

## 31.2 MeV $\alpha$ 粒子在 B 核上的 $(\alpha, t)$ 、 $(\alpha, d)$ 和 $(\alpha, p)$ 反应的研究

孔祥傲 谢贤亮 孙重文

(中国科学院原子核研究所)

### 摘 要

我们用粒子鉴别系统测量了 31.2 MeV 的  $\alpha$  粒子在  $^{11,10}\text{B}$  核上的  $(\alpha, t)$ 、 $(\alpha, d)$ 、和  $(\alpha, p)$  反应的角分布;由出射粒子的能谱,我们分别得到了剩余核处于基态和不同激发态的十个角分布.从角分布的形状看,在  $^{11}\text{B}(\alpha, t_0)^{12}\text{C}_{g.s.}$ ,  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}_{g.s.}$ ,  $^{10}\text{B}(\alpha, d_0)^{12}\text{C}_{g.s.}$ ,  $^{10}\text{B}(\alpha, d_1)^{12}\text{C}_{1st}$ ,  $^{11}\text{B}(\alpha, p_0)^{14}\text{C}_{g.s.}$  等反应中均有不同程度的后角上翘;并且  $(\alpha, t_0)$  和  $(\alpha, p_0)$  的后角上翘的同位素效应似乎与  $(\alpha, \alpha)$  的反常散射的同位素效应相反.

最后,我们采用了直接核反应的色散关系理论,用费曼顶点图和顶三角图解,计算了奇点位置,定性地讨论了其主要反应机制,我们得出的初步结论是:在前角区主要是直接削裂,在后角区则是重粒子削裂的交换机制.而  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}_{g.s.}$  的后角区却是多种反应机制的叠加结果.

### 一、引 言

近年来已有很多工作,不仅研究  $\alpha$  粒子在轻核上的弹性散射的大角反常现象,而且还研究  $\alpha$  粒子在轻核上,尤其是在  $1p$  壳核上各反应道的大角微分截面的上翘现象.因为它反映了  $\alpha$  粒子在轻核上反应的特有性质.这方面的详细评论可参阅 И. Б. Теплов и др.<sup>[1]</sup> 的文章.尽管目前已有许多这方面的研究工作,但对其反应机制还不太清楚;其规律性也不如弹性散射大角反常现象那样明显;实验数据也不系统,不完整.就以  $\alpha$  粒子在 B 核上的  $(\alpha, p)$ 、 $(\alpha, d)$ 、 $(\alpha, t)$  的研究来说,虽有几个工作<sup>[2-7]</sup>,但入射能量只到 26 MeV,在更高的能区,则数据十分贫乏,只有 46 MeV 一点.所以,很难探究反应机制与能量的依赖关系,更看不出同一能量下各反应道之间的关联以及与靶核结构的关联.因而必须进行更多的实验研究,使数据日趋丰富.

本工作是在我们已研究过的  $\alpha$  粒子在 B 核上的弹性散射大角反常一文<sup>[8]</sup>的基础上,进一步扩展到对  $\alpha + \text{B}$  其它反应道的系统研究;在此,我们一方面是研究其反应机制,另一方面是试图探求弹性散射反常机制与其它反应道之间的关联信息.

## 二、实验描述

31.2 MeV 的  $\alpha$  粒子是从本所增强了磁场强度的 1.2m 迴旋加速器引出, 送到 1.6m 直径的大靶室. 靶是由本室制靶组制备的. 靶有两种: 一是将天然丰度的  $^{11}\text{B}$  (80.2%) 真空蒸发成厚  $121.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  的无衬底靶. 另一种是将浓缩度为 90% 的同位素  $^{10}\text{B}$  磨成很细的粉末, 溶解于有机溶剂中, 然后用微型喷雾器喷溅在厚度为  $230 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  的 Au 衬底上, 制成厚为  $1.2 \text{mg}/\text{cm}^2$  的  $^{10}\text{B}$  靶, 然后高温处理, 使有机溶剂挥发掉. 核反应出射粒子被立体望远镜探测; 立体望远镜是由  $\Delta E$  ( $\sim 91 \mu$  全耗尽层面垒型探头) 和  $E$  探测器 (分别为 3mm 高阻钽-硅面垒型探头及 5mm 的 Si(Li) 探头) 组成, 详见 [9]. 整个粒子鉴别系统能够可靠地同时鉴别  $p$ 、 $d$  和  $t$ . 绝对截面归一到  $\alpha + \text{Au}$  在  $20^\circ$  处的库仑散射截面. 截面的绝对精度分别为:

