

α 转移反应的激发函数*

王泰峰¹⁾ 夏临华 缪元均²⁾ 周全华³⁾

金庆华 高成群 蔡崇海

(南开大学, 天津)

摘 要

本文研究了 α 转移反应 $^{28}\text{Si}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{32}\text{S}$ 的激发函数, 构造了核轨道线性组合分子态的耦合道理论, 计算结果与实验较好符合, 与扭曲波玻恩近似理论结果比较有很大的改进.

近年来, 人们为寻找核分子态做了许多带有少数几个核子或集团转移反应的实验, 特别是 α 转移反应更引起了人们极大的兴趣^[1-4]. 这些实验有一些有趣的特征, 如弹性道角分布, 具有后角振荡上升的结构, 反应道则具有前角振荡上升结构, 而且在某些能量下也有后角上升. 激发函数既具有宽度在几个 MeV 的粗结构, 还具有几百个 keV ~ 1 MeV 的中间结构. 这些特征充分体现了 α 转移机制, 而且带来了核分子态的信息.

与此同时, 不同理论上的探讨相继进行. 首先, 传统的光学模型(OM)的研究方法已经失效了^[5-7]. 进一步人们在光学模型的基础上引入扭曲波玻恩近似方法(OM + DWBA)来研究, 尽管对于角分布小角区能作出较好的解释, 但对于解释大角振荡的结构仍然是失败的^[6]. 而且对于激发函数的研究, 这一理论只能给出一条很平滑的曲线, 既没有重现实验中的粗结构, 也没有给出中间结构^[8]. 后来人们在光学模型的基础上又唯象地引入雷其极点^[3], 较好地解释了角分布中的振荡上升结构. 在激发函数的研究中, 人们在 OM + DWBA 理论的背景下, 同时考虑了分子态共振机制, 引入正比于 $J(J+1)$ 的能量相关的 Breit-Wigner 共振带进行数据拟合, 得到了与实验大致符合的结果^[4]. 后两个理论尽管能够在一定程度上与实验符合, 但美中不足的是唯象地引入了许多参数, 而没有对 α 转移机制和分子态中间结构作直接的描述.

建立在 α 转移机制基础上的分子态核轨道线性组合(LCNO)理论成功地解释了大角反常上升的现象^[9-12]. 文献[15]将 LCNO 理论用到 α 转移反应过程的研究, 导出弹性道和反应道的耦合方程, 理论上同时解释了两个道的全角分布.

本文在 LCNO 理论的基础上, 对转移反应 $^{28}\text{Si}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{32}\text{S}$ 的激发函数进行了研

* 本文得到国家自然科学基金资助.

1) 永久地址: 河北廊坊师专物理系.

2) 永久地址: 天津医学院数学组.

3) 永久地址: 天津师范大学物理系.

本文 1987 年 4 月 25 日收到.

究. 理论上不仅考虑了 α 转移机制,而且还直接地构造了中间核分子态.前者与文献[15]一致,后者则是这里的理论新的出发点.理论认为,在反应过程中,将形成一个核分子系统,它是由两个非全同核芯 ^{12}C , ^{28}Si 和一个 α 价粒子组成的一个三体系统.在Born-Oppenheimer绝热近似下,系统的运动分离成价粒子绕两个核芯的运动和两核芯的相对运动.理论上采用了两态近似,构造了核分子态的两个 σ 态,这两个态都是核轨道的线性组合(LCNO):

$$\Phi_i = (1 + 2p_i\delta + p_i^2)^{-\frac{1}{2}}(\phi_i + p_i\phi_2), \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

其中 $\phi_{i(2)}$ 是价粒子的两个核轨道态, δ 是它们的交迭.由分子理论可知

$$p_i = \frac{\varepsilon_i\delta - h_{21}}{h_{22} - \varepsilon_i} = \frac{h_{11} - \varepsilon_i}{\varepsilon_i\delta - h_{12}}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

