后, 相对径向动能全部耗散, 转移为两核的内部激发能, 两核接触在一起, 形成了一个所谓的双核系统。随后, 弹-靶间的核子转移开始发生。转移的结果可以是复合核的形成, 也可以是两核再度分开, 即导致准裂变。

双核模型强调, 在核子转移过程中, 接触的两个原子核仍然保持各自的原子核特性, 在向复合核演化的过程中, 没有“脖子”的形成。对这一假定当然有争议。双核模型组的人也做了不少工作, 力图说明当两核接触后, 由于 Pauli 原理的限制, 脖子自由度很难发展, 而核子转移更容易进行<sup>[9]</sup>。

双核模型成功地从物理上揭示了以下两点: (1) 揭示了内融合垒的存在; (2) 自然地引入了全融合与准裂变。这两个道间的竞争, 是 DNS 演化的统计性质所决定的。在具体应用中, 取得了如下主要进展: 1) 较好地给出了通过冷融合与热熔合生成近超重和超重元素的产生截面; 2) 较好地给出了  $Z = 102 - 114$  元素在冷融合中的最佳激发能; 3) 很好地解释了对称反应产生截面的大幅度下降; 4) 较好地解释了热熔合中准裂变碎片质量分布中的壳效应。

在上述模型中, 双核模型是最成功, 并且也是影响最大的一个。我们现以它为基础来研究超重融合反应。不过, 一般认为融合反应的研究有两大难点。其一, 是过程的封闭性。由于复合核形成与衰变的独立假设基本成立, 复合核会“忘记”其形成过程。其二, 两个多核子系统的重新构建是一个很复杂的过程。

但是, Volkov 指出, 由于深度非弹转移反应(DITR)也是相对动能全部耗散后两核间发生的过程, 但不是封闭过程。这样, 可以借助 DITR 来获取一些全融合反应的信息。恰好, 我们在 DITR 方面已做过很多工作。因此, 我们自然也就把 DITR 中的一些做法与双核模型结合起来对超重融合反应进行研究。同时, 我们也开展了有关超重核性质的研究工作<sup>[10-12]</sup>。这里仅简要介绍我们在超重融合

反应方面的一些成果。

在 Volkov 的报告和综述文章中, 基本没有提及我国学者的理论工作。实际上, 近年来我国学者也做了大量有关超重核反应的工作, 如李祝霞组、马中玉组、沈彩万组、张丰收组、孟杰组、许甫荣组和任中洲组等。这里, 就不加以评述了。

## 2 双核模型的基本框架及改进

### 2.1 蒸发剩余截面

合成超重核的蒸发剩余截面, 一般写为<sup>[13]</sup>

$$\sigma_{\text{ER}}(E_{\text{cm}}) = \sum_{J=0}^{J=J_l} \sigma_c(E_{\text{cm}}, J) \cdot P_{\text{CN}}(E_{\text{cm}}, J) W_{\text{sur}}(E_{\text{cm}}, J), \quad (1)$$

其中,  $\sigma_c$  是俘获截面, 它可以表示为

$$\sigma_c(E_{\text{cm}}, J) = \pi \lambda^2 (2J + 1) T(E_{\text{cm}}, J), \quad (2)$$

式中,  $T(E_{\text{cm}}, J)$  是位垒贯穿系数,  $P_{\text{CN}}$  是形成复合核的几率,  $W_{\text{sur}}$  是复合核的存活几率。在(1)式中已经做了无 Coriolis 力的假定<sup>[14]</sup>, 即把分波值近似为复合核的总自旋。当弹靶的自旋皆为零时, 这是对的。

对于弹靶不很重时, 近垒的俘获截面就等于复合核的生成截面。垒下的俘获截面, 由于弹和靶的非弹性内禀激发及核子转移, 比简单的位垒贯穿计算有几个数量级的增强<sup>[15]</sup>。但是, 在生成超重核的融合反应中, 并不对俘获截面做认真计算, 而是把位垒贯穿系数取为一个小于 1 的常数。在双核模型中, 取  $T(E_{\text{cm}}, J) = 0.5$ 。这是因为在合成超重的反应中, 入射能量大都高于库仑位垒。