$$^{11}\text{B}(\alpha, p)^{14}\text{C} \sim 42\%; \quad ^{10}\text{B}(\alpha, p)^{13}\text{C} \sim 36\%; \quad ^{11}\text{B}(\alpha, d)^{13}\text{C} \sim 24\%;$$

$$^{10}\text{B}(\alpha, d)^{12}\text{C} \sim 18\%; \quad ^{11}\text{B}(\alpha, t)^{12}\text{C} \sim 22\%.$$

误差的主要来源是统计误差和靶厚的不确定性.

## 三、实验结果与讨论

$(\alpha, p)$ 、 $(\alpha, d)$  和  $(\alpha, t)$  的实验能谱示于图 (1) 中.

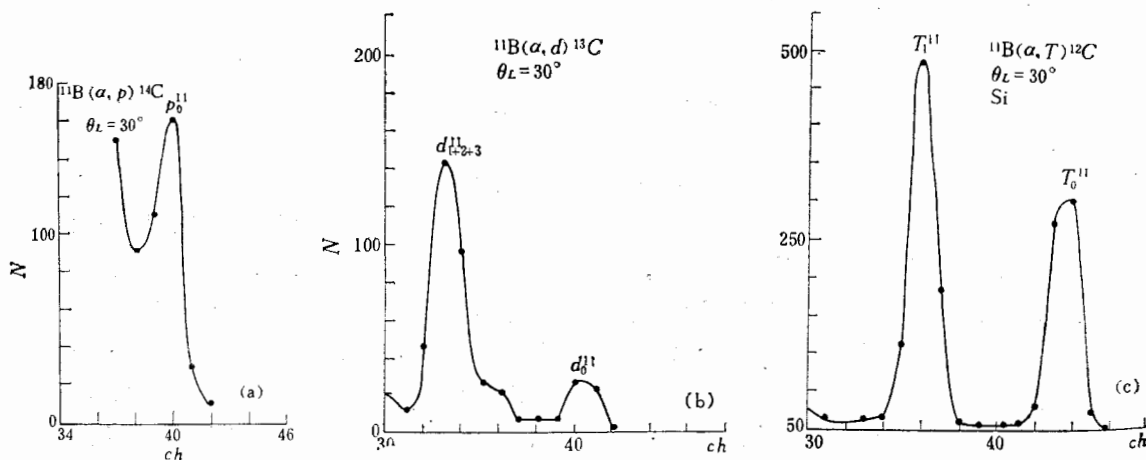


图 1 (a)  $^{11}\text{B}(\alpha, p)^{14}\text{C}$  的能谱

(b)  $^{10}\text{B}(\alpha, d)^{12}\text{C}$  的能谱

(c)  $^{11}\text{B}(\alpha, t)^{12}\text{C}$  的能谱

### 1. $^{10}\text{B}(\alpha, t)^{11}\text{C}$ ; $^{11}\text{B}(\alpha, t)^{12}\text{C}$ 反应

图 (2) 所示的是  $^{10}\text{B}(\alpha, t)^{11}\text{C}$  和  $^{11}\text{B}(\alpha, t)^{12}\text{C}$  反应的角分布. 而其中 (a) 图的右上角则是  $^{10}\text{B}(\alpha, t_0)^{11}\text{C}_{g.s.}$  的角分布,  $\theta \geq 70^\circ$  时就测不出了. (a) 图本身则是  $^{11}\text{B}(\alpha, t_0)^{12}\text{C}_{g.s.}$  的角分布. (b) 图是  $^{11}\text{B}(\alpha, t_1)^{12}\text{C}_{i.s.}$  的角分布. 它们都是在  $\theta > 90^\circ$  后略有上翘. 为了说明

