

# $^{12}\text{C}$ 轰击 $^{12}\text{C}$ , $^{27}\text{Al}$ , $^{\text{nat}}\text{Ca}$ 反应中发射 $\alpha$ 粒子的测量与分析

谢元祥 吴国华 诸永泰 缪容之 冯恩普 殷 旭 苗合宾 才景祥  
沈文庆 孙述明 魏建军 李松林

(中国科学院近代物理研究所)

## 摘 要

我们测量了 69.5 MeV  $^{12}\text{C}$  轰击  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ca}$  反应中出射的  $\alpha$  粒子的能谱和角分布。用快粒子激子模型理论计算了包含平衡和前平衡出射的  $\alpha$  粒子成份。在这三个反应中它们构成  $\alpha$  产额的绝大部分,其中前平衡发射的  $\alpha$  粒子估计分别占 11%、14%、16%。尚有一部分来自其它反应机制的贡献。

## 一、前 言

在重离子反应中,发射  $\alpha$  粒子截面比较大,但究竟是那些反应机制,却是一个复杂问题。不少人进行过这方面的测量,用各种反应机制来解释这种现象,如前平衡发射,热斑发射,大质量转移,炮弹散裂,非全融合等等。一般地讲,对轻炮弹(入射能量/炮弹质量数  $\leq 10\text{MeV}$ )轰击重靶和中重靶研究得比较多,对轰击轻靶研究得比较少。可能是激发能比较高,反应机制比较复杂的缘故。

我们选择  $^{12}\text{C}$ 、 $^{27}\text{Al}$ 、 $^{\text{nat}}\text{Ca}$  等轻靶进行测量。当这些轻靶形成复合核时,反应  $Q$  值为正,形成的复合核激发能较高,开道比较多。加上  $^{12}\text{C}$  的  $3\alpha$  结构,可能使发射  $\alpha$  粒子的机制更为复杂。我们希望能得出导致  $\alpha$  粒子发射的主要反应机制。

$^{12}\text{C}$  离子轰击  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ca}$  出射  $\alpha$  粒子的角分布是前角成峰,能谱不同于麦克斯韦分布,高能粒子产额增多,这意味着有非复合核成份的贡献。Takaharu 等人<sup>[1]</sup>用前平衡发射理论很好地解释了 115 MeV 的  $^{14}\text{N}+^{181}\text{Ta}$  反应的能谱。M. B Tsang 等人<sup>[2]</sup>对 65 MeV  $^{16}\text{O}+^{27}\text{Al}$  反应的分析指出前平衡成份为 10% 左右。R. Billerey 等人<sup>[3]</sup>分析 100 MeV  $^{14}\text{N}+^{27}\text{Al}$  反应指出前平衡发射贡献为  $(18 \pm 5)\%$ 。我们用快粒子激子模型理论对  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ca}$  三个反应进行分析,前平衡贡献分别为 11%, 14%, 16%, 与他人的结果<sup>[2,3]</sup>是一致的。因此,我们认为在这三个反应中  $\alpha$  粒子主要来自复合核蒸发和前平衡发射。

## 二、实验概况

实验是在近代物理研究所 1.5 米迴旋加速器上完成的。72.5 MeV  $^{12}\text{C}^{++}$  离子束经过 Ni 箔 (箔厚  $2\mu$ , 将靶室系统与加速器真空系统隔开, 碳束经过箔后能量降为 69.5 MeV.) 以及一组光栏系统进入靶室。为了捕集靶室内的油蒸汽, 在靶位上方安装了液氮冷阱, 并在靶位周围 (除了要测角度外) 安装了与冷阱连接的冷凝板。用钛泵对整个靶室系统抽空, 真空度在  $1 \times 10^{-5}$  托。

靶子正法线与束流方向成  $30^\circ$  角。Al 靶为  $69 \times 14\text{mm}^2$  条形靶, 靶厚  $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ ; Ca 靶是由天然 Ca ( $\sim 97\% ^{40}\text{Ca}$ ) 蒸发制成的无衬靶, 厚度为  $1.16 \sim 1.32\text{mg}/\text{cm}^2$ ; 碳靶为  $0.133\text{mg}/\text{cm}^2$  无衬靶。半靶厚处的能量分别为 68.6 MeV, 68 MeV, 69.5 MeV。每做一次实验, 靶子移动一个位置, 以保证束流轰击在新鲜靶面上。采取上述措施后, 估计碳污染量在  $5\mu\text{g}/\text{cm}^2$  以下。