目前, 各种模型的主要差别就在于  $P_{\text{CN}}$  的计算。它的实质是对弹靶接触后向复合核演化的不同理解。在双核模型中, 弹靶接触时相对径向动能已经全部耗散到两核的内禀态中, 使两核均处于激发态。就是这些内禀激发能引起两核之间的核子转移。双核模型强调, 在核子转移过程中, 接触的两个原子核仍然保持各自的原子核特性。在以下的讨论中, 我们遵循这一假定。

### 2.2 核子转移几率的计算

这里, 我们的做法与双核模型有差别。双核模型里, 相对径向动能全部耗散到两核的内禀态后才

发生核子转移。我们则把耗散过程与核子转移过程耦合在一起。在相互作用的原子核中，核子的运动由下面的单粒子哈密顿量描述<sup>[16, 17]</sup>：

$$H(t) = H_0(t) + V(t), \quad (3)$$

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

单粒子态是定义在两核各自的移动中心系里，在重叠区的单粒子态，互相正交。在(3)式中的  $V(t)$  引起核子在两核间的转移，它表示为

$$\begin{aligned} V(t) &= \sum_{K, K'} \sum_{\alpha_K \beta_{K'}} u_{\alpha_K \beta_{K'}}(t) a_{\alpha_K}^+(t) a_{\beta_{K'}}(t) \\ &= \sum_{K, K'} V_{K, K'}(T), \end{aligned} \quad (4)$$

引起粒子跃迁的相互作用矩阵元取如下的参数化形式，

$$u_{\alpha_K \beta_{K'}}(t) = U_{KK'} \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_{\alpha_K}(t) - \epsilon_{\beta_{K'}}(t)}{\Delta_{KK'}} \right)^2 \right] - \delta_{\alpha_K \beta_{K'}} \right\}, \quad (5)$$

时间  $t$  由反应系统碰撞核的相对运动确定， $\epsilon_{VK}(t)$  ( $K=1, 2$ ) 表示碎片  $K$  的单粒子能级。能参与转移的核子是在价空间内。价空间的大小，由两核的局域激发能决定。反应系统的局域激发能可表示为

$$\epsilon^* = E^* - U(A_1) - \frac{(l-M)^2}{2J_{rel}} - \frac{M^2}{2J_{int}}, \quad (6)$$

式中， $E^*$  是转移到内禀态的激发能， $l$  和  $J_{rel}$  分别为系统相对运动角动量和转动惯量， $J_{int}$  为系统内禀转动惯量， $M$  表示相对运动角动量耗散所提供的内禀自旋，与相互作用时间一起，都可以由经典的参数化的偏转函数方法得到<sup>[18, 19]</sup>。 $U(A_1)$  是当碎片 1 的核子数为  $A_1$  时，双核系统的能量随着核子交换双核系统构成的改变而变化，称为核子转移驱动势：

$$\begin{aligned} U(A_1) &= U_{LD}(A_1) + U_{LD}(A_2) - \\ &U_{LD}(A) + U_C(A_1) + U_N(A_1), \end{aligned} \quad (7)$$

其中， $U_{LD}(A)$  是核子数为  $A$  的原子核的基态能，并包括了壳修正和奇偶修正。 $U_C$  为库仑相互作用能， $U_N$  为相接触的两碎片之间的核相互作用能。在下一节将更仔细地讨论驱动势。最后，可以得到转移一个核子的跃迁几率为

$$W_{A_1 A_1'} = W_{A_1' A_1} = \frac{\tau_{mem}(A_1, E_1, A_1', E_1'; t)}{\hbar^2 d_{A_1} d_{A_1'}} \cdot \sum_{i'} |\langle A_1', E_1', i' | V | A_1, E_1, i \rangle|^2, \quad (8)$$

$i$  表示所有其它量子数。其中  $\tau_{mem}$  是记忆时间，它由下式求得：

$$\begin{aligned} \tau_{mem}(A_1, E_1, A_1', E_1'; t) &= \\ &(2\pi)^{1/2} \hbar \{ \langle V^2(t) \rangle_{A_1, E_1} + \langle V^2(t) \rangle_{A_1', E_1'} \}^{-1/2}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中， $\langle \rangle_{A_1, E_1}$  表示对固定  $(A_1, E_1)$  宏观状态的平均期望值，是在费米面两侧对称分布的价空间  $\Delta\epsilon_K$  中进行：

$$\Delta\epsilon_K = \sqrt{\frac{4\epsilon_K^*}{g_K}}, \quad \epsilon_K^* = \epsilon^* \frac{A_K}{A}, \quad g_K = \frac{A_K}{12} \quad (10)$$