$^{11}\text{B}(\alpha, t)^{12}\text{C}$  及  $^{10}\text{B}(\alpha, t)^{11}\text{C}$  反应机制的差异. 首先注意到  $^{10}\text{B}(\alpha, t)^{11}\text{C}$  的  $Q = -11$  MeV, 而  $^{11}\text{B}(\alpha, t)^{12}\text{C}$  的  $Q = -4$  MeV. 对于 31.2 MeV 的  $\alpha$  粒子在这些核上的反应机制方面, 由于反应  $Q$  值不同, 必然会有影响. 从角分布的形状来看, 两者在前角区均是向前峰, 说明它们在该角区基本上都是直接削裂机制; 但是  $^{11}\text{B}(\alpha, t)^{12}\text{C}$  在  $90^\circ$  后上翘, 这说明多少带有重粒子削裂的交换机制.

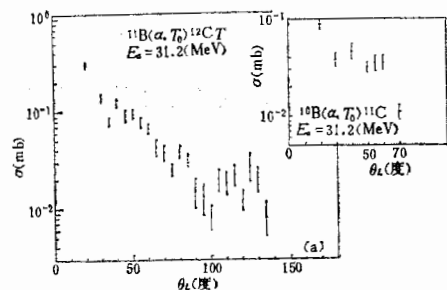


图 2(a) 反应  $^{10}\text{B}(\alpha, t_0)^{11}\text{C}$  和  $^{11}\text{B}(\alpha, t_0)^{12}\text{C}$  的角分布

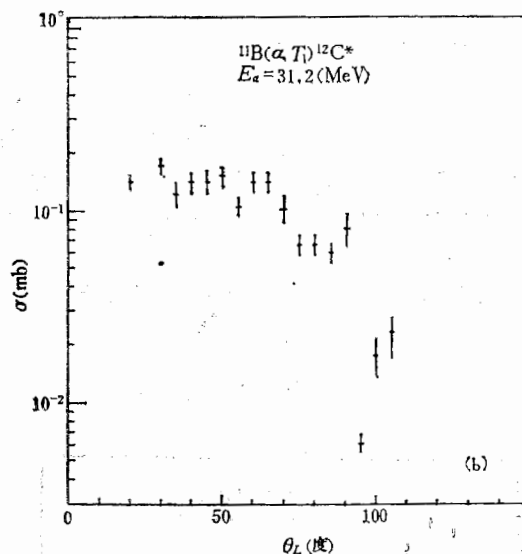
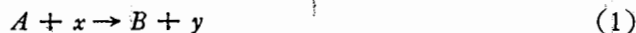


图 2(b) 反应  $^{11}\text{B}(\alpha, t_1)^{12}\text{C}^*$  的角分布

为了从理论方面作些简略的分析, 让我们扼要地叙述一下 I. S. Shapiro<sup>[10]</sup> 的直接反应色散关系理论的思想. 对于反应:



其振幅为  $M$ , 它与质心系中的微分截面的关系为:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{m_x m_A}{4\pi^2} \cdot \frac{P_y}{P_x} |M|^2 \quad (2)$$

