

在独立 α 集团模型下对敲出反应 $^{16}\text{O}(\text{p}, \text{p}\alpha)^{12}\text{C}$ 和 $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}$ 的研究*

陆 晓 孙小军 杨永栩

(广西师范大学物理与电子科学系 桂林 541004)

(2002 年 11 月 14 日收到 2002 年 12 月 22 日收到修改稿)

在独立 α 集团模型下,利用扭曲波冲量近似(DWIA),计算了实验室系下入射能量为 101.5MeV 的敲出反应 $^{16}\text{O}(\text{p}, \text{p}\alpha)^{12}\text{C}$ 和实验室系下入射能量分别为 90MeV 和 140MeV 的敲出反应 $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}$. 得到的反应截面和谱因子与实验数据基本符合,比用壳模型的结果有了一定的改进,表明独立 α 集团模型能较好地描述 α 集团敲出反应的机理.

关键词: α 集团模型, 敲出反应, 反应截面, 谱因子

PACC: 2410, 2160G

1. 引 言

利用敲出反应研究原子核的集团结构一直是人们感兴趣的课题,因为 α 粒子的敲出反应很好地反映了原子核的集团性质. 研究表明,敲出反应的计算结果对束缚在原子核中的 α 粒子波函数相当敏感. 在一些壳模型理论下^[1-4],认为 α 粒子被束缚在一个唯象的 Woods-Saxon 势阱中,入射粒子与原子核 $^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}$ 的相互作用也用唯象的 Woods-Saxon 势阱来描述,他们在敲出反应截面和两体弹性散射截面的计算与实验数据不容易都符合得好^[4]. 而独立 α 集团模型在描述 $^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}$ 的性质上是十分成功的^[5-7]. 根据李清润等提出的独立 α 集团模型^[5],对于质子和中子数都是偶数的轻原子核,可看成是由较稳定的 α 粒子组成. 假设核内 α 粒子受到核中其他 α 粒子的作用可用一个平均场来等效,同时把核内的 α 粒子当作是自旋为零的玻色子来处理. 按照这种模型,通过拟合电子散射实验,得到 α 粒子在核 $^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}$ 中的束缚态波函数 $\phi_\alpha(r)$. 利用 $\phi_\alpha(r)$ 和 $\text{p}-\alpha, \alpha-\alpha$ 基本相互作用求得 $\text{p}-^{16}\text{O}, \text{p}-^{12}\text{C}$ 以及 $\alpha-^{16}\text{O}, \alpha-^{12}\text{C}$ 的光学势. 它能很好地拟合质子 p 和 α 粒子与原子核 $^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}$ 的两体散射实验数据^[6,7].

本文主要讨论 $^{16}\text{O}(\text{p}, \text{p}\alpha)^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}$ 的敲

出反应. 从我们的计算结果来看,敲出反应的微分截面和谱因子与实验的符合都有所改进.

2. 敲出反应的理论计算

敲出反应 $A(a, ab)B$ 的反应过程为: 动量为 p_0 的入射粒子 a 轰击靶核 A , 从 A 中敲出被束缚的粒子 b 后,剩余核为 B . 根据散射理论可求得 $A(a, ab)B$ 反应的微分截面为

$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_a d\Omega_b dE_a} = KF \cdot \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{ab} |g_{fi}|^2, \quad (1)$$

其中 $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{ab}$ 为入射粒子 a 与被束缚粒子 b 的自由散射截面, KF 为运动学因子,可表示为

$$KF = \frac{k_a k_b^2 E_B E_{cm}^2}{(\hbar c)^3 k_0 E_b [E_B k_b - E_b (k_0 \cos\theta_b - k_a \cos\theta_{ab} - k_b)]'} \quad (2)$$

因子 g_{fi} 可表示为

$$g_{fi} = (2\pi)^3 \int \eta_{ab}^{(-)*}(\mathbf{k}_{ab}, \mathbf{r}) \eta_{bb}^{(-)*}(\mathbf{k}_{bb}, \mathbf{r}) \times \eta_{aa}^{(+)}(\mathbf{k}_{aa}, \mathbf{r}) \phi_b(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (3)$$

反应截面的形状和谱因子的大小主要由因子 g_{fi} 决定. 在扭曲波近似下,入射波函数 $\eta_{aa}^{(+)}$, 出射波函数 $\eta_{ab}^{(-)}, \eta_{bb}^{(-)}$ 可通过解光学势下的薛定谔方程得到. $\phi_b(\mathbf{r})$ 是被敲出粒子的束缚态波函数,对于 α 粒

* 国家自然科学基金(批准号:10062001,10147202)资助的课题.

