

4N 核弹性碰撞的激发函数*

高成群 宁平治 于少英¹⁾ 何国柱
(南开大学, 天津)

摘 要

$^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 弹性碰撞的激发函数呈现出共振结构, 基于核分子轨道理论对共振结构进行了研究, 理论结果与实验数据很好的一致。

近年来, 实验发现两个相近质量的 4N 核弹性碰撞的激发函数呈现出共振结构, 例如 $^{20}\text{Ne}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})^{20}\text{Ne}$ ^[1] 弹性散射实验, 质心系能量在 20—40 MeV 能区 ($\theta_{\text{cm}} = 90^\circ$ 和 $154 \pm 2^\circ$) 微分截面连续出现了 3—4 个共振峰(参见图中的实验点)。这一现象单纯用通常的光学模型是难以解释的。Y. Kondo 等人^[2]采用改进的光学模型(Extended Optical Model)即在传统的光学势中唯象地引入宇称相关实势和与角动量相关的虚势, 满意地拟合了 $^{20}\text{Ne}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})^{20}\text{Ne}$ 在 $\theta_{\text{cm}} = 154^\circ \pm 2^\circ$ 角的激发函数曲线(见图中点线)。然而推广的光学模型尚未给出明确的物理图象, 宇称相关势和角动量相关势的引入也还带有某种人为的性质。

根据核分子轨道理论^[3-6], 具有相近质量的两个 4N 核在碰撞过程中的确存在着宇称相关力的作用, 该力来源于过程中构成准分子态的价 α 结团与核芯之间的相互作用。宇称相关力的存在使得价 α 结团在两个核芯之间发生转移, 这种转移不仅发生在核反应过程, 如 $^{16}\text{O}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{20}\text{Ne}$ 转移反应^[4]中, 而且也会发生在弹性过程中, 如 $^{20}\text{Ne}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{O})^{20}\text{Ne}$ 弹性散射过程。相近质量的两个 4N 核之间弹性散射的全角分布和激发函数都存在明显的结构就从实验上支持了这一看法。

根据 4N 核 α 结团模型, ^{20}Ne 核以相当大的几率处于 $^{16}\text{O} + \alpha$ 组态中^[7]。据此我们可以认为在 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 弹性散射过程中, 在适当的人射能量(稍高于库仑位垒)下, 就有可能形成 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} + \alpha$ 准分子态。这是因为适当的人射能量, 离心势、库仑势和两核之间的光学势迭加到一起可能形成一个有适当深度的势阱, 阱中有可能存在一个准束缚能级所致(见文献[6]中的势曲线图)。这就使得激发函数中呈现出共振结构。核分子轨道理论证明, 此时体系除受两核芯之间的核势 $V_{c_1 c_2}(R)$ 的作用外, 还受到直接势 $K(R)$ 和交换势 $J(R)$ 的作用^[8], 总势函数为:

$$V(R) = V_{c_1 c_2}(R) + K(R) + (-1)^L J(R), \quad (1)$$

式中 L 是相对运动轨道角动量。式右第三项 $(-1)^L J(R)$ 与体系的状态的宇称有关, 相当

* 本工作受到国家自然科学基金资助。

1) 永久住址: 内蒙民族师范学院。

本文 1988 年 2 月 15 日收到。

于改进的光学模型中唯象引入的宇称相关势。可见, 宇称相关势在核分子轨道理论中是自然出现的。

直接势和交换势的显式可写成:

$$K(R) = \langle \Phi_{c_1\alpha}(\mathbf{r}_1) | V_{c\alpha}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{R}) | \Phi_{c_1\alpha}(\mathbf{r}_1) \rangle, \quad (2)$$

$$J(R) = \langle \Phi_{c_1\alpha}(\mathbf{r}_1) | V_{c\alpha}(\mathbf{r}_1) | \Phi_{c_1\alpha}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{R}) \rangle, \quad (3)$$

其中 $\Phi_{c_1\alpha}$ 是价 α 结团束缚于第 i 个核芯 C_i 的核轨道波函数, $V_{c\alpha}$ 则是价 α 结团所受到的核芯 C 对它的作用。