其中,  $m_{xA} = m_x m_A / (m_x + m_A)$ ,  $m_{yB} = m_y m_B / (m_y + m_B)$ , 而  $m_i (i = x, y, A, B)$  是反应中粒子的质量,  $P_i$  则为它们的动量. 振幅  $M$  为一复数量, 它是  $q^2 = (P_x - P_y)^2$  和总动能  $E = E_x + E_A$  的解析函数, 即

$$M = M(q^2, E)$$

它可以唯一地解析延拓到  $q^2$  和  $E$  的有限间隔区域之外的, 但处于解析性区域内的任意  $q$  和  $E$  值(包括复数). 这样一来,  $M$  不仅依赖于  $q^2$  和  $E$ , 而且也涉及到粒子的质量, 也即  $M$  也是粒子质量的解析函数. 由解析延拓的唯一性, 对于任何质量的粒子都应有“唯一”的振幅. 就是说,  $M$  完全在一定常数因子范围内被它的奇点所确定. 因而, 可能的反应机制的奇点位置是可以被计算的, 并由此找出优惠的一个. 这使我们能用费曼图的顶点图和顶三角图中的极点和奇点位置来定性讨论各种反应机制.

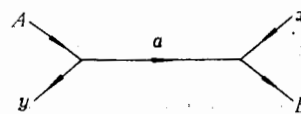


图 (A)

对于图 (A) 所示的费曼图的极点位置:

$$t_0 = 2m_a e_{ay}^A \quad \text{或} \quad t_0 = 2m_a e_{Ay}^y$$

$$e_{ay}^A = m_a + m_y - m_A \quad (3)$$

当  $A = {}^{10}\text{B}, {}^{11}\text{B}, a = {}^7\text{Be}, {}^8\text{Be}$

$$x = \alpha, \quad B = {}^{11}\text{C}, {}^{12}\text{C} \quad y = t$$

计算出的奇点位置分别为:

$$t_0^{11} = 180 \text{ MeV-atom-unity}$$

$$t_0^{10} = 291 \text{ MeV-atom-unity}$$

可见,  ${}^{11}\text{B}(\alpha, t){}^{12}\text{C}$  离物理边界比  ${}^{10}\text{B}(\alpha, t){}^{11}\text{C}$  几乎近一半, 说明  ${}^{11}\text{B}(\alpha, t){}^{12}\text{C}$  角分布在  $90^\circ$  后有上翘的机制主要来自于重粒子削裂的交换机制。

## 2. ${}^{10}\text{B}(\alpha, d){}^{12}\text{C}$ 与 ${}^{11}\text{B}(\alpha, d){}^{13}\text{C}$ 反应

在图(3)中所示的是  ${}^{10}\text{B}(\alpha, d){}^{12}\text{C}$  和  ${}^{11}\text{B}(\alpha, d){}^{13}\text{C}$  反应角分布。从角分布的形状显示在前角区为直接削裂机制, 在后角区我们计算了奇点位置:

