

## $^{28}\text{Si} + ^{12}\text{C}$ 中的两体反应与全熔合反应\*

王素芳<sup>1</sup> Cavallaro S<sup>2</sup> 靳根明<sup>1</sup> Grzeszczuk A<sup>3</sup> Zipper W<sup>3</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (University of Catania, LNS Catania, INFN, Italy)

3 (Institute of Physics, Silesian University, Katowice, Poland)

**摘要** 利用  $\Delta E$ - $E$  望远镜系统测量了  $156.3\text{MeV } ^{28}\text{Si} + ^{12}\text{C}$  反应(近对称系统)中出射的  $Z=4-14$  的产物元素的能谱和角分布,并由此给出了这些产物的裂变截面图.从理论上计算了  $Z=4-11$  产物的实验室系最可几动能分布  $E_1(\theta)$  和各元素的质心系的总动能分布  $E_t(Z)$ ,指出了这些产物主要来自系统的两体反应过程.还给出了该反应系统的全熔合截面值为  $(980 \pm 68)\text{mb}$ ,并指出从低能数据外推到此能量下的全熔合截面值与实验值之差主要归因于两体过程.

**关键词** 非对称系统 两体机制 熔合 能量阻尼 裂变截面

### 1 引言

在低能反应中由于裂变位垒随着质量数的减少而增大,以前认为只有当复合核质量数  $A_m \geq 100$  时,才存在着裂变衰变道,但近几年的实验测量发现,在  $A_m \approx 30-80$  区域,低能重离子反应中除了熔合蒸发反应外,也存在着两体过程,这些两体过程的机制引起了实验和理论核物理学家的广泛兴趣<sup>[1-9]</sup>. 近年来的实验和理论研究都认为轻系统的两体过程是形成深度非弹(DIC)和全熔合(CF)之间的中间过程,而在重系统中称为快裂变或准裂变(QE). DIC是QE和CF之间的反应机制,全阻尼DIC类似裂变,其特征是非对称的裂变产物.理论上有不同的模型对此进行解释,例如轨道转动(orbiting)模型<sup>[2,3]</sup>,熔合-裂变机制<sup>[1]</sup>等.为了了解到底哪个模型更准确以及两体过程和熔合的竞争情况,就实验数据,以便进行有效可靠的选择.

早在80年代,就对轻系统( $A \leq 60$ )的CF在低能区进行了广泛的研究.对轻系统 $^{28}\text{Si} + ^{12}\text{C}$ 反应,在激发函数的第一能区从实验上得到了比较完整的全熔合激发函数,发现和研究了限制全熔合反应的机制.在激发函数的第二、三能区,由于其它反应道的出现及竞争,全熔合截面的测量很困难,实验数据较少,并且各家的实验数据相差很大<sup>[4-7]</sup>,还发现在一定能量以上,DIC成为与CF相竞争的反应机制.为了更深入地研究熔合蒸发与两

1999-09-28 收稿

\* 中国科学院近代物理研究所所长基金资助

体机制之间竞争,我们选择了非对称的轻系统  $^{28}\text{Si} + ^{12}\text{C}$  反应来进行研究.

## 2 实验条件

实验是在 Catania 南方实验室的 SMP Tandem 加速器上完成的. 使用的束流是能量为 156.3 MeV 的  $^{28}\text{Si}$  离子. 靶子为  $100\mu\text{g}/\text{cm}^2$  厚的  $^{12}\text{C}$  并带有  $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$  的铝衬. 可改变角度的 3 套  $\Delta E(\text{气体}) - E(\text{Si})$  探测器望远镜用于测量和鉴别反应产物,  $E$  为全阻止的金硅面垒半导体探测器,  $\Delta E$  为气体电离室, 在工作中充以  $5.46 \times 10^3 \text{ Pa}$  气压的 P10 气体 ( $90\% \text{ Ar} + 10\% \text{ CH}_4$ ). 电离室的有效气体厚度为 51 mm. 测量角度范围  $4^\circ - 85^\circ$ . 一个全耗尽的硅探测器放在前方一个固定的较小角度作为检验探测器, 截面的绝对归一借助法拉第筒的束流积分记数, 在非常小的角度, 在法拉第筒上测不到的束流积分记数, 此时用检验探测器的弹散计数与束流积分记数的关系得到等效束流积分记数进行归一. 靶子位置相对于束流成  $90^\circ$  (探测器在小角度) 和  $70^\circ$  (探测器大角度). 实验中同时测量了反应  $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$  的弹性散射, 在数据处理中用来进行能量刻度.