用  $\Delta E$ - $E$  计数器望远镜分辨产物的原子序数。  $\Delta E$  是屏栅型电离室, 内充 110 托混合气体 (90% Ar + 10% 甲烷), 折合质量厚度为  $1.22\text{mg}/\text{cm}^2$ 。  $E$  探测器为  $\phi 12 \times 3$  硅锂探测器。所获取的  $\Delta E$ - $E$  双微分谱, 经能量修正后, 在两体反应的假设下, 转换到质心系, 从而得到质心系发射  $\alpha$  粒子的总动能 ( $E_{\text{TKE}}^{\text{cm}}$ ) 和发射角 ( $\theta_{\text{cm}}$ ) 的关联图 (图 1)。按能量积分后得到的角分布表示在图 2 中。从图 1 可以看出随着靶核质量数增加而引起的一些规则变化。对于  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  系统总动能峰值在 7.5 MeV, 对不同的角度基本上保持不变。对于  $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$  反应和  $^{12}\text{C} + ^{40}\text{Ca}$  反应, 则能量峰位分别由  $\theta_{\text{cm}} = 10^\circ$  附近的 12.5 MeV 下降到 8.5 MeV 的平衡值和由  $\theta_{\text{cm}} = 12^\circ$  时 15.6 MeV 下降到 11.5 MeV 的平衡值。这三个出射道

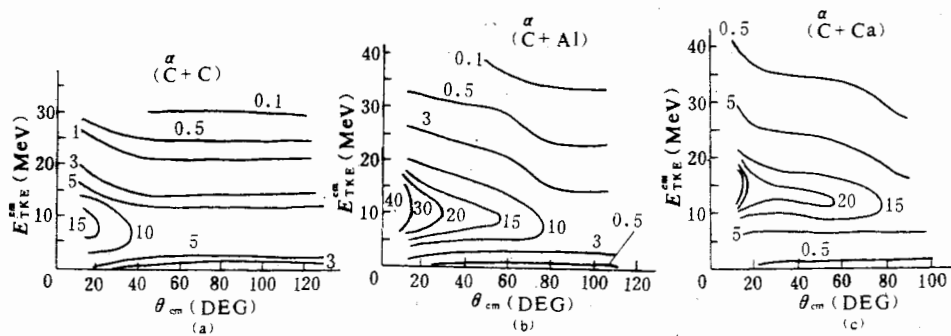


图 1 质心系出射  $\alpha$  粒子的总动能和发射角的关联图

动能的平衡值要比按球形核计算的出射道库仑能 4、6、8 MeV 高 3 MeV 左右, 这可能是转动离心能的贡献。从图 1 中还可以看到, 在小角区能谱高能端有所增强, 对于 C + C 反应和较大角度的 C + Al, C + Ca 反应, 能谱峰位大体不变。这基本上反应了复合核蒸发  $\alpha$  粒子的特点, 同时也说明其它反应机制也有一定的贡献。

### 三、理论分析

我们对三个反应的实验数据进行了初步的理论分析. 用我们自己编制的快粒子激子模型理论的通用化程序 FPDM 计算了同时包含平衡发射和前平衡发射的  $\alpha$  粒子双微分能谱. 所用计算公式如下:

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega}(a, b) = \sigma_a \sum_{n=n_0}^{n_{\text{max}}} W_b(n, \varepsilon_b) t_n(\theta). \quad (1)$$

