

# 31.2MeV $\alpha$ 粒子在 $^{10,11}\text{B}$ 核上的反应 机制的 EFR-DWBA 分析

李盘林 李志良\* 孔祥傲

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

(\*上海科学技术大学数学系 上海 201800)

1993年8月14日收到

## 摘 要

利用 Mars-Saturn 程序对 31.2MeV  $\alpha$  粒子在  $^{10,11}\text{B}$  核上的反应机制进行了 EFR-DWBA 的分析。结果表明:对于反应  $^{10,11}\text{B}(\alpha, t_{0,i})^{11,12}\text{C}$ 、 $^{10}\text{B}(\alpha, d_{0,i})^{12}\text{C}_{0,i}$  和  $^{10}\text{B}(\alpha, p_0)^{13}\text{C}$  而言,直接的削裂反应是主要的;而对于反应  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}$ ,则是直接的削裂反应和重粒子削裂反应的非相干相加;对于  $^{11}\text{B}(\alpha, p_0)^{14}\text{C}$  反应,则是上述两种机制相加适合于前、后角区,两中间角区的峰表明复合核反应机制似乎也应考虑进去。

对于反应  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}$ 、 $^{10}\text{B}(\alpha, d_1)^{12}\text{C}^*$  和  $^{10}\text{B}(\alpha, p_0)^{13}\text{C}$ , 计算结果与实验值的符合情况还是比较满意的。

**关键词**  $\alpha$  粒子,核反应,EFR-DWBA 分析.

## 1 引 言

文献[6]指出,研究复杂粒子的核反应必须考虑扭曲波的有限程作用;应注意除削裂以外的各种反应机制的扭曲波计算。作为复杂粒子之一的  $\alpha$  粒子,当入射能量  $E_\alpha \leq 30\text{MeV}$  时,它在硼核上的反应机制人们已作过系统性的研究<sup>[1-3]</sup>。文章指出,背角区的截面反常很明显,这种反常特性是随着  $\alpha$  粒子轰击能量的上升而衰减的,因此研究  $\alpha$  粒子在硼核上的反应机制时,不仅要考虑直接的削裂反应,而且也应考虑交换过程;采用同样的计算程序框架,只要改变入射粒子和靶核的相互作用,把  $A(a, b)B$  写成  $a(A, b)B$  就可用来计算交换过程。本工作就是用 EFR-DWBA 方法对入射能量为 31.2MeV 的  $\alpha$  粒子在硼核上的反应:  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}$  和  $^{11}\text{B}(\alpha, p_0)^{14}\text{C}$  的 8 个角分布谱<sup>[4]</sup>作了反应机制的理论分析。

## 2 理论公式

关于基本公式的推导过程详见文献[5]。本文采用的计算程序 Mars-Saturn 主要包

括两大部分,简要介绍如下:

(1) Saturn 主要用于计算核束缚态中粒子相互作用的波函数,然后通过积分求得形状因子:

$$F_{l_a, l_b}^{j l_a A_a B_b}(r_a, r_b) = \sum_{l_1, n_1, l_2, n_2} d_{l_1, n_1, l_2, n_2}^{j l_a A_a B_b} \sum_k \left[ \sum_{A_{12}} r_a^{A_{12}} r_b^{l_1 + l_2 - A_{12}} \right. \\ \times \sum_{A_a A_b} \{CFAC(\Lambda_a \Lambda_b; \Lambda_{12}; l_1 l_2 l) \cdot GEOK(\Lambda_a \Lambda_b; l_a l_b; k l_1 l_2 l)\} \\ \left. \times G_k^{l_1 n_1 l_2 n_2}(r_a, r_b) \right] \quad (1)$$