子 我们采用李清润提出的独立 α 集团模型^[5], α 粒子在核¹⁶O, ¹²C 中的束缚态波函数为

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

对于¹⁶O 核, $a = 1.2\text{fm}$; 对于¹²C 核, $a = 1.0\text{fm}$.

利用 p- α 和 α - α 两体基本相互作用以及独立 α 集团模型下原子核¹⁶O, ¹²C 的波函数, 可以求得所需的光学势^[6,7]

$$V_{p-A}(r) = B_0 Q_0(r) + B_2 Q_2(r) + B_4 Q_4(r) + B_6 Q_6(r) + V_c(r), \quad (5)$$

$$V_{\alpha-A}(r) = N_r [V_0 \exp(-\mu r^2) \{ A_0 + A_2 r^2 + A_4 r^4 \} + i \frac{W_0}{1 + \exp\left(\frac{r - r_0 A^{1/3}}{a}\right)} + V_c(r), \quad (6)$$

其中 N_r 称为重整化因子, $V_c(r)$ 为库仑势. $V_{\alpha-A}(r)$ 的虚部取唯象的 Woods-Saxon 势, 其参数由拟合弹性散射的实验数据得到(见表 1). 如图 1 所示, 我们计算的 $\alpha + ^{16}\text{O}$, $\alpha + ^{12}\text{C}$ 的弹性散射微分截面与实验数据符合. $p + ^{16}\text{O}$, $p + ^{12}\text{C}$ 弹性散射微分截面的计算可参阅文献 [7].

表 1 $\alpha + ^{16}\text{O}$, $\alpha + ^{12}\text{C}$ 弹性散射的光学势参数

弹性散射	能量/MeV	N_r	W_0/MeV	r_0/fm	a/fm
$\alpha + ^{16}\text{O}$	146.0	0.62	-28.0	1.32	0.75
	80.7	0.70	-20.5	1.42	0.70
$\alpha + ^{12}\text{C}$	166.0	0.60	-41.8	1.23	0.58
	139.0	0.70	-38.8	1.30	0.58
	104.0	0.72	-33.8	1.30	0.59
	90.0	0.70	-25.8	1.30	0.63

3. 敲出反应的计算结果

我们在独立 α 集团模型下计算了在实验室系下入射能量 $T_0 = 101.5\text{MeV}$, 质子 p 和 α 粒子的出射角为 $\theta_p/\theta_{\alpha} = 70.0^\circ/44.9^\circ$ 的敲出反应 $^{16}\text{O}(p, p\alpha)^{12}\text{C}$, 以及敲出反应 $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}$ 分别在 $T_0 = 90\text{MeV}$, $\theta_{\alpha}/\theta_{\alpha} = 42^\circ/42^\circ$ 和 $T_0 = 140\text{MeV}$, $\theta_{\alpha}/\theta_{\alpha} = 43.16^\circ/43.16^\circ$ 下的微分截面(见图 2—图 4)及谱因子 S_{α} (见表 2). 同时我们还给出了其他文献在壳模型下得到的反应截面及其相应的谱因子 S_{α} .