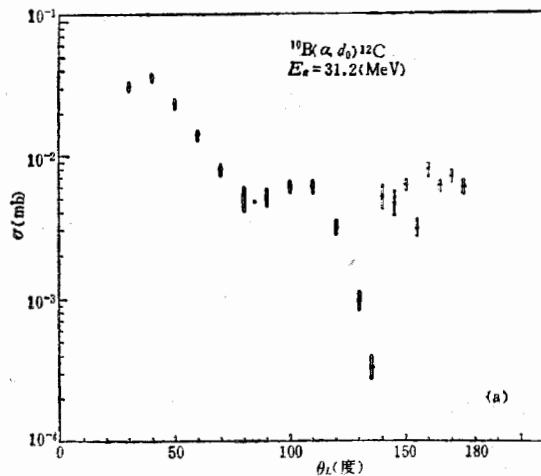


图 3(a) 反应  ${}^{10}\text{B}(\alpha, d_e){}^{12}\text{C}$  角分布

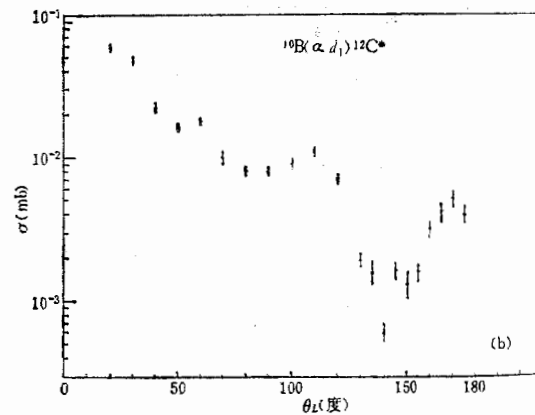


图 3(b) 反应  ${}^{10}\text{B}(\alpha, d_1){}^{12}\text{C}^*$  角分布

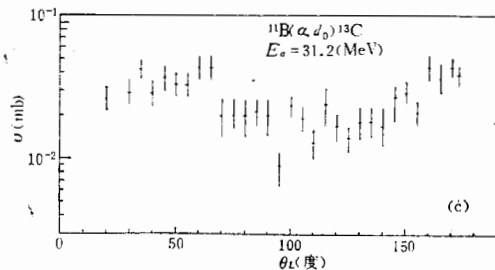


图 3(c) 反应  ${}^{11}\text{B}(\alpha, d_c){}^{13}\text{C}$  的角分布

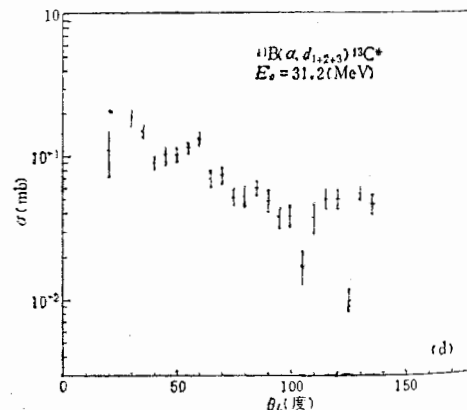


图 3(d) 反应  ${}^{11}\text{B}(\alpha, d_{1+2+3}){}^{13}\text{C}^*$  角分布

当  $A = {}^{10}\text{B}, {}^{11}\text{B}, a = {}^8\text{Be}, {}^9\text{Be}$

$$x = \alpha, \quad B = {}^{12}\text{C}, {}^{13}\text{C} \quad y = d$$

得出  $i_0^{11} = 285 \text{ MeV-atom-unity}$ .

$$i_0^{10} = 96 \text{ MeV-atom-unity}.$$

不难看出,反应发生优惠于  ${}^{10}\text{B}(\alpha, d){}^{12}\text{C}$ , 恰与实验的结果相矛盾;更奇怪的是  ${}^{11}\text{B}(\alpha, d){}^{13}\text{C}$  的前角区截面和后角区的截面几乎对称,如下表所示。

反应类型	20°—90°	90°—173°
	$\Sigma\sigma(\text{mb})$	$\Sigma\sigma(\text{mb})$
${}^{11}\text{B}(\alpha, d_0){}^{13}\text{C}$	1.469	1.438
${}^{10}\text{B}(\alpha, d_0){}^{12}\text{C}$	0.224	0.118
${}^{10}\text{B}(\alpha, d_1){}^{12}\text{C}^*$	0.189	0.074

为此,我们计算了更为复杂机制的奇点位置,如图 (B) 所示的顶三角图顶角的奇点位置:

$$t_{\Delta} = 2m_a m_b [(\epsilon_{bc}^B/m_{bc})^{1/2} + (\epsilon_{ac}^A/m_{ac})^{1/2}]^2 - 2(m_x - m_y)Q' \quad (4)$$