## 3 实验结果和分析

在事件的  $\Delta E - E$  散点图上对可鉴别的各元素开窗、投影, 得到各元素在各个角度上的能谱, 作为一个例子, 图 1 给出了元素 Be—Ar 在  $12^\circ$  测量到的能谱. 这里已对反应产物在靶子中的能量损失、在电离室的 mylar 窗和死层中的能量损失及在 Si 半导体探测器中的能量亏损进行了修正. 图中箭头标明了各元素在实验室系中的反冲能量估算值. 从测量到的能谱可清楚地看到  $Z < 11$  的元素几乎没有蒸发剩余成分. 从能谱中也可明显看到各个元素有高能、低能两种成分, 高能成分是两体过程产物, 低能成分中虽然可能有许多是来自于本底的贡献, 但也有一些是两体过程中后角发射的产物. 而  $Z \geq 11$  的元素中有了越来越多的蒸发剩余成分. Ar, Cl 几乎完全是蒸发剩余产物, 而元素 S, P 很难说完全是蒸发剩余产物, 特别是 P, 其高能部分可能是两体反应产物, S 元素的能谱分布较宽, 表明它不完全是蒸发剩余产物, 似乎有部分阻尼事件存在. 在 S 的能谱中, 125 MeV 处的小峰很可能是由炮弹拾取  $\alpha$  造成的. 而元素 Mg, Al, Si 的能谱中明显有部分阻尼事件存在, 既同时有二体成分和蒸发剩余成分, 表明两体过程与熔合之间的竞争很激烈. 在各元素的各个角度的能谱中, 尽可能地区分两体过程产物和蒸发剩余产物, 并对它们的积分计数进行归一, 得到相应的微分截面角分布.

图 2 给出了两体过程成分的角分布. 随着  $Z$  的变化, 角分布形式、峰位有明显区别. Li 的谱形基本上是全对称形, Li—C 的峰位基本上在  $50^\circ$ . 随着  $Z$  增大, 小角度部分渐渐上升, 而 N 的能谱在  $50^\circ$  之内基本上是平的. 当  $Z \geq 8$  时, 随  $Z$  的增加, 峰位移向小角度. 这也表明了随着  $Z$  的增大, 反应产物的来源由两体过程向熔合裂变转化.

图 3 给出了各元素的协变截面  $\frac{1}{v} \frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$ . 其结果更直观地显示出元素的产额随  $Z$  的变化情况以及各元素的发射源的速度. 图中, 箭头标明了复合核在质心系的速度, 从图上

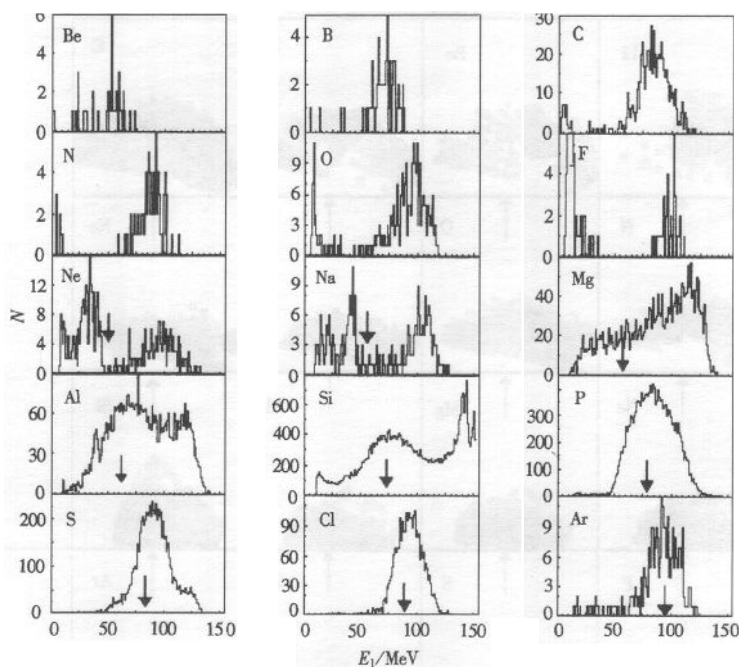


图 1 元素 Be—Ar 在  $12^\circ$  测量到的能谱  
箭头标明了各元素在实验室系中的反冲能量估算值.