其中

$$h_{ij} = \langle \phi_i | h | \phi_j \rangle, \quad i, j = 1, 2 \quad (3)$$

这里 h 是价粒子的Hamiltonian.系统总波函数可以写成

$$\Psi = \sum_{i=1}^2 F_i \Phi_i \quad (4)$$

其中 $F_i (i = 1, 2)$ 描述核芯的相对运动,理论上进一步可得到它们的耦合方程:

$$\begin{cases} (E - T_0 - V_0 - K_1)F_1 - J_1F_2 = 0 \\ (E - T_0 - V_0 - K_2)F_2 - J_2F_1 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中 T_0 是核芯相对运动动能, V_0 是其相互作用势,一般取作Woods-Saxon势和Coulomb势之和. K_1 和 K_2 称作直接势, J_1 和 J_2 称作交换势.

$$K_1 = (h'' - h^{21}\Delta)/(1 - \Delta^2), K_2 = (h^{22} - h^{12}\Delta)/(1 - \Delta^2) \quad (6)$$

$$J_1 = (h^{12} - h^{22}\Delta)/(1 - \Delta^2), J_2 = (h^{21} - h^{11}\Delta)/(1 - \Delta^2) \quad (7)$$

其中

$$h^{ij} = \langle \Phi_i | h | \Phi_j \rangle, \quad i, j = 1, 2 \quad (8)$$

$$\Delta = \langle \Phi_1 | \Phi_2 \rangle \quad (9)$$

直接势和交换势都体现了价粒子转移给核芯运动带来的改变.直接势将与光学势合并作为核间的等效相互作用,而交换势将 F_1 和 F_2 耦合起来.从这一点看,说明这里的理论既考虑了以光学势为背景的势散射,又考虑了以 α 转移机制下的交换效应.

求解方程(5),由 S 矩阵理论可得到对应于 F_1 与 F_2 的反应振幅 f_1 与 f_2 .进一步通过渐近行为的分析可知,前面由LCNO构造的两个 σ 态在两核靠近时,是核态的混合,当两核远离时,两个分子态分别很快地趋向于两个 $1s$ 核轨道态.因此所求得振幅 f_1 和 f_2 也就对应于实验测量对应的振幅.

图1画出 α 转移过程 $^{28}\text{Si}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{32}\text{S}$ 的激发函数,图中圆圈是实验点,实验数据转引自文献[8],实验报告见文献[1].过圆圈的虚线是为了看清实验上激发函数变化趋势而画出的.实线是本文数值计算结果.从图中可以看出,理论曲线的共振峰宽度,振幅以及峰的位置都大致与实验相符,在这一点上与别的理论比较,本文的结果有一个明显的改进.文献[8]用DWBA理论也研究了这里同样的 α 转移反应,尽管使用了不同的光学势,但只能给出没有任何振荡的平滑曲线.我们这里的结果则有本质上的改变,大致体现

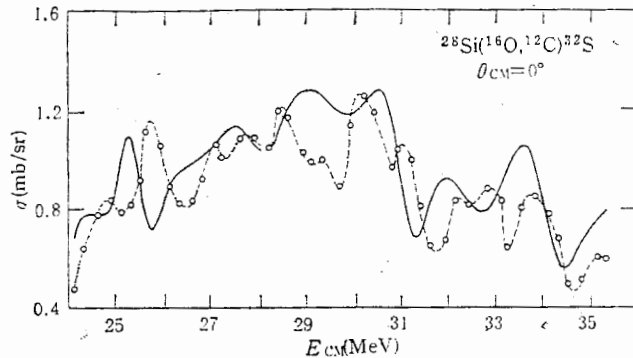


图 1 转移过程 $^{28}\text{Si}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{32}\text{S}$ 的激发函数, 圆圈是实验点, 实验数据转引自文献[8], 虚线是为了看清激发函数变化趋势而画出的. 实线是本文数值计算结果

了实验曲线中的共振结构. 另外文献[4]中在 DWBA 的基础上同时考虑分子态共振机制, 研究了另一 α 转移反应 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{28}\text{Si}$, 给出了与实验大致符合的激发函数, 但那里的理论不是从分子态的构造出发, 而是在散射振幅中引入 19 个孤立的共振极, 因此必须唯象地引入的参数达 43 个, 这还是不太理想的. 而我们这里通过分子态 LCNO 理论很自然地微观上给出直接势和交换势, 导出两个分子态的耦合方程. 理论上给出的直接势和交换势适当地体现了共振机制. 对于所研究的反应, 直接过程所对应的峰的宽度应该是 1—3 MeV, 而复合核共振宽度在 keV 数量级. 图 1 中共振峰的宽度在几百 keV 到 1 MeV 之间, 可以认为是直接过程和分子态中间过程的共同贡献. 这正是本文的理论基础. 本文在实际计算时共采用核核势与价粒子-核芯势参数共 18 个, 求解耦合方程所得截面是由几率流守恒出发导出, 因此计算结果是绝对值.