$\epsilon^*$  是(6)式中的系统局部激发能。在价空间的价态数目为  $N_K = \Delta\epsilon_K \cdot g_K$ ，其中有价核子  $m_K = N_K/2$  个。相互作用强度因子可以表示为

$$U_{KK} = \frac{g_1^{1/3} g_2^{1/3}}{g_1^{1/3} + g_2^{1/3}} \cdot \frac{1}{g_1^{1/3} g_2^{1/3}} \cdot 2\gamma_{KK'}. \quad (11)$$

### 2.3 关于驱动势的计算

在超重合成反应中，公式(7)表示的驱动势起到至关重要的作用。在双核模型中，它是质量不对称度  $\eta$  和两核质心距离  $R$  的函数。 $\eta = (A_1 - A_2)/(A_1 + A_2)$ ，其中，原子核  $A$  的基态能量  $U_{LD}(A)$  可以由液滴模型加壳修正和奇偶修正计算，也可以对已知核取实验值。核相互作用能  $U_N$  的计算有多种方式。对  $^{92}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$  反应，我们比较了由折叠势和亲近势算出的驱动势，结果给出在图 1 和图 2 中。我们发现，折叠势能给出与实验相符合的最佳激发能，而亲近势给出过高的最佳激发能<sup>[20]</sup>。

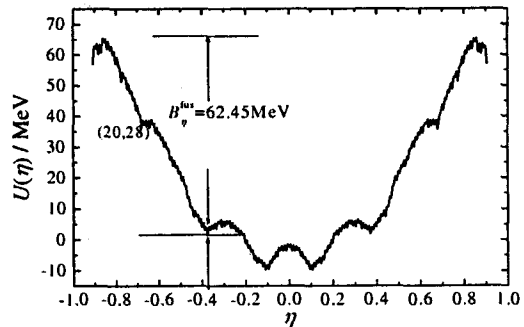


图 1 亲近势算出的驱动势

因为驱动势是  $R$  和  $\eta$  的函数，它的图示应当是三维的。但是，一般常用二维图表示，即把它表示

为固定  $R$  值下的  $\eta$  的函数。这个  $R$  值应使两核的

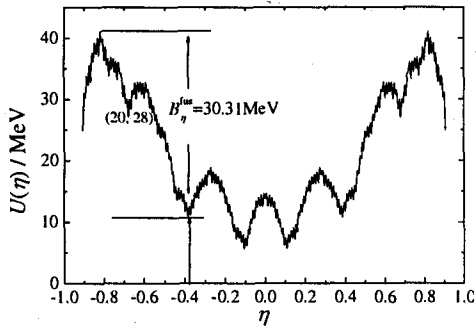


图 2 折叠势算出的驱动势

位能随  $R$  的变化取极小值。实际上，它很接近两核的接触点。图 3 示意性地给出了驱动势沿两核中心距离的变化趋势。图 4 则给出了驱动势随电荷不对称性的变化。图中的  $B_{qf}$  为准裂变位垒的高度， $B_{fus}$  是内熔合垒的高度。

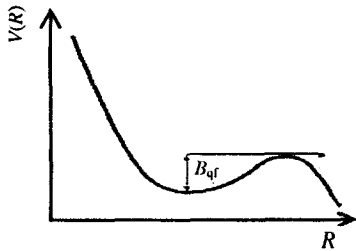


图 3 驱动势作为两核中心距离  $R$  的函数

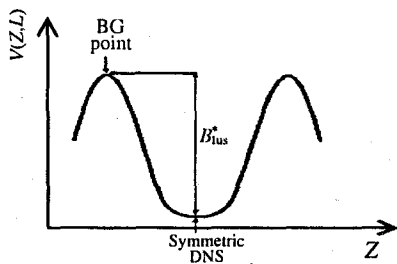


图 4 驱动势随电荷不对称性的变化

图 5 中给出了  $^{76, 82}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$  反应的驱动势的两维图。这里核相互作用位能取 Morse 形式<sup>[7]</sup>：

$$U_N(A_1, A_2) = D \left( \exp \left[ -2\alpha \frac{R - R_0}{R_0} \right] - 2 \exp \left[ -\alpha \frac{R - R_0}{R_0} \right] \right) \quad (12)$$