其中,  $CFAC$  是几何因子,其表达式为:

$$CFAC(\Lambda_a \Lambda_b; l_1 l_2 l) = \sum_{\lambda_1 \lambda_2} \delta_{\lambda_1 + \lambda_2, \Lambda_{12}} D_{l_1 \lambda_1 \lambda'} D_{l_2 \lambda_2 \lambda'} s_1^{l_1} s_2^{l_2} t_1^{l_1} t_2^{l_2} \\ \times \hat{\lambda}_1 \cdot \hat{\lambda}_2 \cdot \hat{\lambda}'_1 \cdot \hat{\lambda}'_2 \cdot \hat{l}_1 \cdot \hat{l}_2 \cdot \hat{\Lambda}_a \cdot \hat{\Lambda}_b(\lambda_1 0 \lambda_2 0 | \lambda_a 0)(\lambda'_1 0 \lambda'_2 0 | \Lambda_b 0) \\ \times \begin{Bmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \Lambda_a \\ \lambda'_1 & \lambda'_2 & \Lambda_b \\ l_1 & l_2 & l \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

该式中的:

$$D_{l \lambda \lambda'} = \delta_{\lambda + \lambda', l} [(2l + 1)! / (2\lambda + 1)!(2\lambda' + 1)!]^{1/2}; \\ \hat{\lambda} = (2\lambda + 1)^{1/2}.$$

因子

$$GEOK(\Lambda_a \Lambda_b; l_a l_b; k; l_1 l_2 l) = \frac{1}{2} \cdot i^{(l_1 + l_2) - (l_a + l_b)} (-)^{k+l} \cdot (2k + 1) \\ \cdot (\Lambda_a 0 k 0 | l_a 0)(\Lambda_b 0 k 0 | l_b 0) \cdot W(l_a \Lambda_a l_b \Lambda_b; k l), \quad (3)$$

$$d_{l_1, n_1, l_2, n_2}^{j l_a A_a B_b} = C_{l_1 > l, l_1, n_1}^{(1)} \cdot C_{l_2 > l, l_2, n_2}^{(2)} \cdot (-)^{l_1 + l_2 - l} \cdot W(l_1 l_2; s; l l_x), \quad (4)$$

积分核为:

$$G_k^{l_1 n_1 l_2 n_2}(r_a, r_b) = \int_{-1}^1 W_{l_1, n_1}(r_1) \cdot W_{l_2, n_2}(r_2) P_k(\mu) d\mu, \quad (5)$$

其中  $\mu$  是  $r$  与  $r'$  ( $=r_{xb}$ ) 之间的方向余弦。

上述公式主要描述  $A(a, b)B$  和  $a(A, b)B$  反应, 可把  $a, b$  或  $A, b$  分别认为入射粒子与飞出粒子。在直接削裂反应中, 设  $a = x + b$ ,  $B = x + A$ ; 而在重粒子削裂反应中, 则设  $A = x + b$ ,  $B = x + a$ 。一系列的雅可比坐标变换详见文献[5, 6]。

(2) Mars, 用以计算反应截面。它是建立在前面形状因子计算结果的基础上的, 截面公式表为:

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = C_1^2 S_1 C_2^2 S_2 \cdot \frac{\mu_a \mu_b}{(2\pi\hbar^2)^2} \cdot \frac{K_b}{K_a} \cdot \frac{(2l_> + 1)(2S_> + 1)}{(2l_A + 1)(2S_A + 1)} \cdot \left( \frac{4\pi}{K_a K_b} \right)^2 \\ \times \sum_{j l_1 m_1} \left| \sum_{l_a' l_b'} (-)^{l_b + m_1} \cdot \hat{l}_a \cdot \hat{l}_b (l_a 0 l_b m_1 | l m_1) l_{l_a l_b}^j \cdot G_{l_b - m_1} \cdot P_{l_b m_1}(\theta) \right|^2. \quad (6)$$

对于 EFR-DWBA 的形状因子  $l_{l_a l_b}^j$  应写成如下形式:

$$l_{l_a l_b}^j = J \iint \chi_{l_b}^{j-} (K_b, r_b) F_{l_a l_b}^{j l_a A_a B_b}(r_a, r_b) \chi_{l_a}^{j+} (K_a, r_a) r_a r_b dr_a dr_b,$$

(6)式中的  $G_{lm}$  为:

$$G_{lm} = (-)^{(m-|m|)/2} \cdot [(l - |m|)!]^{1/2}. \quad (7)$$

在单核子或多核子(集团近似下)转移反应中有:

$$C_i^{\dagger} S_i = C^{(i)*},$$

若取  $C^{(1)} = C^{(2)} = 1$ , 则(7)式等同于(1)式. 对于削裂反应的雅可比  $J = (aB/xT)^3$ . 本程序中还包括考虑无反冲形状因子的计算, 在此不再赘述, 详见文献[5,7].