$$\epsilon_{bc}^B = m_b + m_c - m_B;$$

$$\epsilon_{ac}^A = m_a + m_c - m_A;$$

$$m_{bc} = m_b \cdot m_c / (m_b + m_c) \quad Q' = m_a + m_x - m_b - m_y$$

$$m_{ac} = m_a \cdot m_c / (m_a + m_c)$$

当  $A = {}^{10}\text{B}, {}^{11}\text{B}; B = {}^{12}\text{C}, {}^{13}\text{C}$

$$C = {}^{11}\text{C}, {}^{12}\text{C}; \quad x = \alpha$$

$y = d; a = p; b = n$  时,

$$t_{\Delta}^{11} = 84 \text{ MeV-atom-unity}$$

$$t_{\Delta}^{10} = 118 \text{ MeV-atom-unity}$$

另外,我们还计算了更加复杂的机制:先重粒子削裂后直接削裂,如图 (C) 所示。在此只要取

$$a = t; \quad b = {}^5\text{He}, \quad c = {}^7\text{Be}, {}^8\text{Be}$$

得到  $t_{\Delta}^{11} = 569 \text{ MeV-atom-unity}$

$$t_{\Delta}^{10} = 1201 \text{ MeV-atom-unity}$$

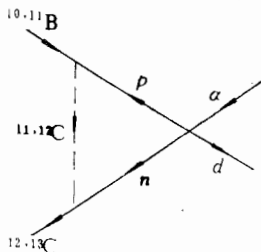


图 (B)

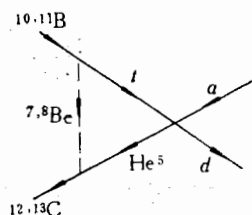


图 (C)

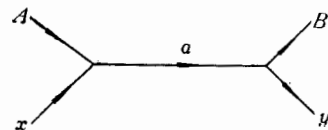


图 (D)

还计算了复核反应机制的极点位置

$$r^{11} = 338 \text{ MeV-atom-unity}$$

$$r^{10} = 359 \text{ MeV-atom-unity}$$

综上三种机制的奇点位置,均有利于 $^{11}\text{B}(\alpha, d)^{13}\text{C}$ , 所以,在整个角区都较 $^{10}\text{B}(\alpha, d)^{12}\text{C}$ 的截面为大;同时,从后面两种机制说明 $^{11}\text{B}(\alpha, d)^{13}\text{C}$ 较 $^{10}\text{B}(\alpha, d)^{12}\text{C}$ 上翘更大,因此, $^{11}\text{B}(\alpha, d)^{13}\text{C}$ 在整个角区出现了对称,它不是一般想象中的复合核的机制,而是更为复杂的多种机制叠加的结果。

### 3. $^{10}\text{B}(\alpha, p)^{13}\text{C}$ 和 $^{11}\text{B}(\alpha, p)^{14}\text{C}$ 反应

图(4)中是 $^{10}\text{B}(\alpha, p)^{13}\text{C}$ 和 $^{11}\text{B}(\alpha, p)^{14}\text{C}$ 的角分布. 在 $^{10}\text{B}(\alpha, p_0)^{13}\text{C}$ 角分布的测量中,由于阻止探头厚度不够( $<5.5\text{mm}$ )未能完全阻止能量为 $E_p > 30 \text{ MeV}$ 的质子,所以

