

质量相近 $4N$ 核间宇称 相关势的折叠模型*

周全华

(天津师范大学物理系 天津 300074)

杨宝胜 高成群

(南开大学物理系 天津 300071)

1993年7月26日收到

摘 要

基于对 $4N$ 核结团结构的考虑,采用合理的核轨道波函数,并利用折叠模型导出了质量相近 $4N$ 核间的宇称相关势。该势没有引进任何自由参数并具有明确的解析形式。将其用于研究 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 系统弹性散射角分布时,很好地再现了角分布的振荡结构。

关键词 宇称相关势,折叠模型, LCNO 模型,准分子态。

1 引 言

为了说明质量相近的两重离子间弹性散射激发函数中出现的粗共振结构和角分布中呈现的反常振荡上升现象,近年来唯象和微观方面的研究都表明必须在该系统的相互作用中计入一个宇称相关势。Baye^[1,2]采用微观理论方法在双中心谐振子模型下计及了重离子碰撞系统中全部核子波函数的反对称化,证明了碰撞过程中宇称相关势的存在是泡利原理的必然结果,并指出宇称相关作用在质量相近的 $4N$ 核间更为显著。Baye 还给出了确定指定碰撞系统宇称相关势符号和力程的简单规则。Kondō^[3,4]和 Hebbard^[5]等在推广的光学模型下通过拟合实验数据得出了唯象的宇称相关势。核轨道线性组合(LCNO)模型^[6]是研究宇称相关效应的一种很好的半微观理论方法。该模型从考虑全同核心的交换对称性出发自然地预言了两核之间宇称相关势的存在,从而给出了关于该势起源的一幅清晰的物理图象。因此,深入地研究 LCNO 模型下的宇称相关作用就显得更有意义。

在以往的宇称相关作用研究中,人们通常使用一个浅光学势加上一个推广光学模型下的唯象宇称相关势^[3-5]来说明相近 $4N$ 核系统的碰撞过程,虽然能够较好地再现弹性散射的实验数据,但由于其相应的共振分波没有节点因而与泡利原理相矛盾;另外,在半微

* 国家自然科学基金资助。

观的研究中由于在符合实验数据的过程中调节了半微观宇称相关势中的参数,因而增加了某些唯象成份。在最近的一些研究工作中^[7-9],通过采用一个深光学势加上一个LCNO模型下的半微观宇称相关势,从而圆满地解决了上述两个问题。该半微观宇称相关势是通过求解核心外的价 α 粒子波函数在没有调节任何参数的情况下得到的,因而其唯象成份大为减少。因为在考虑核心与价 α 粒子相互作用时没有计及核心的结构,所以唯象成份尚未完全消除。

对 ^{16}O 核结构的微观理论研究和实验结果表明^[10], ^{16}O 核有相当大的几率处于 $\alpha+^{12}\text{C}$ 组态中,而核心 ^{12}C 具有的 3α 结构又能很好地被独立 α 粒子模型^[11]所描述。基于这种考虑本文采用文献[12]根据能量表面微观理论计算给出的 $\alpha-\alpha$ 相互作用势利用折叠模型得到了核心 ^{12}C 与价 α 粒子间的相互作用势,同时采用节点数符合泡利原理要求的波函数来描述 ^{16}O 核中价 α 粒子的运动从而在LCNO理论框架下由折叠模型导出了 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 碰撞系统的宇称相关势。该势没有引进任何自由参数,由于在导出过程中考虑了核心 ^{12}C 的结构因而该势具有 $4N$ 核 α 结构下的微观特征。将其用于研究 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 弹性散射角分布,其计算结果很好地再现了 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 系统弹性散射角分布的振荡特性。该方法的优点是物理图象清晰,且结果具有明确的解析形式,便于应用。

2 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 系统宇称相关势的折叠模型

由于 ^{16}O 核有相当大的几率处于 $\alpha+^{12}\text{C}$ 组态中,因此可将 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 碰撞系统看成是由两个相同的核心 ^{12}C 和一个绕它们运动的价 α 粒子组成的系统,如图1所示。当入射能量在库仑位垒以上邻域时该系统则形成一个准分子态。在LCNO模型下这个准分子态的波函数^[6]为

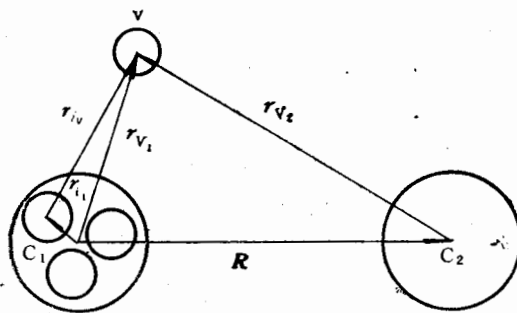


图1 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 系统坐标系

$$\phi_P = \frac{1}{\sqrt{2[1 + P\Delta(R)]}} [\phi_{c_1}^v + P\phi_{c_2}^v], \quad (1)$$