当然, 这里的理论计算结果与实验结果比较还有一些差别, 更精确的研究将有助于消除这些差别. 首先, 我们采用的光学势是唯象的, 由于涉及到一定的能量范围, 光学势采用了能量相关振幅. 光学势中的不确定因素给结果带来了影响. 其次, 采用绝热近似研究三体散射系统也可能给结果带来偏差. 关于这一点, 更仔细的研究可给出绝热近似下入射能量的上限:

$$E_{\max} \sim \frac{2}{5} A^{5/2} \varepsilon^2$$

其中 A 为碰撞核的折合质量数, ε 为分子态能级间隔, 本文涉及到的能量范围都非常好地满足这一条件. 可预期, 更精确的三体散射系统研究将给出高阶修正.

另外, 本文采用了两态近似, 只考虑了核分子的两个 σ 态, 而忽略了 π 态以上的激发态. 研究表明, 当忽略不同分子态之间的交迭, 耦合方程中的交换势将等于零. 因此, 本文实际上忽略了 σ 态与 π 、 δ 、 φ 等其它分子激发态之间的交迭. 尽管预期这些交迭都是小量, 但如果更多地考虑这些交迭, 也许能对理论计算结果有所改善. 我们以上采用的简单模型只是一个尝试, 在解释实验方面还有待更广泛更深入的研究.

参 考 文 献

- [2] M. Paul, S. J. Sanders, J. Cseh, D. F. Geesaman, W. Henning, D. G. Kovar, C. Olmer, and J. P. Schiffer, *Phys. Rev., Lett.*, **40**(1978), 1310.
- [3] C. K. Gelbke, T. Awes, U. E. P. Berg, J. Barrette, M. J. LeVine, and P. Braun-Munzinger, *Phys. Rev. Lett.*, **41**(1978), 1778.
- [4] S. J. Sanders, H. Ernst, W. Henning, C. Jachcinski, D. G. Rovar, J. P. Schiffer and J. Barrette, *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 1775.
- [5] P. Belery, et al., *Phys. Rev.*, **C23**(1981), 2503.
- [6] M. Paul, et al., *Phys. Rev.*, **C21**(1980), 1802.
- [7] M. C. Mermaz, *Phys. Rev.*, **C23**(1981), 755.
- [8] P. Braun-Munzinger, J. Barrette, *Phys. Rep.*, **87**(1982), 209.
- [9] W. von Oertzen, *Nucl. Phys.*, **A148**(1970), 529.
- [10] W. von Oertzen and W. Norenberg, *Nucl. Phys.*, **A207**(1973), 113.
- [11] W. von Oertzen and H. G. Bohlen, *Phys. Rep.*, **19C**(1975), 1.
- [12] Guo-zhu He, Chengqun Gao and Pingzhi Ning, *Phys. Rev.*, **C30**(1984), 534.
- [13] Chengqun Gao, Pingzhi Ning and Guozhu He, *Nucl. Phys.*, **A438**(1985), 281.
- [14] 宁平治、高成群、何国柱, 高能物理与核物理, **9**(1985), 101.
- [15] Lin-hua Xia, Cheng-qun Gao, Ping-zhi Ning and Guo-zhu He, *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 2128.

EXCITATION FUNCTION FOR α TRANSFER REACTION

WANG TAIFENG XIA LINHUA MIAO YUANJUN,

ZHOU QUANHUA JIN QINGHUA GAO CHENGQUN CAI CHONGHAI

(Nankai University, Tianjin)

ABSTRACT

The excitation function for α transfer reaction $^{28}\text{Si}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{32}\text{S}$ has been studied. A coupling channel theory with molecular states has been constructed with linear combination of nuclear orbits. The calculated result is in good agreement with experiment data and is much improved in comparing with the theory of distorted wave Born approximation.