### 3 计算结果与讨论

众所周知,  $\alpha$  粒子在  $1p$  壳核上所引起的反应机制不外乎有四种<sup>[6]</sup>. 直接削裂反应中包含两种, 一是集团削裂, 另一是重置换; 在交换反应中一是重粒子削裂, 另一是一般置换. 由于本程序的矩阵元是由依赖于雅可比坐标关系的势确定的, 不依赖于相对运动波函数, 所以本程序不能考虑重置换和一般置换机制的计算, 但可以考虑重粒子削裂反应的计算, 因为  $b$  与  $x$  在  $A$  核中的相互作用势具有在  $a$  中同样的坐标依赖关系. 同时在三体框架下, 直接与交换过程彼此不相关, 它们之间的相干也不会发生. 所以我们在实验基础上分别考虑直接削裂和重粒子削裂计算, 然后进行非相干性相加. 在重粒子削裂过程其角度刚好反过来, 即  $\theta^* = \pi - \theta$ ,  $\theta^*$  是重粒子削裂分布角度.

我们与上海科大数学系合作, 首先把 EFR-DWBA 计算程序 Mars-Saturn 在 HP 超级微机上成功地进行移植, 并对标准数据进行可靠性检验计算. 然后对  $^{11,10}\text{B}(\alpha, t_{0,1})^{12,11}\text{C}$  的单粒子转移反应进行计算, 光学势参数取自文献[2], 附录于表 1, 计算结果示于图 1 中. 在计算时, 适当调节光学势的虚部, 以期更好地符合实验数据. 计算结果表明, 理论计算和实验值的符合是颇令人满意的; 结果也表明直接削裂反应机制是主要的. 当然中间局部角度区稍有分歧, 这可能是由于直接削裂机制中只考虑削裂而未计入重置换的结果所致, 或许可能还有别的机制, 比如少量的复合核机制?

在  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}$  和  $^{10}\text{B}(\alpha, d_0)^{12}\text{C}$  的计算中, 可以看到  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}$  反应的角分布中出现后角区截面明显反常, 因此在计算中除考虑直接过程的一般削裂机制外, 还必须考虑交换过程, 所以我们分别计算了直接削裂和重粒子削裂的转移反应, 计算结果示于图 2 中. 它表明了直接削裂和重粒子削裂的非相干性相加的反应截面与实验结果符合得很

表 1 用于计算的光学势参数

| 道                           | 出射粒子      | $V_0$<br>(MeV) | $r_0$<br>(fm) | $a_0$<br>(fm) | $W$<br>(MeV) | $r_w$<br>(fm) | $a_w$<br>(fm) | $r_c$<br>(fm) | 参考文献 |
|-----------------------------|-----------|----------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|------|
| $^{11,10}\text{B} + \alpha$ | $\alpha$  | 212            | 1.37          | 0.52          | 4.83<br>9.00 | 1.70          | 0.52          | 1.30          | [2]  |
| $t + ^{12}\text{C}_{0,1}$   | $t_{0,1}$ | 133.3          | 1.13          | 0.686         | 15.60        | 1.75          | 0.760         | 1.3           | [3]  |
| $t + ^{11}\text{C}_0$       | $t_0$     | 160.5          | 1.40          | 0.626         | 17.60        | 1.40          | 0.626         | 1.25          | [2]  |
| $d + ^{13}\text{C}$         | $d_0$     | 114.0          | 1.60          | 0.600         | 10.00        | 1.60          | 0.600         | 1.30          | [2]  |
| $d + ^{12}\text{C}_{0,1}$   | $d_{0,1}$ | 106.5          | 1.60          | 0.600         | 10.00        | 1.60          | 0.600         | 1.30          | [3]  |
| $p + ^{14}\text{C}$         | $p_0$     | 46.0           | 1.31          | 0.620         | 10.50        | 1.31          | 0.620         | 1.30          | [7]  |
| $p + ^{13}\text{C}$         | $p_0$     | 62.4           | 1.52          | 0.680         | 7.20         | 1.52          | 0.680         | 1.30          | [7]  |