其中  $\sigma_a$  是复合系统的形成截面, 用光学模型计算.  $n_0$  是初激子数. 根据早期 ( $\alpha, p$ ) 的工作, 认为  $\alpha$  入射时  $n_0 = 2p + 2n$ , 所以认为  $^{12}\text{C}$  入射, 在靶核和炮弹的势场中破裂为  $6p + 6n$ . 如果认为先破裂为  $3\alpha$ , 那么  $\alpha$  也马上又破裂为  $2p + 2n$ <sup>[4]</sup>. 在  $^{12}\text{C}$  引起的反应中通常用  $n_0 = 6p + 6n$ <sup>[5]</sup>. 我们根据初激子数的定义(即入射炮弹中的一个核子与靶核中的一个核子发生一次碰撞后, 系统中总的粒子数与空穴数之和作为初激子数.), 以及对初激子数  $n_0$  的无规性的研究<sup>[6]</sup>, 采用  $n_0 = 14$ .  $n_{\text{max}}$  是系统最大可能的激子数.  $W_b(n, \varepsilon_b)$  是粒子  $b$  以能量  $\varepsilon_b$  从复合系统的  $n$  态出射的几率. 我们采用修正的公式<sup>[7]</sup>

$$W_b(n, \varepsilon_b) = \frac{2s_b + 1}{\pi^2 \hbar^3} \mu_b \varepsilon_b \sigma_{b, \text{inv}}(\varepsilon_b) \times \frac{\omega(p - p_b, h, U) \omega(p_b, 0, E - U)}{\omega(p, h, E) g} R_b(p) \gamma_b. \quad (2)$$

其中  $s_b$ 、 $\varepsilon_b$ 、 $\mu_b$ , 分别是出射粒子  $b$  的自旋、能量和约化质量;  $\sigma_{b, \text{inv}}(\varepsilon_b)$  是能量为  $\varepsilon_b$  的  $b$  粒子与余核的逆截面;  $p_b$  是  $b$  粒子集团中所含的粒子数;  $\gamma_b$  是在复合系统中  $b$  粒子集团的聚合几率;  $g$  是单粒子能级密度;  $R_b(p)$  是在  $p$  个粒子中取出  $p_b$  个粒子而具有正确的中子质子组成的纯组合几率. 关于  $R_b(p)$  也存在几种分歧的看法, 我们采用修正公式<sup>[7]</sup>

$$R_b(p) = \frac{(p - p_b)!}{p!} \cdot \frac{p_b!}{\pi_b! \nu_b!} \cdot \frac{\sum_{i=c}^D \frac{1}{(\pi_a + i - \pi_b)! i! (p - \pi_a - i - \nu_b)! (p - p_a - i)!}}{\sum_{i=0}^{p-p_a} \frac{1}{(\pi_a + i)! i! (p - \pi_a - i)! (p - p_a - i)!}}. \quad (3)$$

其中  $p_a$ 、 $p_b$  分别是炮弹  $a$  和出射粒子  $b$  中所含的粒子数;  $\pi_a$ 、 $\nu_a$ 、 $\pi_b$ 、 $\nu_b$  分别是  $a$  和  $b$  中的质子数与中子数.  $c = \max\{0, (\pi_b - \pi_a)\}$ ,  $D = \min\{(p - p_a), (p - \pi_a - \nu_b)\}$ . 逆形成截面的计算采用 I. Dostrovsky et al.<sup>[8]</sup> 的经验公式, 对于中子

$$\sigma_{\text{inv}}(\varepsilon_b) = \pi R^2 \left(1 + \frac{\gamma}{\varepsilon_b}\right) \alpha, \quad (4)$$

对于带电粒子

$$\sigma_{\text{inv}}(\varepsilon_b) = \pi R^2 (1 + C_b) \left(1 - \frac{k_b V_c}{\varepsilon_b}\right). \quad (5)$$

这里  $R = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ ,  $V_c$  是库仑位垒,  $C_b$ ,  $k_b$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  都是由粒子种类和半径参数确定

的经验常数。(用这一公式计算  $\sigma_{inv}$ , 使得出射粒子能谱在低能端有人为的截断, 所以在计算能量积分的角分布时作了相应的修正)。

根据快粒子激子模型理论, 在  $t$  时刻, 复合系统处于  $(n, \Omega)$  态的占据几率为  $q(n, \Omega, t)$ , 该状态的平均寿命为  $t_n(\theta)$

$$\begin{aligned} t_n(\theta) &= \int_0^{\infty} q(n, \Omega, t) dt \\ &= \int_0^{\infty} \sum_i \eta_i(n, t) p_i(\cos \theta) dt \\ &= \sum_i \xi_i(n) p_i(\cos \theta) \end{aligned} \quad (6)$$