从图中可以看出，最佳激发能  $E_{cm}^*$  和最佳入射能  $E_{cm}$  应分别表示为

$$E_{cm}^* = U(\eta, Z_1, N_1) + B_{fus}^*,$$

$$E_{cm} = E_{cm}^* - Q, \quad (13)$$

$B_{fus}^*$  是最佳内熔合位垒，

$$Q = M(A_1) + M(A_2) - M(A). \quad (14)$$

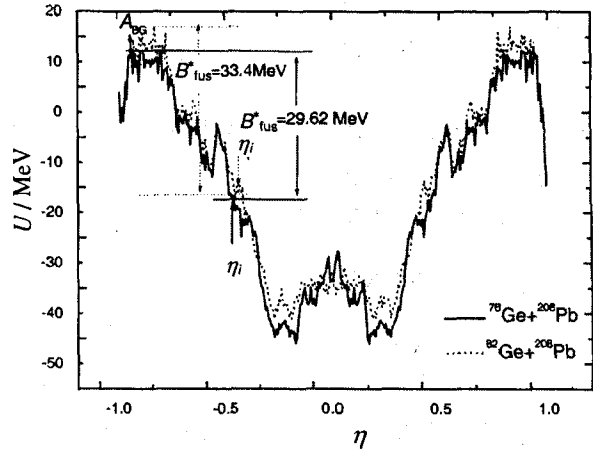


图 5  $^{76, 82}\text{Ge} + ^{208}\text{Pb}$  为人射道的驱动势的两维图

驱动势还与原子核的形状和相对取向有关。我们在弹核和靶核均为球形、其中一个为球形而另一个为变形和两个核均为变形的几种情况下，分别计算了相应的驱动势。在有形变时，还讨论了两核相对取向的变化对驱动势的影响<sup>[21, 22]</sup>。图 6 给出的是  $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$  的驱动势。图 7 中给出的是  $^{35}\text{Al} + ^{227}\text{Np}$  的驱动势。

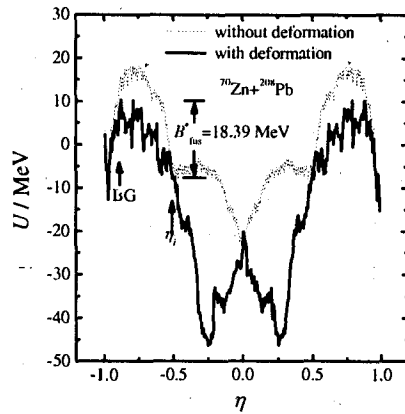


图 6  $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$  的驱动势

总地来讲，原子核的形变及其相对取向，对驱动势有明显的影响。形变可以使熔合位垒降低，从而使最佳入射能和最佳激发能降低。在长椭球形变时，头对头的取向可以使库仑位垒降低，腰对腰的取向使位垒升高。也就是说，头对头的取向有利于两核靠近，但其构形对向复合核演化不利。腰对腰的取向两核靠近难，但是，其构形有利于向复合核

演化。因此，不少人建议，利用变形核的腰对腰取向来合成超重核<sup>[23]</sup>。在 Volkov 的综述文章里，也给出形变影响的例子。当他们只考虑两核之一的形变时，计算的最佳激发能与实验值有明显偏离。当同时考虑弹与靶的形变时，理论值与实验结果十分靠近<sup>[2]</sup>。