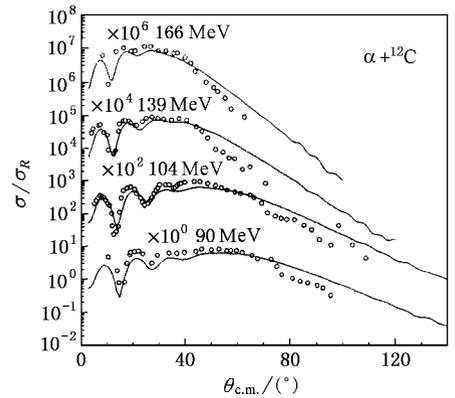
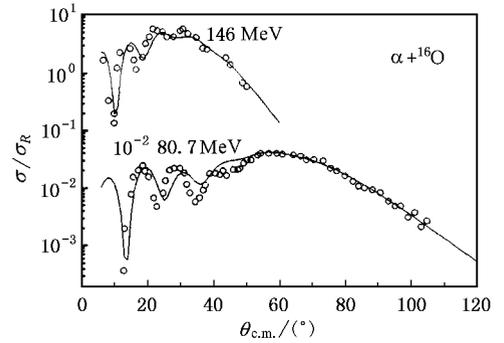


图 1 $\alpha + ^{16}\text{O}$ 和 $\alpha + ^{12}\text{C}$ 的弹性散射(实验数据取自文献 [11])

由于两体散射截面的离壳(off-shell)效应很小^[1], 故在计算中可用在壳(on-shell)的两体散射截面, 其数据直接取相应的实验值^[13,8]. 在实际的计算中, 取准自由散射点处反应截面计算值与实验值的比值为谱因子 S_{α} .

从图 2 看出, 在高动量区, 理论与实验符合得不太好, 这是由于像 $p + A \rightarrow p + A' \rightarrow p + \alpha + B$ 的次级过程造成的, 所以理论曲线低于实验点.

从图 3 A 看出, 敲出反应 $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}$ 的微分截面有振荡出现, 这是因为敲出反应中出射的两个 α 粒子是全同粒子. 由于全同粒子的对称性, 理论计算的微分截面就会出现振荡.

表 2 敲出反应 $^{16}\text{O}(p, p\alpha)^{12}\text{C}$, $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}$ 的谱因子

敲出反应	本文 S_{α}	壳模型 S_{α}	壳模型理论值 S_{α}^{101}	σ_{PW}/σ_{DW}
$^{16}\text{O}(p, p\alpha)^{12}\text{C}, T_0 = 101.5\text{MeV}$	0.9	1.15^{21}	0.23	33.3
$^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}, T_0 = 90\text{MeV}$	6.2	15^{11}	0.23	1240
$^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}, T_0 = 140\text{MeV}$	1.56	25^{31}	0.23	91.8

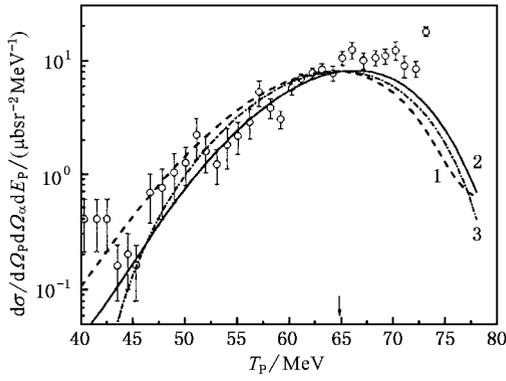


图 2 敲出反应 $^{16}\text{O}(\text{p}, \text{p}\alpha)^{12}\text{C}$, $T_0 = 101.5\text{MeV}$, $\theta_p/\theta_\alpha = 70.0^\circ/44.9^\circ$ (1 为文献[2]的结果, 2 为本文扭曲波冲量近似(DWIA)的结果, 3 为本文平面波冲量近似(PWIA)的结果, 实验数据取自文献[2])

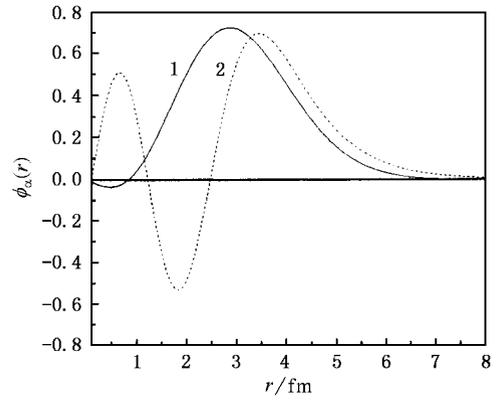


图 5 ^{16}O 中 α 粒子的束缚态波函数 (1 为独立 α 集团模型的波函数, 2 为壳模型的波函数)

