

# 双阱集团壳模型折叠位

郑玉明 卢兆启 陈永寿

(中国科学院原子能研究所)

## 摘 要

本文给出了双阱集团壳模型折叠位,并用它计算了 $\alpha$ - $\alpha$ 弹性散射,得到在底能区中与实验符合较好的结果.计算表明,对重离子弹性散射,考虑集团内态的适当激发是必要的.

## 一、引 言

如何合理而又简便地给出离子-离子之间的有效相互作用位,是重离子反应中待解决的问题之一.近十几年来的实验数据表明,重离子弹性散射只对离子-离子位实部的尾部比较敏感,而且位在 $R \approx 1.5(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})\text{fm}$ 附近的敏感区中大约是1—2 MeV<sup>[1][2]</sup>.在理论上提出了各种计算离子-离子位实部的近似方法.折叠模型是其中比较常用的一种,它假定核的密度始终未被扰动,而位是核子-核子相互作用势对两个核的密度平均的简单期望值.这个定义似乎是恰当的.因为在位的敏感区中,密度几乎没有重叠,故可假定忽略它们的畸变.然而,在绝大多数计算中,这一模型给出的强吸收半径R附近的离子位大约是实验值的两倍.U. Mosol等人<sup>[2]</sup>认为,造成这种系统偏差的原因,除了在模型中忽略了两团之间波函数反对称化效应外,在绝热近似中,一个离子被另一个离子的核场和库伦场的极化引起的对离子位的贡献是一个重要因素.我们认为除此之外,还应该考虑集团内态结构的变化,即在两个离子相互接近的过程中允许有适当的集团内态的激发.基于这种思想,在第二节中用双阱集团壳模型波函数,建立了具有适当集团内态激发的折叠位公式,称之为双阱集团壳模型折叠位.第三节中以 $\alpha$ - $\alpha$ 弹性散射为例,进行了具体计算,并与通常的折叠位做了比较.初步计算表明,双阱集团壳模型折叠位给出了比较符合实验的结果.

## 二、公 式

令 $\Phi_{A_1}$ 和 $\Phi_{A_2}$ 分别为质量数为 $A_1$ 和 $A_2$ 的孤立离子的波函数, $\Phi_A$ 为由它们组成的碰撞对系统( $A = A_1 + A_2$ )的反对称化波函数,

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{A_1} &= N_{A_1} \mathcal{A} \prod_{\alpha=1}^{A_1} \phi_{\alpha}(\mathbf{r}_{\alpha}, \mathbf{s}_1, b_{1f}); \\ \Phi_{A_2} &= N_{A_2} \mathcal{A} \prod_{\alpha=A_1+1}^A \phi_{\alpha}(\mathbf{r}_{\alpha}, \mathbf{s}_2, b_{2f}); \\ \Phi_A &= N'_A \mathcal{A}' (\Phi_{A_1} \cdot \Phi_{A_2}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中  $\phi_{\alpha}(\mathbf{r}_{\alpha}, \mathbf{s}_i, b_{if}) = \varphi_{\eta}(\mathbf{r}_{\eta}, \mathbf{s}_i, b_{if}) \mu_{\alpha'}$ ,  $\varphi_{\eta}(\mathbf{r}_{\eta}, \mathbf{s}_i, b_{if})$  是在阱心为  $\mathbf{s}_i$ 、势阱参数为  $b_{if}$  ( $f=x, y, z$ ) 的平均场中的谐振子波函数, 它包含有适当的、随着两阱心之间的距离  $\mathbf{s} = \mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2$  的变化而变化的激发态成份;  $\mu_{\alpha'}$  是自旋同位旋波函数;  $\mathcal{A}$  和  $\mathcal{A}'$  是反对称化算符;  $N_{A_i}$  和  $N'_A$  为归一化系数。

碰撞对系统的完全的哈密顿量为

$$\hat{H} = \hat{H}_{A_1} + \hat{H}_{A_2} + \hat{T}_{R_{12}} + \hat{V}, \quad (2)$$

式中  $\hat{T}_{R_{12}}$  是在质心系中两团之间相对运动的动能算符,  $\mathbf{R}_{12} = \mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2$  是两团质心之间的

距离,  $\mathbf{R}_i$  为第  $i$  团的质心坐标.  $\hat{V} = \sum_{\alpha=1}^{A_1} \sum_{\beta=A_1+1}^A \hat{V}_{\alpha\beta}(r)$ , 是两团之间的核子-核子相互作用势。

能量期望值为:

能量期望值为:

$$E(\mathbf{R}, b_{1f}, b_{2f}) = \langle \Phi_A | \hat{H} | \Phi_A \rangle, \quad (3)$$

其中  $\mathbf{R} = \langle \Phi_A | \mathbf{R}_{12} | \Phi_A \rangle$ , 是两团质心距离的平均值。

两团之间的离子-离子位由下式给出:

$$V(\mathbf{R}, b_{1f}, b_{2f}) = \langle \Phi_A | \hat{V} | \Phi_A \rangle = V_d + V_e + V_t, \quad (4)$$