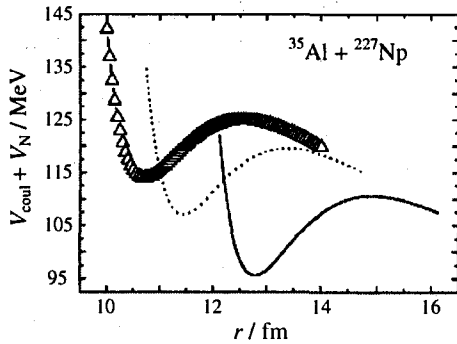


图 7 <sup>35</sup>Al + <sup>227</sup>Np 的驱动势  
— 头对头取向, Δ 腰对腰, ... 不考虑形变。

### 2.4 求解分布函数的主方程

按双核模型，核子转移是一个扩散过程。对于扩散过程，可以用主方程描写，也可以用 Fokker-Planck 方程描写。双核模型主要用 Fokker-Planck 方程描写核子转移过程，但是，为了得到分布函数的解析解，对驱动势做了谐振子近似。这就使得驱动势中所包括的很多核结构效应丢掉了。其次，Fokker-Planck 方程中包含了一些宏观参量，必须由宏观理论给出。针对双核模型的上述缺点，我们决定用主方程来求解分布函数。在求解时，严格按驱动势的每一点进行，不对它做谐振子近似。

按双核模型，反应中始终保持两体过程。这样，在  $t$  时刻，碎片 1 的质量数为  $A_1$  和激发能为  $E_1$  的分布几率为  $P(A_1, E_1, t)$ ，它满足如下的主方程：

$$\frac{dP(A_1, E_1, t)}{dt} = \sum_{A'_1} W_{A_1 A'_1} \cdot [d_{A_1} P(A'_1, E'_1, t) - d_{A'_1} P(A_1, E_1, t)] - \Delta_{A_1, E_1, t}^{qf}(\Theta) P(A_1, E_1, t), \quad (15)$$

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，向  $(A'_1, E'_1)$  态跃迁的几率。它由 (8) 式给出。由于它是从 (3) 式的微观哈密顿量计算的，因此，我们的做法比求解 Fokker-Planck 方程更微观。 $d_{A_1}$  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，由入射相对运动动能提供。而公式中的  $\Delta_{A_1, E_1, t}^{qf}(\Theta)$  描写双核系统在  $R$  处的衰变几率，即准裂变，它可以由一维 Kramers 公式导出<sup>[24]</sup>，

$$\Delta_{A_1, E_1, t}^{qf}(\Theta) = \frac{\omega}{2\pi\omega^{B_{qf}}} \left( \sqrt{\left(\frac{\Gamma}{2\hbar}\right)^2 + (\omega^{B_{qf}})^2} - \frac{\Gamma}{2\hbar} \right) \exp\left(-\frac{B_{qf}(A_1)}{\Theta(A_1, E_1, t)}\right). \quad (16)$$

在求解 (15) 式的主方程时，假定每次只转移一个核子。这样， $A'_1$  的求和范围也就确定了。主方程的边界条件是：

$$P(A_1, E_1, t) = 0, \quad \text{当 } A_t + A_p = A < A_1 < 0, \\ P(A_1, E_1, t = 0) = \delta_{A_1, A_p}. \quad (17)$$

核子转移结束的时间由偏转函数法确定<sup>[18, 19]</sup>。

### 2.5 熔合几率 $P_{CN}$

数值求解 (15) 式的主方程，就可以得到分布几率  $P(A_K, E_K, t)$ ，它表示在时刻  $t$  找到质量数为  $A_K$ 、能量为  $E_K$  的碎片  $K$  的几率。形成复合核的几率由下式给出<sup>[7]</sup>：