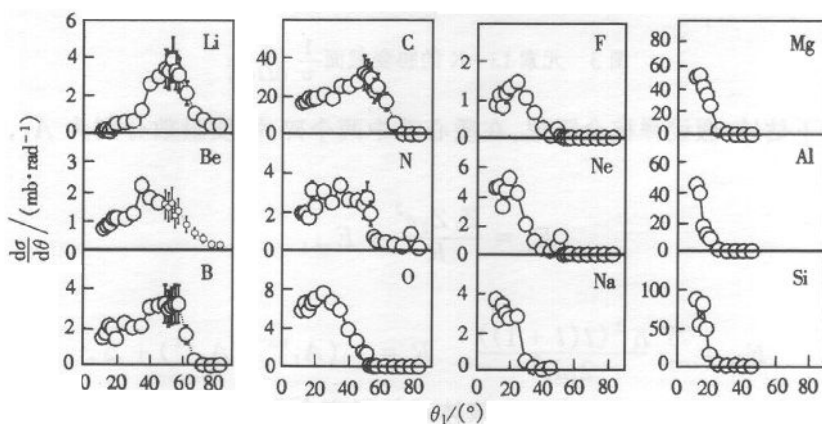


图 2 DIC 的角分布

可以清楚地看到轻产物 Li—Na 显示出以复合核质心速度为中心的环形分布, 明显呈现出两体反应的特征, 且发射源具有较长寿命, 近似各向同性质心系角分布. 较重产物的发射源速度明显大于复合核质心速度, 则表明它们可能是转移反应的产物, 而复合核蒸发余核(以 Ar, K 为代表)的反冲速度与计算的复合核速度相当.

为了得到更进一步的能量耗散信息, 从实验数据提取了碎片的平均总动能. 图 4 中给出了元素 Be—Na 在实验室系的最可几动能分布  $E_1(\theta)$ . 为了与实验值进行比较, 从理

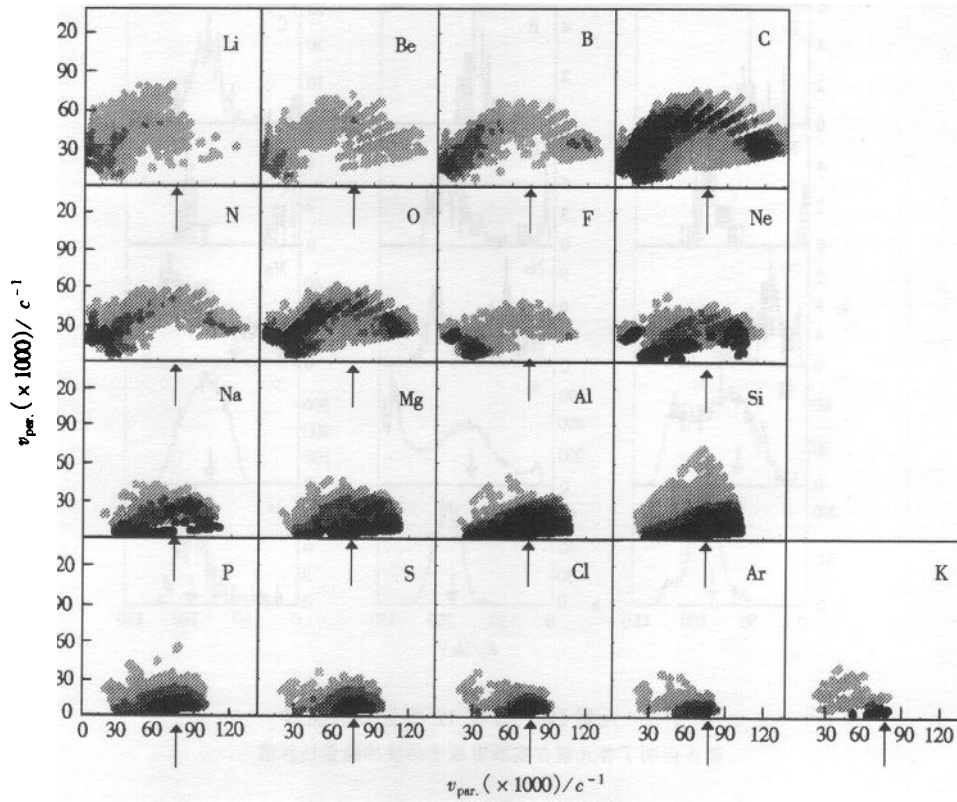


图 3 元素 Li—K 的协变截面  $\frac{1}{v} \frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$