在过去的处理中^[3,5], 人们往往是将(1)式中右端头两项看作为两碰撞核之间的相互作用势, 近似用一个六参数 Woods-Saxon 势来代替, 并不真正将 $K(R)$ 的积分求出。我们最近的一个工作^[4]和本文研究发现, 直接势在准分子态形成过程中和交换势一样也起着相当重要的作用。这一作用, 尤其在研究 4N 核碰撞的激发函数时显得更为突出, 若忽略直接势的影响, 单纯靠调节参数, 不能给出激发函数中呈现的各个共振峰结构。鉴于上述考虑, 为能解析积出式(2)和(3)我们对 $\Phi_{c\alpha}$ 采用了较为合理的独立 α 粒子模型波函数^[6]; 对 $V_{c\alpha}$ 采用了双高斯型势^[9], 即

$$\begin{aligned} \Phi_{c\alpha}(\mathbf{r}) &= \Phi(r) Y_{00}(\theta, \varphi) \\ &= \frac{1}{\sqrt{8\pi}} (a^6\pi)^{-1/4} \left[(2 - \sqrt{6}) + \sqrt{\frac{8}{3}} (r/a)^2 \right] \exp(-r^2/2a^2), \end{aligned} \quad (4)$$

$$V_{c\alpha}(r) = V_A \exp(-\mu_A r^2) + V_R \exp(-\mu_R r^2), \quad (5)$$

(5)式右端两项分别为双高斯型势的吸引项和排斥项。实验和理论研究表明^[6], 独立 α 结团在核内的平均势是一个具有软排斥芯的势阱, 因此要求(5)式的参数应满足 $V_A < 0$ 、 $V_R > 0$ 且 $|V_R| > |V_A|$ 以及 $\mu_A < \mu_R$ 的条件。由(2)–(5)式可以看出, 包含了直接势并没有增加任何新的调整参数, 然而由于顾及了直接势的影响, 势参数的数值将会略不同于不考虑其影响的情况。

在确定调整参数时, 本文采用了共振分波拟合法。Schimizu 等人^[1]使用 $P_L^2(\cos\theta)$ 与角分布比较的方法对 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 系统规定出 18^+ 分波的共振能量为 24.5 MeV (质心系) 但该方法有着 $\pm 1\hbar$ 的不确定性。为能较准确地确定出 18^+ 分波的共振能量, 最近 Hebbard 等人^[1]对 $\theta_{cm} = 90^\circ$ 的 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 弹性散射的激发函数进行了测量。 $\theta_{cm} = 90^\circ$ 的激发函数对偶分波共振是敏感的。按照偶分波共振的位置与 90° 激发函数中极小位置一一对应的关系, 要求理论计算的 16^+ 、 18^+ 和 20^+ 共振能量分别是或接近是 22.5、25.5 和 29.5 MeV (质心系)。Maher 等人^[10]在研究 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 碰撞时, 曾讨论了这种对应关系。

基于上述考虑, 两核芯光学势以适于 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 系统的 Woods-Saxon 型的 Gobbi 势^[11]为基础, 调整其实部的参数 a_V 和双高斯势的参数 V_A 、 V_R 、 μ_A 和 μ_R 以给出 16^+ 、 18^+ 和 20^+ 分波分别在 $E_{cm} = 22.5$ 、25.5 和 29.5 MeV 产生共振 (如图中箭头所示), 然后再调整 Gobbi 势参数 W 和 a_W 以拟合 90° 和 154° 的激发函数的实验数据。

本文在核分子轨道模型框架下(关于理论的细节参见文献[4–6])计算了 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 弹性散射激发函数, 理论计算结果以实线示于图中并与澳大利亚国立大学物理研究院核物理系提供的最新实验数据^[11]进行了比较。两个 ^{16}O 核芯的光学势和价 α 结团与 ^{16}O 核芯间的双高斯型势参数列于表 1 中。由图可以看出理论曲线与实验数据符合得相当好。图