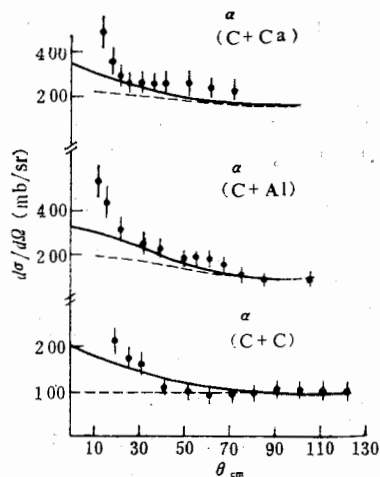


图2 角分布  $\blacksquare$  实验点; — 理论计算; --- 复合核贡献

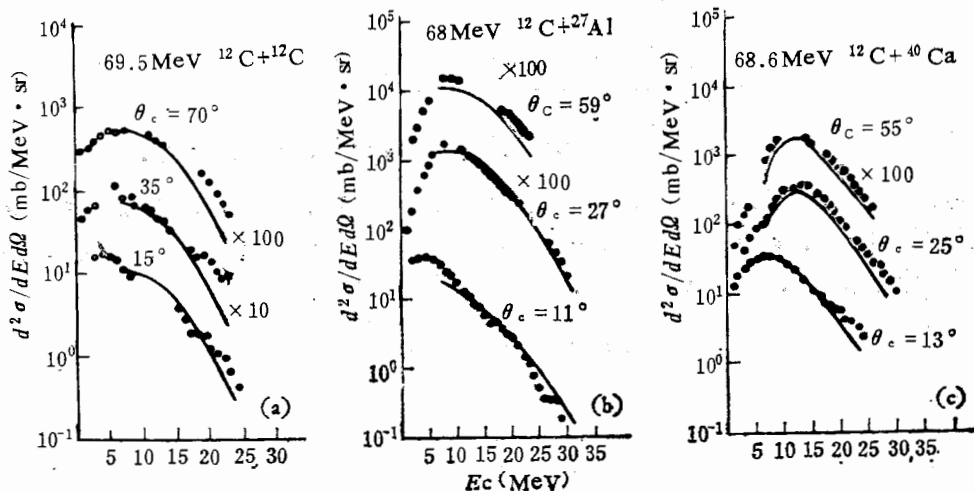


图3 双微分能谱图  $\circ$  是实验点, 曲线是理论计算结果

$\eta_i(n, t)$  满足下面的主方程

$$\frac{d}{dt} \eta_i(n, t) = \mu_i \lambda^+(n-2) \eta_i(n-2, t) + \mu_i \lambda^-(n+2) \eta_i(n+2, t) - \eta_i(n, t) [L(n) + \lambda^+(n) + \lambda^-(n) + (1 - \mu_i) \lambda^0(n)] \quad (7)$$

公式中所有符号的物理意义及计算方法与参考文献[9]完全一样, 采用连分数法求解主方程。

计算结果是包含平衡发射和前平衡发射的总的结果。为了对前平衡发射的贡献有个大致的估计, 我们采用经验公式  $W(\theta) = 1 + B \cos^2 \theta$ , 对复合核蒸发的贡献作一估计。其中  $B$  是各向异性因子, 对于上述三个反应分别为 0.4, 1.0, 0.0。

$\text{C} + \text{C}$  的复合核贡献是各向同性的。计算的结果以及与实验的比较见图 2。图 3 给出三个反应的几个角度下的双微分能谱。计算中所用的参数见表 1。拟合实验数据所提取的  $r_\beta$  值也列在表中,  $r_\beta$  在数量级范围内与他人的结果<sup>[10,11]</sup>一致。