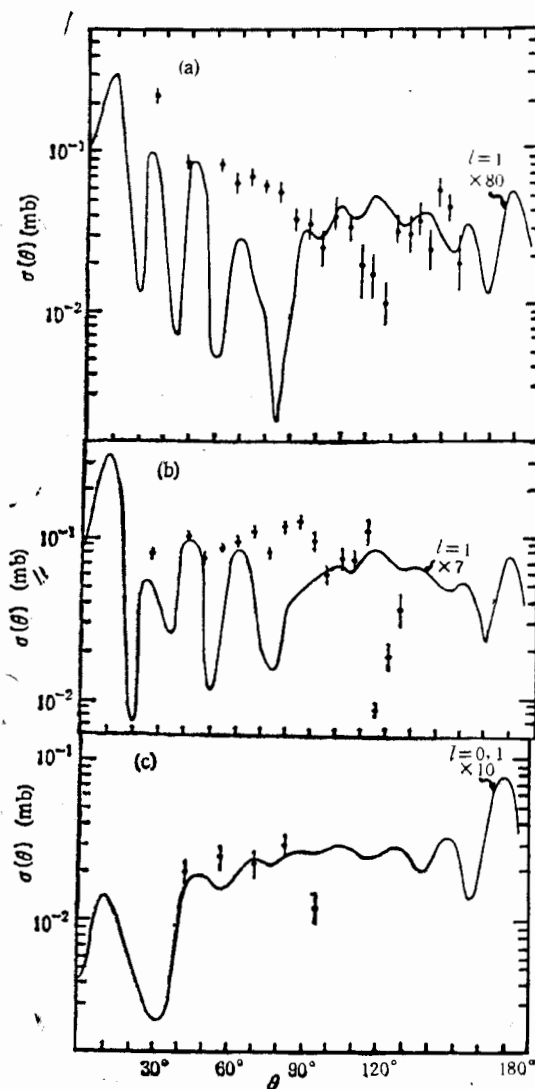


图1 (a)  $\frac{1}{2}^- \text{B}(\alpha, t_0) {}_{12}^{\text{C}}_{\text{s.r.}}$  反应的角分布  
 (b)  $\frac{3}{2}^- \text{B}(\alpha, t_1) {}_{12}^{\text{C}}_{\text{III}}$  反应的角分布  
 (c)  $\frac{10}{3}^+ \text{B}(\alpha, t_0) {}_{13}^{\text{C}}$  反应的角分布

好。在反应  ${}^{10}\text{B}(\alpha, d_0){}^{12}\text{C}$  中除了可以看出直接机制是主要的外，就  $50^\circ$  附近的峰的形状看来似乎还必须考虑别的机制，比如重置换或一般置换的机制，因本程序的限制而未被计入。但在反应  ${}^{10}\text{B}(\alpha, d_1){}^{12}\text{C}^*$  中则仅有直接削裂机制。

对于  ${}^{11}\text{B}(\alpha, p_0){}^{14}\text{C}$  反应，我们进行了直接削裂和重粒子削裂机制的非相干性相加的计算，其结果对前、后角区的截面与实验测量值符合得颇为满意，而在  $80^\circ - 130^\circ$  角区分布峰的形状表明，复合核形成机制应予以相当重视。这说明在  ${}^{11}\text{B}(\alpha, p_0){}^{14}\text{C}$  反应中三核子转移机制的复杂性。在  ${}^{10}\text{B}(\alpha, p_0){}^{13}\text{C}$  反应中，则表明直接削裂机制是唯一的机制。另外，比较  ${}^{11}\text{B}(\alpha, d_0){}^{13}\text{C}$  与  ${}^{11}\text{B}(\alpha, p_0){}^{14}\text{C}$  的反应截面角分布，就其在后角区的反常而言，前