$$P_{CN} = \sum_J \int_{A_{BC}}^0 P(A_1, E_1(J), t(J)) dA_1, \quad (18)$$

它表明凡是在 BG 点以左的双核组态都会形成复合核。

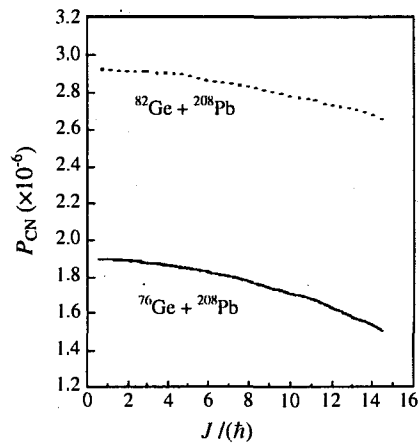


图 8 <sup>76, 82</sup>Ge + <sup>208</sup>Pb 的熔合几率

总地来讲，原始的双核模型不考虑相对动能向内部自由度的耗散过程，核子的转移是发生在耗散过程之后。在我们的做法中，耗散与核子转移是耦

合在一起的。但是，在两种做法中，都要求双核演化过程中每个原子核始终保持自己的基本特性。我们对由  $^{76, 82} \text{Ge} + ^{208} \text{Pb}$  生成 114 号元素的超重熔合几率做了计算，对它随弹核中子数的变化、与角动量及演化时间的关系做了比较仔细的讨论<sup>[25]</sup>。图 8 是计算的熔合几率，对这种弹靶组合，弹核中子数的增加可以使熔合几率增加。

### 3 关于复合核存活几率的计算

一般来讲，入射道的能量增高会使熔合几率增大；但是，复合核的激发能也随之增高，裂变几率也增高。如果入射能降低，熔合几率将减少；但是，复合核的激发能也降低，裂变几率会降低，因而，存活几率就增大。这样，热熔合与冷熔合各有利弊。GSI 的实验一直以冷熔合为主，Dubna 的实验则以热熔合为主。关于复合核的衰变一般用统计模型计算。这时，复合核的存活几率由下式表达<sup>[13, 26]</sup>：

$$W_{\text{sur}}(E_{\text{CN}}^*, J) = P_1(E_{\text{CN}}^*, J) \cdot \frac{\Gamma_n(E_{\text{CN}}^*, J)}{\Gamma_n(E_{\text{CN}}^*, J) + \Gamma_f(E_{\text{CN}}^*, J)}, \quad (19)$$

其中， $P_1(E_{\text{CN}}^*, J)$  是蒸发一个中子的实现几率； $\Gamma_n$  和  $\Gamma_f$  分别是发射中子宽度和裂变宽度。它们分别由以下两个表达式给出：

$$\Gamma_n(E^*) = \frac{1}{2\pi\rho(E^*)} \cdot \frac{2M_n R^2}{\hbar^2} g \cdot \int_0^{E^* - B_n - 1/a} \epsilon \rho(E^* - B_n - \epsilon) d\epsilon, \quad (20)$$

$$\Gamma_f(E^*) = \frac{1}{2\pi\rho(E^*)} \cdot \int_0^{E^* - B_f - 1/a} \rho(E^* - B_f - \epsilon) d\epsilon, \quad (21)$$

其中， $\rho(E)$  是能级密度，由下式表达：

$$\rho(E^*) = \frac{1}{\sqrt{48E^*}} \exp[2\sqrt{aE^*}]. \quad (22)$$

蒸发多个中子的存活几率的公式与(19)式相似，这里不再给出。(21)式的积分里面，一般还有一个势垒穿透系数。我们计算时，把它取为常数，这里就没有写出。 $B_f$  是裂变位垒，可以近似表达为

$$B_f = B_f^{\text{LD}} + B_f^{\text{Mic}}(E^* = 0) \exp\left[-\frac{E^*}{E_b}\right] - \left(\frac{\hbar^2}{2J_{g.s.}} - \frac{\hbar^2}{2J_{s.d.}}\right) J(J+1), \quad (23)$$

关于(23)式的写法可以参考文献[27]。但请注意，我们的壳修正因子与文献[27]略有不同。

以生成 114 号元素的不同同位素为例，我们对影响存活几率的一些因素做了一些初步的分析<sup>[28]</sup>。结果表明，存活几率随激发能的升高而上升到某一极大值后，反而下降。随蒸发中子数目的增加，存活几率也要下降。蒸发 1 个中子的存活几率比蒸发 4 个中子的要大 1 个数量级。在蒸发偶数个中子的退激模式中，母核的奇偶性对存活几率影响不大。但是，蒸发 3 个中子的退激模式中，母核的奇偶性有明显影响。一般来讲，奇中子母核给出的存活几率大。这可能与中子分离能的奇偶效应有关。这些结果可参看图 9。