论上做了如下估计:假设弹核全阻尼,在质心系中两个碎片(质量数分别为  $A_1, A_2$ )的平均总动能为

$$E_t = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R} + E_{rot},$$

其中

$$E_{rot} = \frac{5^2 \hbar^2 (l(l+1))}{7^2 2\mu R^2}, \quad R = r_0 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) + \Delta,$$

这里取半径参数  $r_0 = 1.5\text{fm}$ ;  $\Delta$  为复合核体系的形变参数,通过拟合实验数据得到  $\Delta = 2.0\text{fm}$ ;取  $l = 22$ ,与全融合临界角动量的极限值相当. 两体过程(不包括复合核裂变)的  $l$  值取 CF 的临界角动量,其计算公式如下:

$$l = \frac{7}{5} \left[ \frac{Z_2}{2} \right]^1 \tag{2}$$

这里

$$\text{半密度半径 } C_i = R_i \left[ 1 - \left( \frac{b}{R_i} \right)^2 \right] \quad b = 1,$$

$$\text{等效锐截止半径 } R_i = 1.28 \times A_i^{1/3} - 0.76 + 0.8 \times A_i^{-1/3}$$

其中  $S = C_p + C_t + 0.3$ ,  $\gamma = 0.9517$ ,  $f = -0.96$ .

图 4 给出了  $E_l(\theta)$  与实验值的比较, 理论计算结果用虚线表示在图中. 为了看得清楚, 元素 B 以上的数值均依次抬高了  $(10 \times N)$  MeV. 从图中可以看出, 除了元素 Be, 计算结果与实验点符合得很好. 对元素 Be 的计算结果明显高于实验点, 但当假定其来源于它的互补碎片 <sup>12</sup>C 蒸发一个  $\alpha$  粒子时, 计算值(实线)与实验点符合得也很好, 这也说明 Be 产物的主要部分来源于 Si-C 的两体过程. 元素 Be-Si 在质心系的最可几动能分布与理论计算符合较好. 这表明产物 Be-Na 主要来源于全耗散体系的两体发射, 其中少部分来自于熔合裂变. 图 5 中给出了 Be-Si 元素在质心系的最可几动能分布  $E_l(Z)$ , 点线为只考虑库仑能的计算结果, 虚线为加入了转动能的结果(但形变参数  $\Delta = 0$  fm), 进而考虑核形变, 即  $\Delta = 2.0$  fm 影响后的结果用实线表示, 它较好地与实验数据一致.  $Z = 12, 13, 14$  的实验点越来越高, 可以认为是随着  $Z$  的增大, 全阻尼机制的成分越来越少, 而准弹性散射和蒸发剩余的成分随之增大所致.

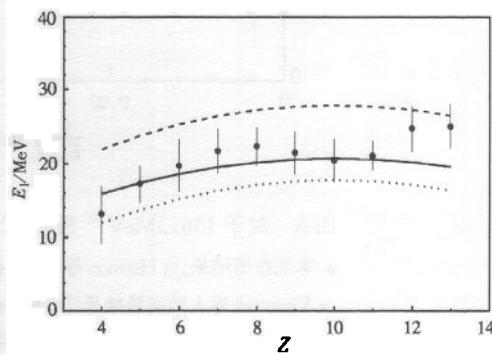
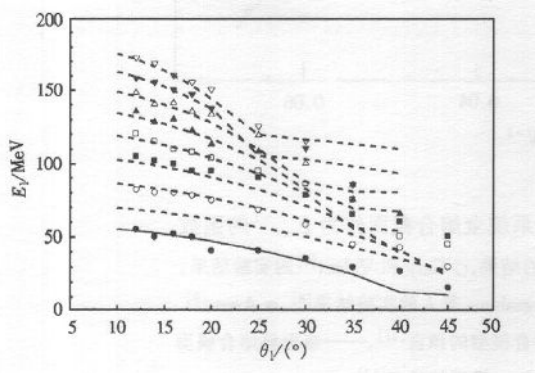