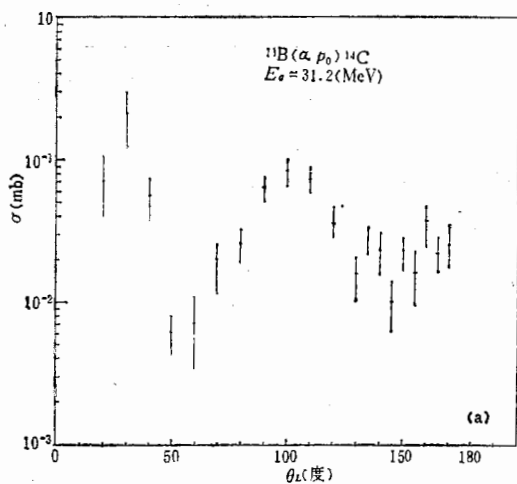


图 4(a) 反应  $^{11}\text{B}(\alpha, p_0)^{14}\text{C}$  的角分布

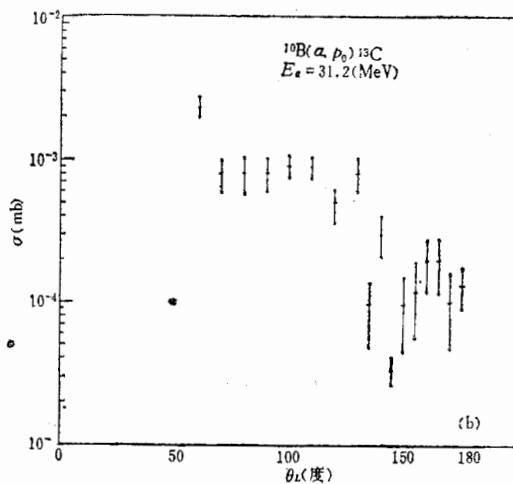


图 4(b) 反应  $^{10}\text{B}(\alpha, p_0)^{13}\text{C}$  的角分布

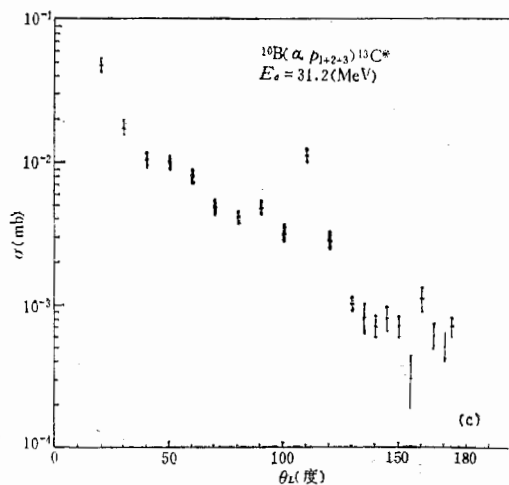


图 4(c) 反应  $^{10}\text{B}(\alpha, p_{1,2,3})^{13}\text{C}$  的角分布

角分布只能从  $60^\circ$  开始, 角分布的形状呈现直接削裂机制. 我们对多步削裂机制用三角图解顶角的奇点位置, 计算如图 (E) 所示, 得到:

$$r_{\Delta}^{11} = 122 \text{ MeV-atom-unity}$$

$$r_{\Delta}^{10} = 187 \text{ MeV-atom-unity};$$

以及上述的复核机制也合于此:

$$r^{11} = 338 \text{ MeV-atom-unity}$$

$$r^{10} = 359 \text{ MeV-atom-unity}.$$

不难看出,  $^{11}\text{B}(\alpha, p)^{14}\text{C}$  的整个角区的截面值都较  $^{10}\text{B}(\alpha, p)^{13}\text{C}$  为大, 而且在后角区由于重粒子削裂交换机制的原因而致使截面略有上翘.

综上所述, 在  $(\alpha, t)$ 、 $(\alpha, d)$  和  $(\alpha, p)$  的各反应道中, 均利于在  $^{11}\text{B}$  上发生, 而不利于  $^{10}\text{B}$ ; 从  $(\alpha, t)$  和  $(\alpha, p)$  的后角上翘, 似乎可以定性地联系到  $^{10}\text{B}(\alpha, \alpha)^{10}\text{B}$  大角反常的出现, 而  $^{11}\text{B}(\alpha, \alpha)^{11}\text{B}$  则不出现的事实, 两者存在着某种关联, 其同位素效应恰好相反.

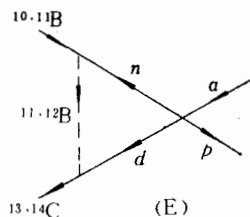


图 (E)

#### 四、初步结论

1) 31.2 MeV 的  $\alpha$  粒子在 B 核上的  $(\alpha, t)$ 、 $(\alpha, d)$  和  $(\alpha, p)$  反应, 在前角区主要是直接削裂机制或多步削裂机制. 而后角区则主要是重粒子削裂机制. 只是  $^{11}\text{B}(\alpha, d)^{13}\text{C}$  较为复杂, 是由多种机制叠加.

2) 对于  $(\alpha, t)$  和  $(\alpha, p)$  反应道均利于  $^{11}\text{B}$  而不利于  $^{10}\text{B}$ , 它们的后角上翘的同位素效应刚好与  $(\alpha, \alpha)$  的大角反常的同位素效应相反, 似乎它们之间存在着某种关联.