例
和
目
通
ical
意
地
而
推
与
某

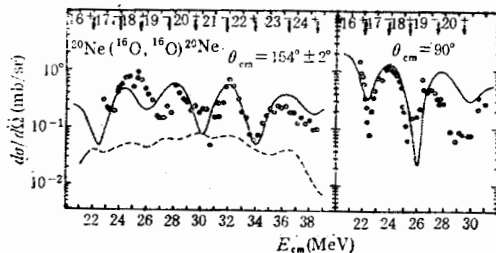
宇
称
宇
立
过
²⁰Ne
明
显

我
们
就
有
核
之
能
道
和
交

(1)
符
当

表1 核芯光学势和双高斯势参数

$V(\text{MeV})$	$r_V(\text{fm})$	$a_V(\text{fm})$	$W(\text{MeV})$	$r_W(\text{fm})$	$a_W(\text{fm})$	$r_c(\text{fm})$	$V_A(\text{MeV})$	$V_R(\text{MeV})$	$\mu_A(\text{fm}^{-2})$	$\mu_R(\text{fm}^{-2})$
17	1.35	0.46	$1.7 + 0.1E_{cm}$	1.27	0.35	1.25	-925	1182	0.31	0.35

图1 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 弹性散射在 $\theta_{cm} = 154^\circ$ 和 90° 的激发函数

中虚线是不考虑散射过程中准分子态的形成过程, 单纯光学模型计算结果, 由图可见, 传统光学模型难以给出共振结构。

在本文的研究工作中, 我们使用表1列出的同一组势参数还计算了 $E_{cm} = 24.5$ 、 27.9 、 31.7 、 32.1 、 33.0 和 35.5MeV 六种能量的 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 弹性散射角分布。计算结果给出了后角振荡上升的结构, 且振荡幅度与实验数据^[2] 大体一致, 从而 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 弹性散射微分截面呈现出的后角反常现象也得到了较为满意的解释。

综上所述可以做出以下结论: $4N$ 核弹性散射激发函数中的共振结构可以用核分子轨道模型来处理, 这在某种程度上支持了这类过程中存在着准分子态的观点。我们在相近质量的 $4N$ 核弹性碰撞过程中引入了准分子态的机制, 解释了 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 弹性散射的激发函数中呈现的共振结构, 从而表明将核分子轨道模型进而推广用来讨论弹性散射的激发函数有其一定的合理性并且能给人以清晰的物理图象。改进的光学模型^[2] 唯象引入的字称相关势在核分子轨道模型中赋予了明确的物理意义。

参 考 文 献

- [1] J. Schimizu, et al., *Phys. Lett.*, **112B**(1982), 323; D. F. Hebbard et al., "The $^{20}\text{Ne}(^{16}\text{O}^{16}\text{O})^{20}\text{Ne}$ Excitation Function at $\theta_{cm} = 90^\circ$ and Parity-Dependent Interactions", *Nucl. Phys.*, A 待发。
- [2] Y. Kondo, B. A. Robson and R. Smity, *Nucl. Phys.*, **A410**(1983), 289.
- [3] W. Von Oertzen and H. G. Bohlen, *Phys. Rep.*, **19C**(1975), 1.
- [4] 高成群, 何国柱, 高能物理与核物理, **11**(1987), 667.
- [5] C. Gao, P. Ning and G. He, *Nucl. Phys.*, **A438**(1985), 281.
- [6] L. Xia and G. He, *Phys. Rev.*, **C35**(1987), 1789.
- [7] Y. Fujiwara, et al., *Suppl. of Prog. Theor. Phys.*, **68**(1980), 29.
- [8] 李清润, 陈生忠, 赵恩广, 高能物理与核物理, **5**(1981), 531.
- [9] K. M. Khanna and M. L. Shabma, *Czech J. Phys.*, **B23**(1973), 295.
- [10] J. V. Maher, et al., *Phys. Rev.*, **188**(1969), 1665.
- [11] A. Gobbi, et al., *Phys. Rev.*, **C7**(1973), 30.

EXCITATION FUNCTION FOR ELASTIC COLLISION BETWEEN 4N NUCLEI

GAO CHENGQUN NING PINGZHI YU SHAOYING HE GUOZHU

(*Nankai University, Tianjing*)

ABSTRACT

Resonant structures appeared in the excitation functions for the $^{16}\text{O}+^{20}\text{Ne}$ elastic scattering have been studied by using the nuclear molecular orbital theory. The theoretical results agree well with the experimental data.

传

5、
给
射

子
相
的
入

ita