图 4 元素 Be—Na 在实验室系的最可几动能分布 B 以上的数值均依次抬高了  $(10 \times N)$  MeV.  
 • Be, ○ B, □ C, □ N, ▲ O, △ F,  
 ▼ Ne, ▽ Na; 虚线和实线为理论计算.  
 图 5 元素 Be—Si 在质心系的最可几总动能分布  
 • 实验点, 计算值; ……只考虑库仑能;  
 - - - 加入了转动能, 但形变参数  $\Delta = 0$  fm;  
 — 加入了转动能,  $\Delta = 2.0$  fm.

从以上论述与实验结果的比较可知, 实验中测得的较轻碎片 ( $Z \leq 11$ ) 主要来自于两体过程, 随着  $Z$  的增大, 逐渐过渡到复合核衰变.

对元素在各角度上的能谱经积分、处理后, 得到了蒸发余核的角分布, 进而求得 P, S, Cl, Ar 蒸发余核的截面之和约为  $(900 \pm 67)$  mb, 误差来源于各元素截面误差的均方根值. 由图 1 可知, Si 的能谱中有相当多的蒸发余核, 但无法与两体过程产物分开. 用 GEMINI 程序对蒸发余核的截面进行了计算, 得到 Si 的截面为  $(80 \pm 9)$  mb (统计误差), 所以总的熔合蒸发截面为  $(980 \pm 68)$  mb, 与郑纪文等人<sup>[10]</sup> 相同质心能量 ( $E_{cm} = 46.6$  MeV) 的反系统 <sup>12</sup>C + <sup>28</sup>Si 得到的实验结果  $\sigma = 1022$  mb 一致, 也与别人的实验结果和计算结果做了比较 (图 6), 本结果介于 Harmon 等人的实验结果和 Vineyard 等人的实验结果之间. 如果从低能全熔合截面的实验数据平均值外推到此能量时, 其全熔合截面应为约 1300 mb. 从实验数据得到的两体过程 (从 Li—Si) 的截面为 239 mb (其中 Si 元素来自两体过程的截面约为

110mb), 可以断定, 在此能区相应全熔合截面随入射能量的增加而减少的部分主要贡献于两体过程。

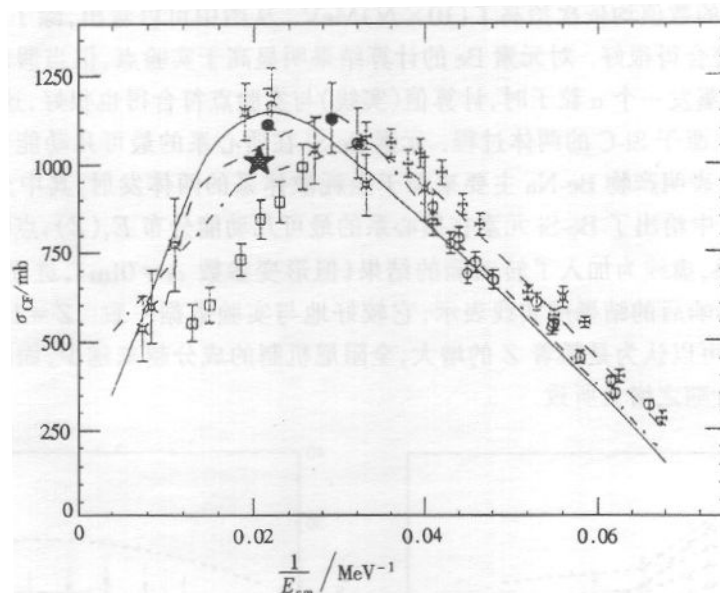


图 6 对于  $156.3\text{MeV } ^{28}\text{Si} + ^{12}\text{C}$  系统全熔合截面作为  $E_{\text{cm}}^{-1}$  的函数  
 ★ 本工作的结果, □ Harmon 等人<sup>[4,5]</sup>的结果, ○ Gary 和 Volant<sup>[6]</sup>的实验结果,  
 × Vineyard 等人的实验结果<sup>[7]</sup>, + Nagashima 等人的实验结果<sup>[8]</sup>, ● Arena<sup>[9]</sup>  
 等人的实验结果. ···· 临界距离熔合模型的预言<sup>[11]</sup>, — 亲近势熔合模型  
 的预言<sup>[12]</sup>, - - - Bass 模型的预言<sup>[13]</sup>.