式中第一项  $V_d$  相当于折叠位,  $V_e$  和  $V_t$  分别为两团之间的交换项和转移项的贡献。(4)

式给出的位是计入了所有反对称化效应和集团内部态激发效应的结果, 我们称之为双阱集团壳模型折叠位。在(1)式给出的波函数形式下, 它是比较容易计算的。

如果入射离子的能量较低(在库伦垒附近), 则可以用绝热近似处理<sup>[2]</sup>, 即认为在每一距离  $\mathbf{R}$  处系统允许改变它的形状, 使由(3)式确定的能量处于极小值。在这种情况下, 极化引起的对位的贡献是由于系统总能量取极小值的变分过程中, 通过  $b_{if}$  的变化, 对(4)式中的  $V$  产生影响的。如果入射能量很高, 则可认为在弹性碰撞过程中,  $b_{if}$  不随  $R$  变化, 称之为快速过程。然而, 不管是绝热近似还是快速过程, 两团内部激发态成份随  $R$  的变化都是影响双阱集团壳模型折叠位(4)式的重要因素。

### 三、结果和讨论

本节以  $\alpha$ - $\alpha$  弹性散射为例, 进行具体的计算和比较。对  $\alpha$ - $\alpha$  系统, 取双阱集团壳模型波函数  $\varphi_{\eta}(\mathbf{r}_{\eta}, \mathbf{R}_i, b_{if})$  为:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \alpha |0\rangle_1 + \sqrt{1-\alpha^2} |1\rangle_1 \\ \varphi_2 &= \beta |0\rangle_2 - \sqrt{1-\beta^2} |1\rangle_2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $|0\rangle_i = |n_x = 0, n_y = 0, n_z = 0\rangle_i$ ,  $|1\rangle_i = |n_x = 0, n_y = 0, n_z = 1\rangle_i$ ,

下标  $i$  表示阱心为  $z_i$ 、阱参为  $b_{ij}$ ;  $n_x$ 、 $n_y$  和  $n_z$  分别为  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的谐振子量子数。

计算中采用  $\text{HN}_{\text{II}}$  力<sup>[3]</sup>和绝热近似。为了简化计算取  $b_{ix} = b_{iy} = b_a$  ( $b_a$  是自由  $\alpha$  粒子的势阱参数)和正交条件  $\langle \varphi_1 | \varphi_2 \rangle = 0$ 。

值得说明的是,本模型波函数存在质心运动伪态,计算时应予扣除。但对  $\alpha$ - $\alpha$  系统,在  $R \approx 4.8 \text{ fm}$  附近的敏感区中,双阱集团壳模型的质心运动伪态成份对总能量(3)式的贡献小于  $0.02 \text{ MeV}$ <sup>[4]</sup>,因此可以认为本文中考虑这一影响的扣除,结果仍是可靠的。

为了比较,还计算了(5)式中  $\alpha = \beta = 1$ , 即无集团内态激发的情况,记为  $V' = V'_1 + V'_2 + V'_3$ 。图 1 中给出离子-离子位实部的形状。图中还给出符合  $\alpha$ - $\alpha$  弹性散射实验的光学位  $V_{op}$ <sup>[5]</sup>。从图中可以看出,对  $\alpha = \beta = 1$  的情况,在敏感区中,计入所有反对称化效应和极化引起的贡献后的位  $V'$ ,确实比  $V'_2$  (通常的折叠位) 约小两倍左右,因此有理由认为它是改善折叠模型位的可能途径。然而与  $V_{op}$  相比较,它却显得太小些,这说明它还不能给出符合实验的结果(见图 2)。交换项  $V'_2$  是吸引位,在这一区间影响很小。转移项  $V'_3$  提供了一个很强的排斥心,使得两团无法进一步接近而融合成为一个复合核,这是采用无集团内态激发模型造成的。而双阱集团壳模型折叠位  $V$  则在敏感区附近给出与  $V_{op}$  相符合的结果,并且  $V \approx V_d$ 。因为在此区中  $V_c$  的影响小到完全可以忽略的程度;  $V_i = 0$ , 这是采用单粒子轨道态正交条件  $\langle \varphi_1 | \varphi_2 \rangle = 0$  的结果。另一明显的特点是,由于集团内态激发成份随  $R$  的减小而增大,在内区中,双阱集团壳模型折叠位  $V$  不出现排斥心,而是给出了一个两个激发核的很深的吸引位。这也许会给非弹性散射和深部非弹性散射提供一个感兴趣的结果。

