

# 重离子熔合反应的相互作用势\*

胡济民 钟云霄

(北京大学技术物理系 北京 100871)

1995-11-07 收稿

## 摘 要

运用 Skyrme 势及快过程近似与绝热过程近似两种极限, 计算了几组重离子之间的相互作用势, 应用此相互作用势计算了熔合反应截面, 与实验结果进行了比较.

**关键词** 重离子熔合, 相互作用势, 截面.

## 1 引 言

在核结构研究中人们常常采用简单的等效势来描述核子间的相互作用, 其中, 零力程的 Skyrme 势的应用更为常见. 实际上, 只要适当调整参量, 这种等效势就可以相当准确地给出核的基态性质和壳层结构<sup>[1]</sup>. 作为一种等效势, 应该也能适用于核反应. 卓益忠<sup>[2]</sup>等人曾用 Skyrme 势计算过核子的光学势, 徐躬耦、李国强等人曾用 Skyrme 势计算过重离子之间的相互作用势<sup>[3]</sup>, 但是系统地应用这种等效势来研究低能核反应似乎还有待进一步的工作. 特别是当核物理研究正在转向远离  $\beta$  稳定线核素之际, 通常应用的唯象模型不一定仍能适用于这些新的领域. 因此, 广泛应用等效势, 以便使核反应研究具有更可靠的基础.

应用零力程的 Skyrme 势计算了几组重离子之间的相互作用势. 和过去的工作比较, 我们采用了较准确的核子密度分布, 考虑了变形对作用势的影响, 应用所得的作用势计算了熔合截面并与实验结果作了比较.

## 2 理论方法

为了初步的探讨, 将采用较简单的推广汤姆斯费米近似 (Extended Thomas Fermi Approximation 即 ETF). 根据这一近似, 并采用 Skyrme 势, 一个由质子和中子组成的体系的能量密度可写成为质子和中子密度  $\rho_n$  及  $\rho_p$  的泛函.

$$V(2R) = \int \{E_d(\rho_q, 2R) - E_d(\rho_{1q}) - E_d(\rho_{2q})\} dr, \quad (1)$$

\* 国家教委博士点基金资助.

其中 
$$E_d(\rho_q) = \frac{\hbar^2}{2m} [f_p \tau_p + f_n \tau_n] + s_p + s_n + V_C, \quad (2)$$

$$f_p = 1 + g_7 \rho_p + g_8 \rho_n, \quad (3)$$

$$f_p \tau_p = \frac{3}{5} (3\pi^2)^{2/3} f_p \rho_p^{5/3} + \frac{1}{36} \frac{f_p (\nabla \rho_p)^2}{\rho_p} - \frac{1}{3} \nabla f_p \cdot \nabla \rho_p - \frac{1}{12} f_p \rho_p \left( \frac{\nabla f_p}{f_p} \right)^2 - g_9 \frac{\rho_p}{f_p} (2\nabla \rho_p + \nabla \rho_n)^2, \quad (4)$$

$$s_p = g_1 \rho_p^2 + g_2 \rho_p \rho_n + g_3 \rho_p^2 \rho_n^2 + g_4 \rho_p \rho_n \rho_n^2 + g_5 (\nabla \rho_p)^2 + g_6 \nabla \rho_p \cdot \nabla \rho_n, \quad (5)$$

$$\rho = \rho_p + \rho_n \quad \alpha = 1/6.$$

$V_C$  为库仑能密度, 将 (3)、(4)、(5) 式中下标 p 与 n 对换, 就得到了相应的中子的量. 对于 SkM\* 势, 有:

$$g_1 = -601.7375, \quad g_2 = -1382.01, \quad g_3 = 649.79, \quad g_4 = 1299.58, \quad g_5 = 51.094,$$

$$g_6 = 85.312, \quad g_7 = 0.03014, \quad g_8 = 3.3142, \quad g_9 = 4.9129.$$

两核的质心距离为  $2R$ . 严格讲, 密度  $\rho_p$  与  $\rho_n$  会随两核的相对位置而变化, 这里取两种极限情况来计算. 第一种是快过程极限, 适用于入射粒子能量高出熔合位垒较多的情况, 这时可以认为在越过位垒时, 两核的密度基本不变, 即

$$\begin{aligned} \rho_p(\mathbf{r}) &= \rho_{1p}(\mathbf{r}) + \rho_{2p}(\mathbf{r} - 2\mathbf{R}), \\ \rho_n(\mathbf{r}) &= \rho_{1n}(\mathbf{r}) + \rho_{2n}(\mathbf{r} - 2\mathbf{R}). \end{aligned} \quad (6)$$