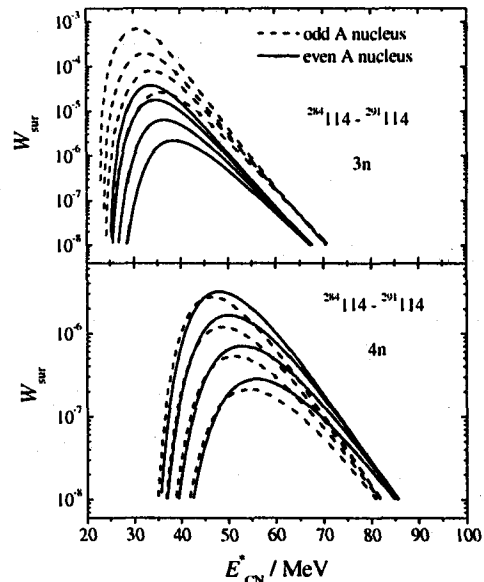


图 9 计算的存活几率的奇偶差

### 4 蒸发剩余截面

把(1)式中的 3 个因子都计算出来后，就可以得到蒸发剩余截面，也就是生成超重核的产生截

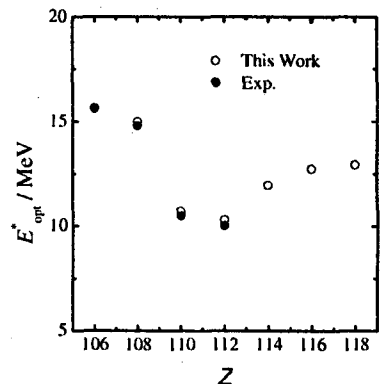


图 10 计算的最佳激发能与实验的比较

面。我们计算了从106号元素到118号元素的一些超重核的蒸发剩余截面, 结果给出在图10和图11中。从图中可以看出, 我们得到的最佳激发能较好地重现了已有的实验数据, 所得蒸发剩余截面基本上与现有的实验数据符合。但是, 对116号元素以后的结果, 各种模型有明显差别, 这将由未来的实验加以检验。

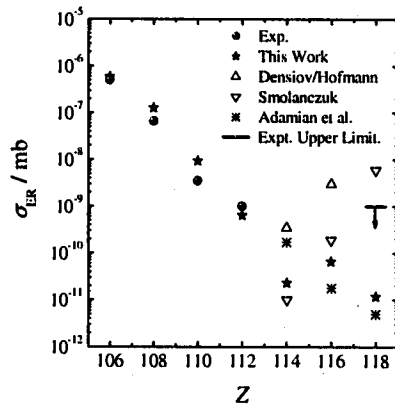


图11 以 $^{208}\text{Pb}$ 为靶合成超重的蒸发剩余截面的计算值与实验的比较

## 5 小结

近年来, 兰州-北京-吉森合作组对合成超重核的重离子反应进行了初步的探讨。研究的重点是熔合阶段的反应机制。在原有双核模型的基础上, 我们做了一些改进, 主要是把耗散过程与核子转移过程耦合起来, 从更微观的角度来描写双核系统向全熔合的复合核演化。在双核过程中的每一步, 求解主方程, 不对驱动势做谐振子近似。同时, 还探讨了原子核形变与相对取向对驱动势的影响, 存活几率与复合核蒸发中子的奇偶效应, 以及入射道里, 原子核非弹激发对俘获截面的影响等。总地来讲, 已经取得一些令人鼓舞的进展。但是也发现合成超重核的重离子反应是一个很复杂的过程, 里面有很多重要的物理因素, 需要我们费尽艰辛的去探索。