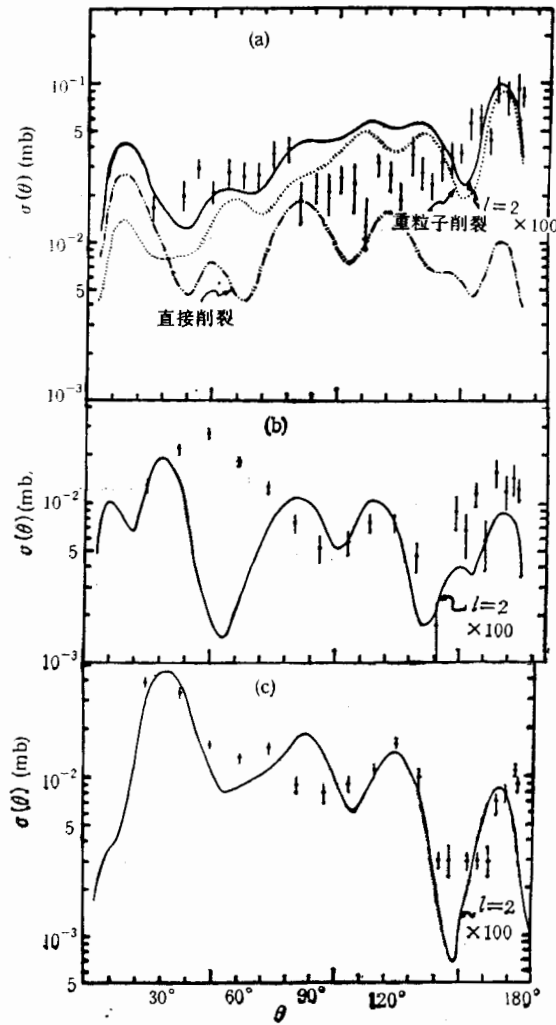


图 2 (a)  $^{11}_2\text{B}(\alpha, d_0)^{12}_6\text{C}$  反应的角分布  
 (b)  $^{10}_3\text{B}(\alpha, d_0)^{11}_5\text{C}$  反应的角分布  
 (c)  $^{10}_3\text{B}(\alpha, d_1)^{11}_5\text{C}$  反应的角分布

者强于后者,似乎给我们这样一个启示:从重粒子削裂机制及与之紧密相关的、靶核的集团分离能来看,尽管后者的分离能小于前者,但从靶核的集团结构特征来看, $^{11}\text{B} \rightarrow d + ^9\text{Be}$  的几率较  $^{11}\text{B} \rightarrow p + ^{10}\text{Be}$  的几率大,正由于这一点才促使交换过程中  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{12}\text{C}$  后角的截面反常比  $^{11}\text{B}(\alpha, p_0)^{11}\text{C}$  明显。另外,在  $^{11}\text{B}(\alpha, p_0)^{11}\text{C}$  的反应中,中间角区突起峰的形状表明  $p_0$  出自复合核形成机制也占相当可观的份额。

关于双核子或三核子转移的计算中,光学参数取自文献[2,3],并对其中的某些几何参数作了适当的调节以符合实验数据,所取之参数均列于表1与表2中。绝对截面值除单核子转移有能谱因子可查外,对双核子和三核子转移的能谱因子尚无查处;本程序亦未包含多核子转移的能谱因子的计算模块,故我们都以角分布第三峰值归一,总的归一化因