其中 $\phi_{c_k}^v$ ($k=1,2$)是价 α 粒子 v 绕核心 c_k 运动的核轨道波函数, $\Delta(R) = \langle \phi_{c_1}^v | \phi_{c_2}^v \rangle$ 是重叠积分, R 是两核心中心的距离,宇称 $P = \pm 1$ 分别对应对称和反对称准分子态。在两态近似下,由于包括核心相对运动在内的整个碰撞系统的波函数在核心交换时应具有对称性,因而LCNO模型下的宇称相关势^[6]

$$V_P = (-1)^P J(R), \quad (2)$$

其中 $(-1)^P = (-1)^L$, L 为核心相对运动分波的角动量。 $J(R)$ 通常称为交换势, 其形式为

$$J(R) = S \langle \phi_{c_1}^v | V_{c_1, v} | \phi_{c_2}^v \rangle, \quad (3)$$

其中 $V_{c_1, v}$ 是核心 c_1 和价 α 粒子 v 之间的相互作用势, S 是 α 结构谱因子, 其值等于 0.3^[13].

核心 ^{12}C 具有 3α 结构, 根据折叠模型核心 c_k 和价 α 粒子 v 之间的相互作用势应为

$$V_{c_k, v} = \left\langle \phi_{i, c_k} \left| \sum_{i=1}^3 V_{i, v} \right| \phi_{i, c_k} \right\rangle, \quad (4)$$

其中 ϕ_{i, c_k} 是描述核心 c_k 中 3 个 α 粒子运动的对称化波函数, $V_{i, v}$ 是核心 c_k 中某个 α 粒子和价 α 粒子 v 之间的相互作用势。由于在 $4N$ 核独立 α 粒子模型^[11]中

$$\phi_{i, c_k} = \phi_{c_k}^{\alpha}(1) \phi_{c_k}^{\alpha}(2) \phi_{c_k}^{\alpha}(3), \quad (5)$$

其中 $\phi_{c_k}^{\alpha}(i)$ 是核心 c_k 中 α 粒子的波函数, 因而

$$V_{c_k, v} = 3 \langle \phi_{c_k}^{\alpha}(i) | V_{i, v} | \phi_{c_k}^{\alpha}(i) \rangle. \quad (6)$$

这样, 由折叠模型导出的 LCNO 理论框架下 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 碰撞系统的宇称相关势为

$$V_P = 3S(-1)^L \langle \phi_{c_1}^v | \langle \phi_{c_1}^{\alpha}(i) | V_{i, v} | \phi_{c_1}^{\alpha}(i) \rangle | \phi_{c_2}^v \rangle. \quad (7)$$

3 结果和讨论

依文献[11]

$$\phi_{c_k}^{\alpha}(i) = \frac{1}{\sqrt{8}} (\pi a^2)^{-3/4} \left[(2 - \sqrt{6}) + \sqrt{\frac{8}{3}} \left(\frac{r_{ik}}{a} \right)^2 \right] e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{r_{ik}}{a} \right)^2}, \quad (8)$$

其中 r_{ik} 是 α 粒子至核心 c_k 中心的距离, a 是 ^{12}C 核的谐振子参量, 遵照文献[11], 仍取 $a = 1\text{fm}$. 采用文献[12]根据能量表面微观理论计算得到的 α - α 相互作用势作为核心中 α 粒子和价 α 粒子 v 之间的相互作用势并保持其势参数值不变, 这样

$$V_{i, v} = -V_0 e^{-\mu^2 r_{i, v}^2}, \quad (9)$$

其中 $V_0 = 126.3\text{MeV}$, $\mu = 1/b^2$, $b = 2.15\text{fm}$, $r_{i, v}$ 是 α 粒子和价 α 粒子 v 之间的距离。如文献[9]所述, $\alpha + ^{12}\text{C} = ^{16}\text{O}$ 系统基态价 α 粒子符合泡利原理要求的波函数应具有 2 个节点, 为简便起见, 我们选用具有 2 个节点的谐振子波函数作为价 α 粒子 v 的核轨道波函数, 即

$$\phi_{c_k}^v = \sqrt{\frac{2}{15}} \frac{\alpha^{3/2}}{\pi^{3/4}} \left[\frac{15}{4} - 5(\alpha r_{v, k})^2 + (\alpha r_{v, k})^4 \right] e^{-\frac{1}{2}(\alpha r_{v, k})^2}, \quad (10)$$