## 4 结论

实验测量了  $156.3\text{MeV } ^{28}\text{Si} + ^{12}\text{C}$  反应中的各种碎片的能谱及角分布, 并由此得出了各种碎片元素的肋变截面图. 从肋变截面图可以清楚地看到该反应中出射的 Li—Na 元素基本上来自于两体过程. 对于  $E_i(\theta)$  及  $E_i(Z)$  的简单理论计算结果与实验数据也相符合, 这进一步证明了上述碎片元素是从两体过程来的.

根据测得的 P, S, Cl, Ar, K 等元素的产额及利用 GEMINI 程序计算的复合核衰变产物中 Si 元素的截面, 得到了  $156.3\text{MeV } ^{28}\text{Si} + ^{12}\text{C}$  的全熔合截面约为 1 000mb. 这一截面值与根据低能全熔合截面值的外推值之差主要贡献于两体过程. 有关两体过程的详细机制需要进一步深入研究.

作者衷心感谢郑纪文教授给予的有益讨论.

## 参考文献(References)

- 1 Sander A. Phys. Rev., 1999, **C44**(6):2676—2693
- 2 Sander S J. Phys. Rev. Letters, 1987, **59**(25):2856—2859
- 3 Shapir D, Novotny R, Chan Y D. Phys. Lett., 1982, **114B**:111
- 4 Harmon B A, Thornton S T, Shapira D et al. Phys. Rev., 1986, **C34**(2):552—561
- 5 Harmon B, Shapira D, Stelson P H et al. Phys. Rev., 1988, **C38**(1):572—575
- 6 Gary S, Volant C. Phys. Rev., 1982, **C25**(4):1877—1895
- 7 Vincyard M F, Mateja J F, Beck C et al. Phys. Rev., 1993, **C47**(5):2374—2377
- 8 Nagashima Y, Lee S M, Sato M et al. Phys. Rev., 1982, **C26**(6):2661—2663
- 9 Arena N, Cavallaro Seb, Femino' S et al. Phys. Rev., 1994, **C50**(2):880—890
- 10 ZHENG JiWen, LIANG GuoZhao, LIU HongTao et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1986, **10**: 705—710  
(郑纪文, 梁国照, 刘洪涛等. 高能物理与核物理, 1986, **10**:705—710)
- 11 Matsuse T, Arima A, Lee S M. Phys. Rev., 1982, **C26**(5):2338—2341
- 12 Birkelund J R, Tubbs L E, Huizenga J R et al. Phys. Rep., 1979, **56**(3):107—166
- 13 Bass R. Phys. Rev. Lett., 1977, **39**(5):265—268

Binary Reaction and Fusion Reaction in  $^{28}\text{Si} + ^{12}\text{C}^*$ WANG SuFang<sup>1</sup> Cavallaro Si<sup>2</sup> JIN GenMing<sup>1</sup> Grzeszczuk A<sup>3</sup> Zipper W<sup>3</sup><sup>1</sup>(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 73000, China)<sup>2</sup>(University of Catania, LNS Catania, INFN, Italy)<sup>3</sup>(Institute of Physics, Silesian University, Katowice, Poland)

**Abstract** The energy spectra and angular distributions of products ( $Z = 4 - 14$ ) emitted in reaction  $156.3\text{MeV } ^{28}\text{Si} + ^{12}\text{C}$  were measured by using  $\Delta E$ - $E$  telescope detectors. Then Lorenz invariant cross sections of the products were presented. The most probable kinetic energy distributions  $E_1(\theta)$  in the laboratory system and total kinetic energy  $E_t(Z)$  in the center of mass system were calculated for the products with  $Z = 4 - 11$ , which indicates that these products come mainly from binary process. The complete fusion cross section was deduced to be  $(980 \pm 68)\text{mb}$  for this reaction system. The difference between this value and that extrapolated from the cross section at low energy may attribute mainly to the binary process.

**Key words** binary mechanism, fusion-fission, energy damp, Lorenz invariant cross section

---

Received 28 September 1999

\* Supported by Director Foundation of IMP, The Chinese Academy of Sciences