3) 对于我们的实验结果, 要在反应机制方面作出较为中肯确切的结论, 则需要仔细地有限程扭曲波计算及分析. 另一方面, 还要进行激发曲线的实验研究和分析, 才能提供更多的信息. 本文采用色散关系理论简单地计算了奇点位置, 得以定性地解析实验的结果.

最后, 对于参加过实验值班的北京 261 厂李振元及我室的王世明、颜清泉、曹德林诸同志, 帮助绘制图片曲线的程玉林同志, 克服困难制备 B 靶的严赐福、吴解征同志, 以及积极配合, 使实验得以顺利进行的加速器运转组的同志们在此一并表示感谢.

#### 参 考 文 献

- [1] И. Б. Теплов и др., «ФЭЦАЯ», Т3 (4), (1977), 769.
- [2] А. В. Спасской и др., «Я. Ф.», Т3 (4), (1966), 652.
- [3] А. В. Спасской и др., «Я. Ф.», Т9(5), (1969), 936.
- [4] А. У. Аль-Джаухири и др., «Я. Ф.», Т6(2), (1967), 248.
- [5] Н. Т. Fortune et al., Bull. Am. Phys. Soc., V. 14(1969), 487.
- [6] Т. А. Дмитриева и др., Изв. АН СССР Сер. Физ., Т38(1974), 2567.
- [7] О. И. Василева и др., «Я. Ф.» Т22(3) (1975), 446.
- [8] 孔祥傲等, 高能物理与核物理, 5(1981), 600.
- [9] 孔祥傲等, 核仪器与方法, 3(1983), 2.
- [10] I. S. Shapiro, "Selected topics in Nuclear Theory", editor F. Janouch, IAEA., Vienna, (1963), 58; 中译本“核理论精选”, 万乙译, «上海科技出版社», (1966), 80.

## THE $(\alpha, t)$ , $(\alpha, d)$ AND $(\alpha, p)$ REACTIONS OF 31.2 MeV- $\alpha$ PARTICLE ON THE NUOLEI $^{10,11}\text{B}$

KONG XIANG-JING

XIE XIAN-LIANG

SUN CHUNG-WEI

(*Institute of Nucleus, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

Angular distribution for  $(\alpha, t)$ ,  $(\alpha, d)$  and  $(\alpha, p)$  reactions of  $\alpha$  particle on nuclei  $^{10,11}\text{B}$  at 31.2 MeV incident energy have been measured by particle identification system. The shapes of the outgoing particle angular distribution show that the cross sections in backward angular region have different enhancement in  $^{11}\text{B}(\alpha, t_0) \times ^{12}\text{C}_{g.s.}$ ,  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}_{g.s.}$ ,  $^{10}\text{B}(\alpha, d_0)^{12}\text{C}_{g.s.}$ ,  $^{10}\text{B}(\alpha, d_1)^{12}\text{C}_{1st}$ ,  $^{11}\text{B}(\alpha, p_0)^{14}\text{C}_{g.s.}$  and the isotopic effect of the backward angle anomaly in the reactions  $(\alpha, p_0)$  and  $(\alpha, t_0)$  is just opposed to that of  $(\alpha, \alpha)$  elastic scattering from nucleus B.

Finally, the reaction mechanism is discussed qualitatively in terms of the Dispersion Theory of direct nuclear reaction. The calculation of the singularity position of the  $(\alpha, t)$ ,  $(\alpha, d)$  and  $(\alpha, p)$  reactions on nuclei  $^{10,11}\text{B}$  is performed using the Feynman Graphs. The initial conclusion is the following:

The principal mechanism is direct stripping in the forward angle region and heavy particle stripping in the backward angle region.

For the reaction  $^{11}\text{B}(\alpha, d_0)^{13}\text{C}_{g.s.}$  however, there is a multimechanism superposition in the backward angle region.