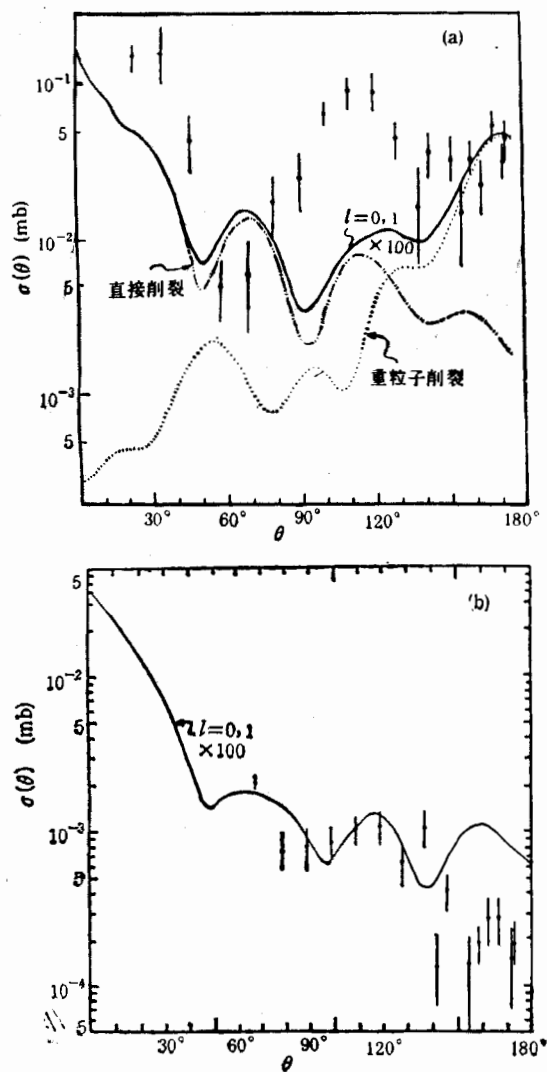


图3 (a)  $\frac{1}{2}^- \text{B}(\alpha, p_0)_{0+}^{14}\text{C}$  反应的角分布  
(b)  $\frac{3}{2}^- \text{B}(\alpha, p_0)_{0+}^{14}\text{C}$  反应的角分布

子均标于相应的图中。该归一化因子中包含有能谱因子，然其数值之大，可能与以下诸因素相关：

(1) 由于在计算束缚态波函数时，在相应能量下没有取得合理的弹散光学参数，因而对波函数的计算有一定的影响。

(2) 如文中所述，在计算直接反应及交换过程时，由于程序的限制没有计入重置换及一般置换机制，这对  $\alpha$  粒子等复杂粒子所引起的反应截面可能有着重要的影响。

(3) 角分布峰谷情况的差异说明可能还有别的机制，如复合核形成机制亦不可忽视。

以上情况都对截面的绝对值产生着一定的影响。因而在此称之为归一化因子，它既含

表 2 束缚态和两集团间相互作用势参数

|                             | $\varepsilon_0(\text{MeV})$ | $r_0(\text{fm})$ | $a_0(\text{fm})$ | $V_0(\text{MeV})$ | $W(\text{MeV})$ | $r_w(\text{fm})$ | $a_w(\text{fm})$ | $r_c(\text{fm})$ |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| $\alpha + {}^9\text{Be}$    | -10.646                     | 1.500            | 0.600            | 19.980            | 8.700           | 1.500            | 0.600            | 1.300            |
| $\alpha + {}^{10}\text{Be}$ | -12.011                     | 1.500            | 0.600            | 21.434            | 7.700           | 1.500            | 0.600            | 1.300            |
| $d + {}^9\text{Be}$         | -15.815                     | 1.470            | 0.670            | 29.972            | 8.000           | 1.470            | 0.670            | 1.300            |
| $p + {}^{10}\text{Be}$      | -11.228                     | 1.200            | 0.650            | 41.589            | 7.700           | 1.200            | 0.620            | 1.300            |
| $t + {}^{11}\text{Be}$      | -18.784                     | 1.400            | 0.700            |                   |                 |                  |                  |                  |
| $t + {}^{10}\text{B}$       | -23.875                     | 1.400            | 0.700            |                   |                 |                  |                  |                  |
| $d + {}^{11}\text{B}$       | -18.619                     | 1.300            | 0.500            |                   |                 |                  |                  |                  |
| $d + {}^{10}\text{B}$       | -25.186                     | 1.300            | 0.500            | 41.075            | 7.700           | 1.300            | 0.500            | 1.300            |
| $p + {}^{11}\text{B}$       | -15.957                     | 1.200            | 0.630            | 47.200            | 7.700           | 1.200            | 0.630            | 1.300            |
|                             | -11.720                     | 1.090            | 0.590            | 47.317            | 7.790           | 0.980            | 0.570            | 1.290            |
| $p + {}^{10}\text{B}$       | -8.690                      | 1.200            | 0.630            | 34.243            | 7.700           | 1.200            | 0.630            | 1.300            |
| $t + p$                     | -19.814                     | 1.150            | 0.200            | 72.121            | 7.700           | 1.150            | 0.200            | 1.200            |
| $d + d$                     | -23.848                     | 1.260            | 0.800            | 64.747            | 7.700           | 1.260            | 0.800            | 1.300            |