4. 分析与结论

依照壳模型的理论, 敲出反应的谱因子 S_α 是反映靶核中 α 粒子的成团概率. 对于原子核 ^{16}O 壳模型的理论值是 $0.23^{[10]}$. 而壳模型下通过敲出反应计算出核 ^{16}O 的谱因子 S_α 远大于理论值(见表 2), 可见壳模型描述 α 粒子的敲出反应是不太好的. 在独立 α 集团模型下, 谱因子 S_α 的理论值为 1, 而我们的计算结果接近于这个理论值(见表 2).

比较两种模型下波函数的形状, 就可以发现独立 α 集团波函数的分布在核半径附近会有峰值出现(如图 5 所示), 而在核的内部区域波函数很小. 这反映了原子核 α 集团结构的表面定域性, 而壳模型波函数的分布则反映不出原子核的这种集团效应. 从计算的结果可以看出, 我们的反应截面和谱因子 S_α 比壳模型的结果有一定的改进, 说明独立 α 集团模型比壳模型更真实地刻划了原子核的集团运动状态.

从 $^{16}\text{O}(\text{p}, \text{p}\alpha)^{12}\text{C}$ 和 $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha 2\alpha)^{12}\text{C}$ 的计算结果可以看到扭曲效应是不可忽略的. 我们计算了 PWIA 近似与 DWIA 近似下微分截面之比 $\sigma_{\text{PW}}/\sigma_{\text{DW}}$ (见表 2), 可以看到 PWIA 的微分截面 σ_{PW} 比 DWIA 的微分截面 σ_{DW} 大得多. 尽管 PWIA 大体上也能给出反应截面的形状, 但它不能给出合理的谱因子 S_α . 所以只能用 PWIA 方法作一些粗略地分析, 较严格地分析必须采用 DWIA 方法. 另外, 谱因子的计算值与入射能量有关. 因为在低能时, 入射和出射态受到的扭曲效应较大, 一般用 DWIA 方法只取低级近似, 当扭曲

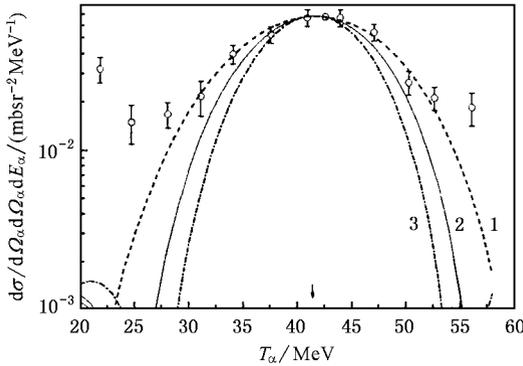


图 3 敲出反应 $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha 2\alpha)^{12}\text{C}$, $T_0 = 90\text{MeV}$, $\theta_\alpha/\theta_\alpha = 42^\circ/42^\circ$ (1 为本文 PWIA 的结果, 2 为本文 DWIA 的结果, 3 为文献[1]的结果, 实验数据取自文献[9])

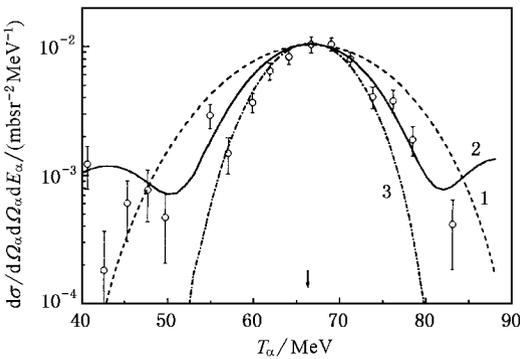


图 4 敲出反应 $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha 2\alpha)^{12}\text{C}$, $T_0 = 140\text{MeV}$, $\theta_\alpha/\theta_\alpha = 43.16^\circ/43.16^\circ$ (1 为本文 PWIA 的结果, 2 为本文 DWIA 的结果, 3 为文献[3]的结果, 实验数据取自文献[3])