两核的密度分布保持球对称为:

$$\begin{aligned} \rho_p &= \rho_p^0 [1 + e^{(r-R_p)/a_p}]^{-\gamma_p}, \\ \rho_n &= \rho_n^0 [1 + e^{(r-R_n)/a_n}]^{-\gamma_n}. \end{aligned} \quad (7)$$

根据 Brack<sup>[4]</sup> 的数字计算结果, 这一密度形式能比较准确地给出基态能量, 我们就用他所定的参数. 用这近似计算的球形核的熔合位能记为  $V_s(2R)$ . 另一种近似是绝热近似, 适用于慢过程. 当两核相对运动能量低于熔合位垒时, 需要穿越位垒才能实现熔合. 面临位垒, 两核将用变形来降低位垒. 现仍用 (6) 式来计算总的密度, 但两核的密度不再是球对称, 加上了形变因子

$f_i(\theta)$ . 两核密度分别为:

$$\rho_{iq} = \rho'_{iq} \left[ 1 + \exp \left( \frac{r_i / f_i(\theta_i) - R_{iq}}{a_{iq}} \right) \right]^{-\gamma_{iq}}, \quad (8)$$

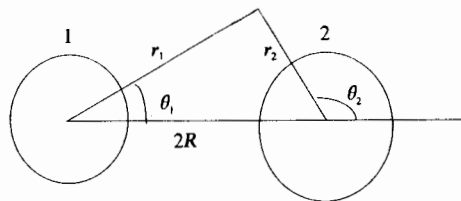


图 1 两核坐标变量示意图

这里  $i=1, 2$ , 表示两个核子,  $q=p, n$

分别表示质子与中子,  $\rho'_p$  与  $\rho'_n$  由核的质子数与中子数决定.

$$\begin{aligned} f_1(\theta_1) &= 1 - \alpha \cos(\theta_1) - \beta \left[ \frac{3}{2} \cos^2(\theta_1) - \frac{1}{2} \right], \\ f_2(\theta_2) &= 1 + \alpha \cos(\theta_2) - \beta \left[ \frac{3}{2} \cos^2(\theta_2) - \frac{1}{2} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

调整参量  $\alpha$  及  $\beta$ , 使达到位垒最低的情况, 认为就以这样的形变通过位垒, 把相应的位势记为  $V_A(2R)$ .

有了位势曲线, 就可求得位垒的所在位置  $R_0$ , 位垒的高度  $V_0$ , 位垒处的曲率  $\mu\omega^2$ , 其中  $\mu$  为两核系统的折合质量, 则熔合截面可以近似地由下式算得<sup>[5]</sup>:

$$\sigma = \frac{2R_0^2 \hbar \omega}{E} \ln \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{2\pi}{\hbar \omega} (E - V_0) \right] \right\}, \quad (10)$$

式中  $E$  为相对运动能量 (已对不同的人射角动量求和).

### 3 计算结果与讨论

应用上述理论, 计算了  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ ,  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  及  $^{90}\text{Zr} + ^{90}\text{Zr}$  三个体系的相互作用位势和熔合截面. 计算所得的  $V_S(2R)$  及  $V_A(2R)$  随  $R$  的变化如图 2. 由图可见, 不很大的变形就可以将位垒降低几个到十几个兆电子伏. 图 3、4、5 分别给出了三个体系的熔合截面随相对运动能量  $E$  的变化, 曲线表示形变及不形变两种情况的计算结果, 点为截面的实验值<sup>[5-7]</sup>.

由图 3 可见, 实验值几乎都落在由球形的  $V_S(2R)$  所计算的曲线上. 这表明在碰撞过程中, 不管相对运动能量是高还是低, 核都不变形, 因为  $^{40}\text{Ca}$  是双幻核, 很不容易变形. 在计算中, 因为没有考虑壳修正, 这种壳效应不会表现出来. 如果考虑了壳修正, 可以预计, 绝热位垒将会提高不少.