其中 $r_{v, k}$ 为价 α 粒子 v 至核心 c_k 中心的距离, α 为 ^{16}O 核的谐振子参量, 依 ^{16}O 核的均方半径估计, $\alpha \approx 0.9\text{fm}^{-1}$. 根据上述考虑, 依式(7)得出

$$J(R) = -\frac{4}{5} S V_0 \frac{1}{[1 + \mu a^2 + \mu/\alpha^2]^{3/2}} \sum_{n=0}^6 D_n (\alpha R)^{2n} \cdot e^{-\frac{1}{4} \left[1 + \frac{\mu/a^2}{1 + \mu a^2 + \mu/\alpha^2} \right] (\alpha R)^2}, \quad (11)$$

式中系数 D_n 是与 a, μ 和 α 等参量有关的常数。在没有引进任何自由参数的情况下我们使用式(11)计算了宇称相关势, $J(R)$ 的形状如图 2 所示。

假定 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 碰撞系统的光学势具有如下形式

$$U_{\text{opt}}(R) = U_{\text{C}}(R_{\text{C}}; R) + U_0 f(R_{\text{R}}, a_{\text{R}}; R)^2 + iW(E_{\text{cm}}, J) f(R_{\text{I}}, a_{\text{I}}; R)^2, \quad (12)$$

其中

$$W(E_{\text{cm}}, J) = (W_0 + W_{\text{E}} E_{\text{cm}}) / \{1 + e^{(J - J_c)/\Delta}\}, \quad (13)$$

$$f(R_i, a_i; R) = 1 / \{1 + e^{[(R - R_i)/a_i]}\}, i = R, I, \quad (14)$$

$U_{\text{C}}(R_{\text{C}}; R)$ 是半径 $R_{\text{C}} = R_{\text{R}}$ 的均匀带电球产生的库仑势。 J 是总角动量, 对于 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 系统有 $J = L$, J_c 是截断角动量, Δ 是与截断有关的弥散度, 对某一给定的人射能量 E_{cm} , J_c 参数化为

$$J_c = \bar{R} [2\mu(E_{\text{cm}} - \bar{Q})/\hbar^2]^{1/2}, \quad (15)$$

其中 \bar{R} 和 \bar{Q} 分别是半径和阈能对非弹反应的平均值。光学势的参数采用对应 $E_{\text{cm}} = 21.0\text{MeV}$ 和 25.3MeV 的 $L = 14$ 和 16 的共振分波给出合理的节点的方法来确定, 即在只有实势的情况下, 调整光学势的实部参数, 使 $L = 14$ 和 16 分波发生共振, 同时保证其相应节点数分别为 5 和 4 以满足泡利原理的要求。在光学势实部确定之后, 调整虚势参数以拟合实验数据。光学势参数列于表 1 中。

表 1 深光学势参数

U_0 (MeV)	R_{R} (fm)	a_{R} (fm)	W_0 (MeV)	W_{E}	R_{I} (fm)	a_{I} (fm)	\bar{R} (fm)	\bar{Q} (MeV)	Δ	R_{C} (fm)
-408.7	3.43	1.5	-5.0	-1.0	3.43	1.5	7.0	9.0	0.4	3.43

采用本文由折叠模型导出的宇称相关势加上上述的光学势我们计算了 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 碰撞系统弹性散射的角分布, 其结果如图 3 所示。由图 3 可以看出理论计算的结果很好地再现了实验数据^[4]。从而表明, 重离子系统在碰撞过程中确实形成一个亚稳的分子态, 即使像 ^{16}O 这样稳定的核其价 α 粒子也要在两个核心之间进行着强烈的交换, 同时也表明了本文由折叠模型导出的宇称相关势的合理性。

为了进一步说明本文所得的宇称相关势的合理性, 将其与文献[7]研究 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 弹性散射共振结构使用 LCNO 方法得到的半微观宇称相关势(见图 2 中点线)做了比较。由图 2 可以看出, 两者随 R 增大都呈现出振荡结构, 这是与各自的核轨道波函数具有相应的节点有关, 而节点数的不同和波函数形式上的差异又造成宇称相关势具有不同的振荡结构。这两种势的符号和力程都与 Baye^[1,2] 规则决定的符号和力程相一致。特别值得注意的是本文得到的 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 系统的宇称相关势具有较大的强度, 尤其在 $R = 3\text{fm}$ 附近。这无疑表明 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 系统与 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 系统相比有着强得多的宇称相关效应。这与 ^{16}O 核中价 α 粒子同核心之间束缚得较为紧密有着直接的关系, 价 α 粒子在两个 ^{12}C 核心之间转移需要较强的交换作用, 且转移主要发生在 $R \approx 3\text{fm}$ 的核表面区域。宇称相关作用是导致碰撞系统角分布后角振荡上升的根本原因, 正如文献[8]所述, 后角区域角分布对内部区域的宇称相关势的形状虽然不十分敏感, 但是它们之间存在着密切的联系。本文结果能够很好地再现实验数据, 特别是在后角区域, 表明本文得到的宇称相关势的形状具有一定的合理性。