效应较小时近似就较好.例如入射能量从 90MeV 提高到 140MeV 时,谱因子 S_{α} 由 6.2 变成 1.56.可见在能量较高时用 DWIA 计算谱因子 S_{α} 会更好,这与文献 [1] 的结论一致.相比之下,由于 p - α 的相互作用比 α - α 的相互作用弱,所以 $^{16}\text{O}(p, p\alpha)^{12}\text{C}$ 中的入射和出射态受到的扭曲作用比 $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}$ 的小,那么在较低的入射能量下计算 $^{16}\text{O}(p, p\alpha)^{12}\text{C}$ 的谱因子 S_{α} 也会较好.

另外,我们使用的光学势也是利用独立 α 集团模型得到的,它能够很好地拟合 $p + ^{16}\text{O}$, $p + ^{12}\text{C}$ 的弹

性散射截面^[7],以及 $\alpha + ^{16}\text{O}$, $\alpha + ^{12}\text{C}$ 弹性散射截面(如图 1 所示).而在壳模型下,用唯象的 Woods-Saxon 势就不能很好地拟合这些弹性散射的实验数据^[4].

从以上几个方面可以看出:对于具有较强集团结构特征的原子核 ^{16}O 和 ^{12}C 来说,独立 α 集团模型比壳模型更合理地描述敲出反应 $^{16}\text{O}(p, p\alpha)^{12}\text{C}$ 和 $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}$.

感谢中科院高能所李清润研究员对本工作的指导和建议.

- [1] Chant N S and Roos P G 1997 *Phys. Rev. C* **15** 57 69
 [2] Carey T A, Roos P G *et al* 1981 *Phys. Rev. C* **23** 576
 Carey T A, Roos P G *et al* 1984 *Phys. Rev. C* **29** 1273
 [3] Wang C W, Chant N S *et al* 1980 *Phys. Rev. C* **21** 1705
 [4] Jain A K and Sarma N 1979 *Nucl. Phys. A* **321** 429
 [5] Li Q R *et al* 1981 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **5** 531, 641 [in Chinese] 李清润等 1981 *高能物理与核物理* **5** 531, 641]

- Li Q R 1984 *Phys. Rev. C* **30** 1248
 [6] Li Q R and Yang Y X 1993 *Nucl. Phys. A* **561** 181
 [7] Li Q R *et al* 1991 *J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* **17** 663
 [8] Nadasen A *et al* 1978 *Phys. Rev. C* **18** 2793
 [9] Sherman J D, Hendrie D L *et al* 1976 *Phys. Rev. C* **13** 20
 [10] Kurath D 1973 *Phys. Rev. C* **7** 139
 [11] Khallaf S A E, Amary A M A *et al* 1997 *Phys. Rev. C* **56** 2093

Study on the $^{16}\text{O}(p, p\alpha)^{12}\text{C}$ and $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}$ knockout reactions according to the independent α -cluster model^{*}

Lu Xiao Sun Xiao-Jun Yang Yong-Xu

(Department of Physics and Electronic Science, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

(Received 14 November 2002; revised manuscript received 22 December 2002)

Abstract

According to the independent α -cluster model, the reaction cross sections and spectroscopic factors of the reactions $^{16}\text{O}(p, p\alpha)^{12}\text{C}$ and $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}$ at the energies of 101.5, 90 and 140 MeV have been calculated by means of distorted wave impulsion approximation. Reaction cross sections and spectroscopic factors calculated are in agreement with experimental data, and are better than the results by using shell model. This indicates that the independent α -cluster model can describe the mechanism of the reactions better.

Keywords: α -cluster model, knockout reaction, reaction cross section, spectroscopic factor

PACC: 2410, 2160G

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10062001 and 10147202).