从图 4 可以看到, 体系  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  的实验截面随质心系能量的变化和预期的相一致. 在能量较高时, 实验截面值接近球形位势曲线  $V_S(2R)$  所计算的, 在能量较低时, 则接近  $V_A(2R)$  即变形位势的计算值, 而远远高出  $V_S(2R)$  的计算值. 过去由于没有考虑碰撞过程中核的形变, 只考虑球形的熔合位垒, 因此认为垒下熔合的截面超出计算值作为一种异常现象. 后来人们提出用耦合道的理论来解释这种穿透几率增大的现象, 即在位垒穿过程中同时考虑了核的振动和粒子交换. 这实际上是考虑了核的动态变形, 是从另一角度考虑了核的变形. 不过这种方法由于引入了可调参量和由实验上取得的参量, 不能和我们所给的变形位势比较. 本文这种理论的优点是不引入任何可调参量.

由图 5 可见, 对于  $^{90}\text{Zr} + ^{90}\text{Zr}$ , 实验测得的熔合截面, 都比理论值小. 这是因为在实验测量时, 没有考虑熔合裂变反应, 而体系经熔合后形成的核为  $^{180}\text{Hg}$ , 而  $\text{Hg}$  最轻的稳定同位素为  $^{180}\text{Hg}$ , 因此  $^{180}\text{Hg}$  为缺中子同位素, 较容易裂变, 其裂变位垒只有 10 MeV

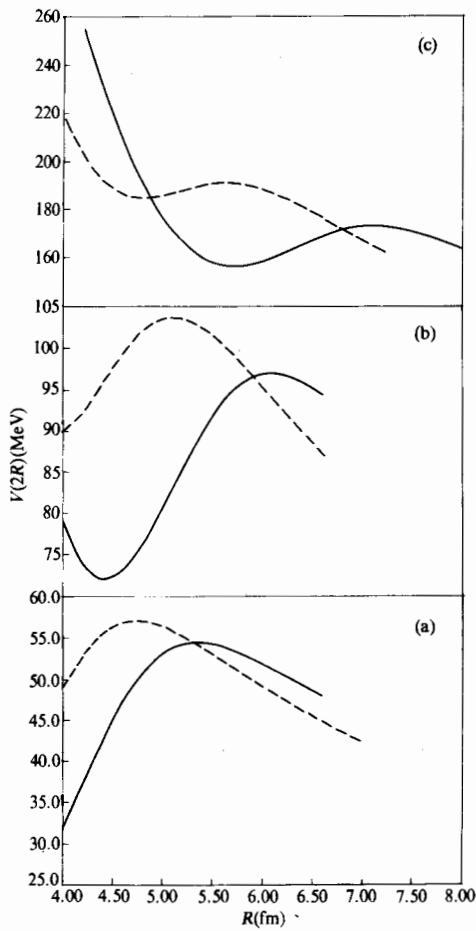


图 2 三个核体系相互作用势随两核质心的半距离  $R$  的变化

(a)  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ ,

虚线  $V_S(2R)$ ,  $R_0 = 4.76 \text{ fm}$ ,  $V_0 = 56.83 \text{ MeV}$ .

实线  $V_A(2R)$ ,  $R_0 = 5.37 \text{ fm}$ ,  $V_0 = 54.48 \text{ MeV}$ .

$\alpha = -0.03$ ,  $\beta = -0.12$ .

(b)  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ ,

虚线  $V_S(2R)$ ,  $R_0 = 5.11 \text{ fm}$ ,  $V_0 = 103.76 \text{ MeV}$ .

实线  $V_A(2R)$ ,  $R_0 = 6.09 \text{ fm}$ ,  $V_0 = 97.10 \text{ MeV}$ .

$\alpha = 0.00$ ,  $\beta = -0.18$ .

(c)  $^{90}\text{Zr} + ^{90}\text{Zr}$ ,

虚线  $V_S(2R)$ ,  $R_0 = 5.60 \text{ fm}$ ,  $V_0 = 191.17 \text{ MeV}$ .

实线  $V_A(2R)$ ,  $R_0 = 7.11 \text{ fm}$ ,  $V_0 = 173.48 \text{ MeV}$ .

$\alpha = 0.03$ ,  $\beta = -0.24$ .