用  $V$  和  $V'$  计算的散射相移表示在图 2 中。从中清楚地看到,在不考虑集团内态激发的模型中,即使计入了所有反对称化效应和极化贡献后的  $V'$  也不能给出符合实验的结果。由双阱集团壳模型折叠位  $V$  给出的相移与实验符合较好。这说明在重离子弹性散射的中间过程中,考虑集团内态的激发是必要的。然而  $V$  给出的  $\delta_2$  和  $\delta_4$  的理论曲线与实验相比较不如  $V_{op}$  曲线符合的那样好,特别是在共振区中  $V$  的理论值偏高。这一方面是由于在  $V$  的计算中没有做角动量投影,施行角动量投影后得到与角动量有关的  $V(l)$ , 可望改善相移  $\delta_2$  和  $\delta_4$ 。另外在  $V_{op}$  的计算中采用了多个可调参数,而在双阱集团壳模型折叠位中,除了核结构计算中需要的变分参数外,在计算散射时没有可调参数。

另外,进一步研究动力学效应,分析不同有效核力的影响,特别是推广到计算更重的

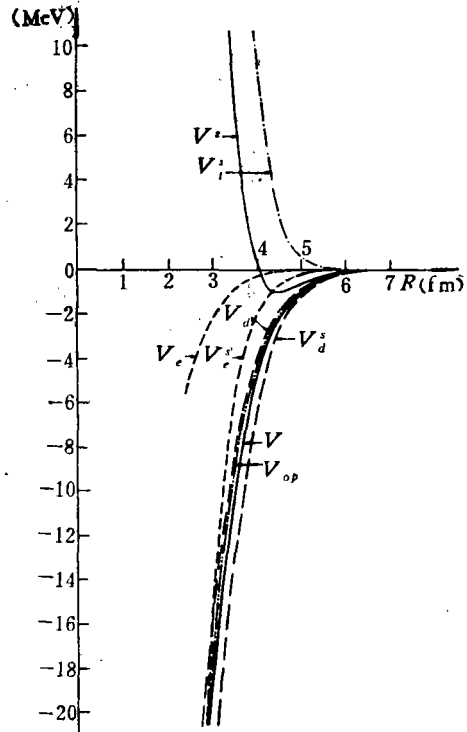


图 1 对  $\alpha$ - $\alpha$  弹性散射的离子-离子位实部的形状。其中  $V_{op}$  取自参考文献[5], 它是在  $E_{CM} = 1 \text{ MeV}$  处给出的值

离子之间的弹性和非弹性散射,进一步考验模型的合理性,都是有意义的工作。

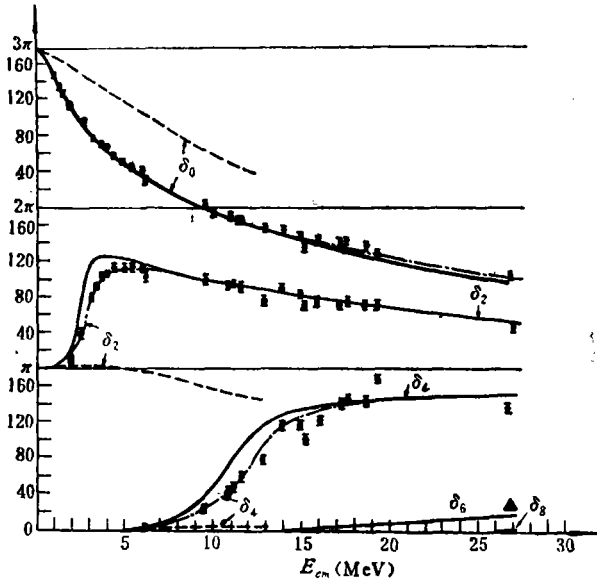


图2 用位  $V, V'$  和  $V_{op}$  得到的理论相移(分别以实线、虚线和点虚线表示)与实验  $\alpha$ - $\alpha$  相移  $\delta_i$  的比较。相移用度和弧度两种单位给出。

### 参 考 文 献

- [1] G. R. Satchler, Proc. of the Int. Conf. On Reactions between Complex Nuclei (North-Holland, Amsterdam, 1974) p. 171.
- [2] J. Fleckner and U. Mosel, *Nucl. Phys.*, **A277** (1977), 170;  
P. G. Zint and U. Mosel, *Phys. Lett.*, **56B** (1975), 424;  
D. M. Brink, *Journal de Physique C5* (1976), 47.
- [3] A. Hasegawa and S. Nagata, *Prog. of theor. Phys.* **45** (1971), 1786.
- [4] 张竞上、卓益忠, *物理学报* **25**(1976), 292.
- [5] V. I. Kukulín et al., *Nucl. Phys.*, **A245** (1975), 429.

## THE FOLDING POTENTIAL OF THE DOUBLE WELL-CLUSTER SHELL MODEL

ZHENG YU-MING LU ZHAO-QI CHEN YONG-SHOU  
(*Institute of Atomic Energy, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

In this paper, the folding potential of the double well-cluster shell model folding potential is derived. We use this potential to calculate the  $\alpha$ - $\alpha$  elastic scattering up to 27 MeV energy. the theoretical results agree with experiments rather well. It shows that for heavy-ion elastic scattering; the intrinsic state excitation should be taken into account properly.