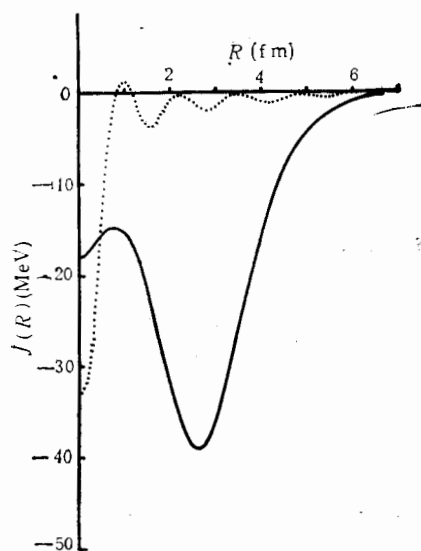
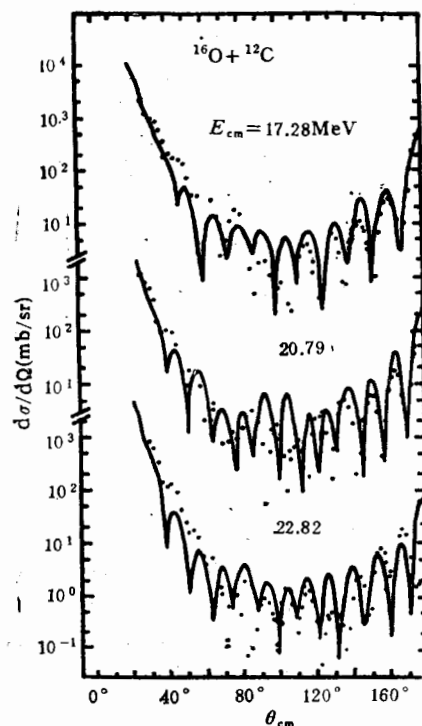


图 2 两种宇称相关势

实线是由折叠模型得到的 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 系统的宇称相关势, 点线是 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 系统的半微观宇称相关势

图 3 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 弹性散射角分布

黑点是实验数据^[14], 实线是本文的计算结果

参 考 文 献

- [1] D. Baye, J. Deenen and Y. Salmon, *Nucl. Phys.*, **A289**(1977) 511.
- [2] D. Baye, *Nucl. Phys.*, **A460**(1986) 581.
- [3] Y. Kondo, B. A. Robson and R. Smith, *Nucl. Phys.*, **A410**(1983) 289.
- [4] Y. Kondo, B. A. Robson, R. Smith and H. H. Wolten, *Phys. Lett.*, **B162**(1985) 39.
- [5] D. F. Hebbard et al., *Nucl. Phys.*, **A481**(1988) 161.
- [6] W. von Oertzen and H. G. Bohlen, *Phys. Rep.*, **19**(1975) 1.
- [7] C. Gao, Y. Kondo and B. A. Robson, *Nucl. Phys.*, **A529**(1991) 234.
- [8] C. Gao and G. He, *Phys. Lett.*, **B282**(1992) 16.
- [9] 高成群、杨宝胜、周全华, 高能物理与核物理, **17**(1993)665.
- [10] Y. Fujiwara, et al., *Sup. Prog. Theor. Phys.*, **68** (1980) 29.
- [11] 李清润、陈生忠、赵恩广, 高能物理与核物理, **5**(1981)531.
- [12] H. Freidrich, *Phys. Rep.*, **74**(1981) 209.
- [13] M. Ichimura, et al., *Nucl. Phys.*, **A204**(1973) 225.
- [14] P. Charles, et al., *Phys. Lett.*, **B62**(1976) 289.

A Folding Model of Parity-Dependent Potential Between 4N-Nuclei with Near Masses

Zhou Quanhua

A

(*Physics Department, Tianjin Normal University, Tianjin 300074*)

Yang Baosheng Gao Chengqun

(*Physics Department, Nankai University, Tianjin 300071*)

Received on July 26, 1993

Abstract

Based on the cluster structure of $4N$ -nucleus, a parity-dependent potential is derived by using a proper nuclear orbital wave function and the folding method. The potential is in analytical form with no adjustable parameter. The angular distributions of the $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ elastic scattering is studied using this potential and the characteristic feature of the data is well reproduced.

Key words parity-dependent potential, folding model, LCNO model, quasi-molecular state.