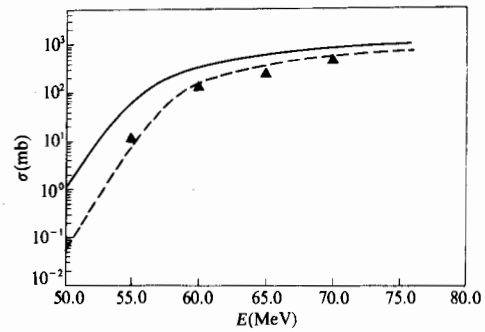


图 3  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  体系的熔合截面随相对运动能量  $E$  的变化

虚线为球形核计算结果, 实线为变形核计算结果, 点为实验数据<sup>[6]</sup>.

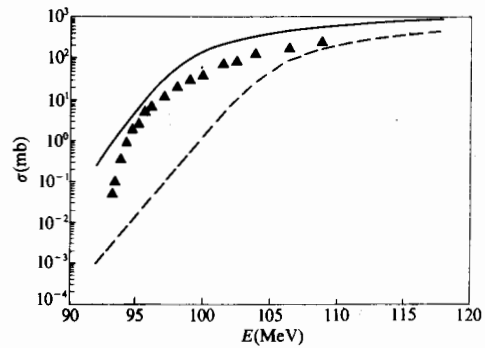


图 4  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  体系的熔合截面随相对运动能量  $E$  的变化

虚线为球形核计算结果, 实线为变形核计算结果, 点为实验数据<sup>[7]</sup>.

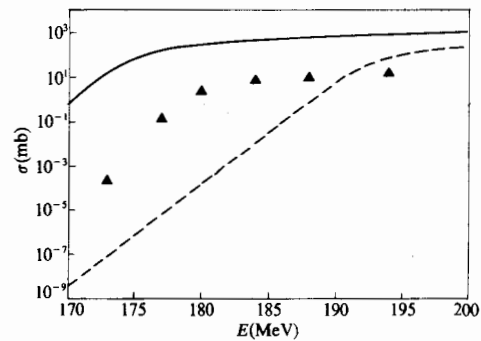


图 5  $^{90}\text{Zr} + ^{90}\text{Zr}$  体系的熔合截面随相对运动能量  $E$  的变化

虚线为球形核计算结果, 实线为变形核计算结果, 点为实验数据<sup>[9]</sup>.

左右, 而熔合后的激发能为 20—40 MeV. 因此有一定的裂变几率. 如在计算的截面值中扣除了熔合裂变截面, 也许能获得与实验接近的结果.

上述的初步结果表明, 位垒附近及低于位垒的重离子碰撞是一个值得进一步探讨的领域, 可以考虑从下面三个方面开展工作:

- (1) 进一步完善理论, 例如引入壳修正;
- (2) 广泛研究各个体系, 检验微观理论;
- (3) 作为研究远离  $\beta$  稳定性核素的一种途径.

### 参 考 文 献

- [1] M. Brack, C. Guet, H. B. Hakansson, *Phys. Rep.*, **123**(1985)275.
- [2] Q. B. Shen, Z. X. Li, X. Shi *et al.*, *Nucleon-Nucleon Interaction and Nuclear Many-body Problem*, P.618 (1984) World Scientific, Singapore.
- [3] Li Guo-Qiang, *Self-Consistent Semiclassical Approaches to the Properties of Giant Resonances and Nucleus-Nucleus Optical Potentials*, 1988, 南京大学毕业论文.
- [4] P. Gleissl, M. Brack, J. Meyer *et al.*, NBI-88-62, (1988).
- [5] M. Beckerman, *Phys. Rep.*, **129**(1985) 145.
- [6] J. Baretto, G. Auger, M. Langevin *et al.*, *Phys. Rev.*, **C27**(1983)1335.
- [7] M. Beckerman, J. Ball, H. A. Enge *et al.*, *Phys. Rev.*, **C23**(1981)1581.

## Interaction Potential Between Heavy Ions in Fusion Reactions

Hu Jimin      Zhong Yunxiao

(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871)

Received 7 November 1995

### Abstract

The interaction potential between several pairs of heavy ions are calculated in both sudden and adiabatic approximations with the Skyrme force. Fusion reaction cross-sections are calculated and compared with experimental results.

**Key words** fusion of heavy ions, interacting potential, cross sections.