我们合作组的其他主要理论成员为左维、李文飞、王楠、李剑峰、贾飞、李庆峰、王宁、周善贵、张鸿飞和森山健太郎等。

## 参 考 文 献:

- [1] Volkov V V. Proceedings of the Symposium on Nuclear Clusters: From Light Exotic to Superheavy Nuclei. 2002, Germany. EP Systema Bt, Debrecen, Publisher Dembinszky, Budapest, Hungary. 2003, 372—381.
- [2] Volkov V V. Phys Part Nucl, 2004, **35**: 425.
- [3] Blocki J P, Feldmiev H, Swiatecki W J. Nucl Phys, 1986, **A459**, 145.
- [4] Aritomo Y, Wada T, Ohta M, *et al.* Phys Rev, 1999, **C59**: 796.
- [5] Zagrebaev V I. Phys Rev, 2002, **C65**: 044602.
- [6] Antonenko N V, Cherepanov E A, Nasinov A V, *et al.* Phys Rev, 1995, **C51**: 2 635.
- [7] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. Nucl Phys, 1997, **A618**: 176.
- [8] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. Phys Rev, 2003, **C68**: 034601.
- [9] Diaz-torres A, Antonenko N V, Scheid W. Nucl Phys, 1999, **A652**: 61; Diaz-torres A, Adamian G G, Antonenko N V, *et al.* Phys Lett, 2000, **B481**: 228.
- [10] Xu F R, Zhao E G, Wyss R, *et al.* Phys Rev Lett, 2004, **92**: 252501.
- [11] Li J Q, Ma Z Y, Chen B Q, *et al.* Phys Rev, 2002, **C65**: 064305.
- [12] Zhang H F, Li J Q, Zuo W, *et al.* Phys Rev, 2005, **C71**: 054312.
- [13] Adamian G G, Antonenko N V, Ivanova S P, *et al.* Phys Rev, 2000, **C62**: 064303.
- [14] Hagina K, Takigawa N, Balantenkin A B, *et al.* Phys Rev, 1995, **C52**: 286.
- [15] Mitsuoka S, Ikoze H, Nishio K, *et al.* Phys Rev, 2000, **C62**: 054603.
- [16] Noerenberg W. Phys Lett, 1974, **B53**: 289.
- [17] Schuermann B, Noerenberg W, Simbel M. Z Phys, 1978, **A286**: 263.
- [18] Wolschin G, Noerenberg W. Z Phys, 1978, **A284**: 209.
- [19] Li J Q, Wolschin G. Phys Rev, 1983, **C27**: 590.
- [20] 李剑峰, 徐珊珊, 李文飞等. 高能物理与核物理, 2003, **27**: 48.
- [21] Wang Nan, Zhao Enguang, Li Jianfeng, *et al.* Chin Phys Lett, 2003, **20**: 635.
- [22] Li Q F, Zuo W, Li W F, *et al.* Eur Phys J, 2005, **A24**: 223.
- [23] Iwamoto A, Moeller P, Nix J R, *et al.* Nucl Phys, 1996, **A596**: 329; Mitsuoka S, Ikoze H, Nishio K, *et al.* Phys Rev, 2002, **C65**: 054608.
- [24] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W. Phys Rev, 2003, **C68**: 034601.
- [25] Li W, Wang N, Li J F, *et al.* Eur Phys Lett, 2003, **64**: 750.
- [26] Zubov A S, Adamian G G, Antonenko N V, *et al.* Phys Rev,

2002, **C65**: 024308.

[28] Li Wenfei, Wang Zhenzhong, Xu Hushan, *et al.* Chin Phys

[27] Zagrebaev V I, Aritomo Y, Itkis M G, *et al.* Phys Rev,

Lett, 2004, **21**: 636.

2001, **C65**: 014607.

## Heavy Ion Fusion Reaction and Di-nuclear System Model\*

ZHAO En-guang<sup>1, 2, 4</sup>, LI Jun-qing<sup>1, 2</sup>, W. Scheid<sup>3</sup>

(1 *Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

2 *Center of Theoretical Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator  
of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;*

3 *Institute of Theoretical Physics of Justus-Liebig University, Giessen 35392, Germany;*

4 *School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** In recent years, the Lanzhou-Beijing-Giessen collaboration has studied the heavy ion reactions which are lead to the formation of super-heavy nuclei. The study emphasizes the mechanism of the fusion stage of the reactions. Based on the so called Di-nuclear System Model, some improvements have been made. The main points are the coupling of the dissipation of relative motion energy, angular momentum with nucleon transfer, and solving the Master equation in every step of the nucleon transfer with exact driving potentials, in order to describe the evolution of the system more microscopically. At the same time, we also discussed the effects of nuclear deformation and their relative orientation on the driving potentials, and studied the survive probability of the compound nuclei and its odd-even effects, as well as the influence of inelastic excitations of nuclei in entrance channels to the capture cross sections.

**Key words:** heavy ion fusion reaction; super-heavy element; Master equation; quasi-fission; decay of compound nuclei

---

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10235020, 10505016, 10435010); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCXZ-SW-No7); Major State Basic Research Development Program of China (G20000774)