#### 四、讨 论

在我们所讨论的三个轻靶反应中,  $Q$  值为正, 形成复合系统的激发能较高, 可能开放的道也较多, 出射  $\alpha$  粒子的反应机制相当复杂。在我们的理论分析中只能给出一些估计, 出射  $\alpha$  粒子的主要成份来自复合核蒸发和前平衡发射, 对上述三个反应, 分别占总  $\alpha$  产额的 89%、81%、83%, 其中前平衡发射的贡献约为 11%、14%、16%。这些结果与类似反应的结果是相近的。理论计算与实验观测也是一致的。对  $\text{C}^{12} + ^{12}\text{C}$  反应前平衡贡献较小, 其它机制的贡献也较小, 所以实验观测的能谱峰位基本上保持不变。对  $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$  和  $^{12}\text{C} + ^{40}\text{Ca}$  两个反应, 前平衡发射和其它反应机制的贡献较大, 实验观测到的能谱峰位随角度的增加有下降的趋势。

除了蒸发和前平衡发射的贡献之外, 还可能有集团转移反应、 $^{12}\text{C}$  核破裂为  $3\alpha$  以及深部非弹类靶重碎块蒸发  $\alpha$  机制的贡献, 这就导致理论计算结果与实验的偏离。

要进一步研究出射  $\alpha$  粒子的机制, 必须从实验上采用符合测量技术, 并且用在平面内和出平面的关联测量来提取炮弹破裂产额部份和深部非弹贡献的份额。

表 1 计算中所用的参数

| 反 应                    | $C$ | $n_0$ | $K$ | $r_{0\pi} = r_{0p}$ | $r_{0\alpha}$ | $r_\beta$            |
|------------------------|-----|-------|-----|---------------------|---------------|----------------------|
| $\text{C} + \text{C}$  | 13  | 14    | 350 | 1.15                | 1.1           | $3.1 \times 10^{-4}$ |
| $\text{C} + \text{Al}$ | 13  | 14    | 350 | 1.4                 | 1.6           | $4.2 \times 10^{-4}$ |
| $\text{C} + \text{Ca}$ | 13  | 14    | 190 | 1.4                 | 1.6           | $7.0 \times 10^{-4}$ |

## 参 考 文 献

- [1] Takaharu Otsuka et al., *Phys. Lett.*, B121 (1983), 106.  
 [2] M. B. Tsang et al., *Phys. Rev.*, C23 (1981), 1560.  
 [3] R. Billerey et al., *Phys. Rev. Lett.*, 47 (1981), 639.  
 [4] M. Blann, *Nucl. Phys.* A235 (1974), 221.  
 [5] M. Blann, *Phys. Rev.*, C23 (1981), 205.  
 [6] 缪容之, 吴国华, 郑卫汉, 刘建业, 于超凡, 于暹, 高能物理与核物理, 待发表.  
 [7] 缪容之, 吴国华, 郑卫汉, 刘建业, 于超凡, 于暹, 高能物理与核物理, 待发表.  
 [8] I. Dostrovsky et al., *Phys. Rev.*, 116 (1959), 683.  
 [9] J. M. Akkerman et al., *Phys. Rev.*, C22 (1980), 73.  
 [10] I. Ribansky et al., *Phys. Lett.*, 45B (1973), 318.

## MEASUREMENT AND ANALYSIS OF EMITTED $\alpha$ PARTICLES IN REACTIONS OF $^{12}\text{C}$ BOMBARDING $^{12}\text{C}$ , $^{27}\text{Al}$ AND $^{nat}\text{Ca}$

XIE YUAN-XIANG    WU GUO-HUA    ZHU YONG-TAI    MIAO RONG-ZHI  
 FONG EN-PU    YIN XU    MIAO HE-BING    CAI JING-XIANG  
 SHENG WEN-QING    SUN SHU-MING    WEI JIAN-JUN    LI SONG-LING  
 (Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou, China)

## ABSTRACT

The energy spectra and angular distributions of the emitted  $\alpha$  particles in the reactions of the 69.5 MeV  $^{12}\text{C}$  bombarding  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$  and  $^{nat}\text{Ca}$  have been measured and analysed using the fast particle exciton model. The contribution from the equilibrium and preequilibrium  $\alpha$ -emissions is calculated to be 89%, 81% and 83% of the total  $\alpha$  yields for the three reactions respectively, where the preequilibrium  $\alpha$  emissions are 11%, 14% and 16% respectively. A small contribution comes from the other reaction mechanism.

则

E  
偶

其

S

以

的

A. I

展