有能谱因子,又含有光学参数选择的不确定性及复杂机制的未计入的因素。

## 4 结 论

EFR-DWBA 方法对 31.2MeV  $\alpha$  粒子在硼核上的反应机制的分析,给出了半定量的结果;计算结果与实验数据得到满意的符合。分析表明,在反应  $^{11,10}\text{B}(\alpha, t_{0,1})^{12,11}\text{C}_{0,1}$ 、 $^{10}\text{B}(\alpha, d_{0,1})^{12}\text{C}_{0,1}$  和  $^{10}\text{B}(\alpha, p_0)^{13}\text{C}$  中,直接削裂机制是主要的,甚至是唯一的。对于  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}$  反应则为直接削裂和重粒子削裂的非相干性相加的结果。而  $^{11}\text{B}(\alpha, p_0)^{14}\text{C}$  反应中,直接削裂和重粒子削裂机制非相干性相加的计算结果能与前、后角区截面分布的实验值较好地符合,只有适当考虑复合核机制,才可能理解  $80^\circ-130^\circ$  角区截面分布峰的结构。总之,对反应  $^{10}\text{B}(\alpha, d_1)^{12}\text{C}^*$ 、 $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}$  和  $^{10}\text{B}(\alpha, p_0)^{13}\text{C}$ , 理论计算与实验数据的符合很令人满意。

## 参 考 文 献

- [1] Т. Л. Беляева и др., *Ядерная Физика*, т. 35(1982) с. 1936.
- [2] О. И. Васильева и др., *Изв. АН СССР Сер. Физ.*, т. 47(1983) с. 2248.
- [3] Т. Л. Беляева, *Изв. АН СССР Сер. Физ.*, т. 48(1984) с. 383.
- [4] 孔祥傲等, *高能物理与核物理*, 8(1984)199.
- [5] T. Tamura and K. S. Low, *Computer Phys. Communications*, 8 (1974)349.
- [6] И. С. Зеленская и др. *ЭИЯЯ*, т. 11(1980) с. 343.
- [7] C. M. Perey and F. G. Perey, *Atomic Data and Nucl. Data Table*, 17(1976)2.

## EFR-DWBA Analysis of $\alpha$ -Particle Induced Reactions on Nuclei $^{10,11}\text{B}$ at 31.2 MeV

Li Panlin Li Zhiliang\* Kong Xiangjing

(*Institute of Nuclear Research, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(\**Department of Mathematics, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800*)

Received on August 14, 1993

### Abstract

The data of  $\alpha$ -particle induced reactions on  $^{10,11}\text{B}$  at 31.2 MeV have been analyzed by using the program MARS-SATURN EFR-DWBA method. The results are shown that direct stripping reactions are the main reaction mechanism in most of  $^{10,11}\text{B}(\alpha, x)^*\text{C}$  reactions. However, there is direct stripping plus heavy particle stripping in the reactions  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}$  and  $^{11}\text{B}(\alpha, p_0)^{14}\text{C}$ . In addition, the mechanism of compound nucleus seems to be taken into account for the peak of intermediate angular region in the reaction  $^{11}\text{B}(\alpha, p_0)^{14}\text{C}$ . Finally, the agreement between theoretical calculation and experimental data is satisfactory in those reactions:  $^{10}\text{B}(\alpha, p_0)^{13}\text{C}$ ,  $^{10}\text{B}(\alpha, d_1)^{12}\text{C}^*$  and  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}$ .

**Key words**  $\alpha$ -particle, nuclear reactions, EFR-DWBA analysis.