

# $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$ 在 93 和 77 MeV 的准弹 和深度非弹反应

郭忠言 沈文庆 诸永泰 乔卫民  
尹淑芝 詹文龙 鄂恩九  
(中国科学院近代物理研究所)

## 摘 要

对轻系统  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应 ( $E_{\text{Lab}} = 93$  和  $77$  MeV), 使用大面积位置灵敏电离室测量了出射类弹碎片, 得到质心系 TKE- $\theta$  平面上  $\frac{d^3\sigma}{d\Omega dE dZ}$  等高图, 不同 TKEL 下的角分布和 Z 分布, 不同碎片的角分布; 推出  $\sigma_z^2$  和相互作用时间  $\tau$  的关系, 并对实验结果进行了分析讨论.

## 一、引 言

深度非弹性碰撞是介于直接反应和全融合之间的一种非平衡反应过程。通过对这种过程中各自由度(如相对运动动能、角动量、中子质子比、形变和质量不对称等自由度)弛豫现象的研究, 便可深入了解这一过程的本质。

以前对这一过程的研究大都集中于重的反应系统<sup>[1,2]</sup>, 而对轻系统的研究却比较少。中国科学院近代物理研究所开展了对轻系统的深度非弹过程的研究。对  $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ <sup>[3]</sup> 和  $^{12}\text{C} + ^{40}\text{Ca}$ <sup>[4]</sup> 反应, 用简单的扩散模型拟合实验数据发现, 扩散模型可以拟合实验数据的一般倾向, 但不能解释 Z 分布偏离高斯分布的影响等实验现象。在  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ <sup>[5,6]</sup> 反应研究中发现有核结构效应, 例如弹核- $\alpha$  结构, 而 C 产额的格外加强可能是造成 Z 分布明显涨落的原因之一。在  $^{14}\text{N} + ^{40}\text{Ca}$ <sup>[7]</sup> 反应中, Z 分布比较光滑, 这也证实了  $\alpha$  结构影响在  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  反应中的存在。

为了深入研究在 DIC 中炮弹的核结构效应的影响, 以及 DIC 过程同炮弹种类和轰击能量的关系, 我们进行了  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应的 DIC 实验研究。

## 二、实验装置和方法

实验是在我所 1.5 米迴旋加速器上进行的。加速器给出 97 MeV  $^{14}\text{N}$  离子束, 经光粒

第  
系  
靶  
777  
用,  
子  
47°  
200  
行  
离  
文  
由  
E<sub>T</sub>;  
的  
三  
同  
W.  
E  
(M  
然,  
QE  
DIC  
远  
降  
高。

系统,在靶上得到直径为 3 mm,流强约 50 nA 的束流。用 2  $\mu\text{m}$  厚的 Ni 箔隔开加速器和靶室真空。靶室由涡轮分子泵获得真空,靶周围放置液氮冷阱,以降低油沾污。靶子为厚 777  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  的无衬  $^{27}\text{Al}$  靶,用电子溅射对靶进行清洗和表面分析后,将其保存于真空中待用,估计轻元素沾污小于 10  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

用大面积位置灵敏电离室测量类弹碎片,有关该电离室及其靶室,供气系统和测量电子学细节,可参阅文献[8]。电离室一次复盖  $21^\circ$ ,分四个角区 ( $10^\circ-28^\circ$ ,  $27^\circ-48^\circ$ ,  $47^\circ-68^\circ$ ,  $67^\circ-88^\circ$ ) 测量。电离室充 Ar 90% +  $\text{CH}_4$  10% 混合气体,气压为 360 托和 200 托两种,以便兼顾对轻重碎片的测量。在  $10^\circ-28^\circ$  角区,加计数率分除器对弹散进行计数分除,以减少偶然符合和仪器死时间。

用 Plurimat-N20 多参数数据获取系统采集数据,并以事件方式记录在磁带上,以便离线分析处理。

实验数据的离线处理是在我所 PDP-11/44 计算机上进行的,离线路序的细节可见文献[9]。磁带上的逐个事件谱,对每个事件记录  $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3, E_R, x$  和  $y$  六个参数。由  $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3, E_R$  经能量校正,靶中和电离室入射窗 Mylar 膜中的能损修正,推出  $E_T$ ; 对  $\Delta E_1-E_T$  线性化推出  $Z$  值; 从  $x, y$  推出  $\theta$  和  $\phi$ , 从而得到关于  $Z, E_T, \theta, \phi$  四参数的伪事件谱。在两体反应假设下,完成从实验室到质心系的转换,得到质心系  $E_{\text{cm}}, \theta_{\text{cm}}, Z$  三参数的伪事件谱,由此最后得到各种累积谱,例如 TKE- $\theta$  平面上  $\frac{d^3\sigma}{d\Omega dE dZ}$  二维谱,不同元素的能谱、角分布及  $Z$  分布等。

### 三、实验结果

表 1 列出了  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  在 93 和 77 MeV 轰击能量下的反应特征参量,这是根据 W. Wilcke 等人列出的公式计算的。

表 1  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应在 93 和 77 MeV 轰击能量下的反应特征参量

$E_{\text{Lab}}$ (MeV)	$E_{\text{cm}}$ (MeV)	$E_{\text{cm}}/V_C$	$\eta$	$L_{\text{max}}$ ( $\bar{h}$ )	$\sigma_{R1}$ (mb)	$\sigma_f$ (mb)	$Q_{1/4\text{cm}}$ (deg.)	$Q_{1/4L}$ (deg.)
93	61	4.2	5.6	41	2025	1039	15.5	10.3
77	51	3.48	6.1	36	1906	1255	19.4	12.8

图 1 示出在两种能量下,从 Li 到 Mg 碎片的 TKE- $\theta$  平面上  $d^2\sigma/dE d\Omega$  等高图。显然,对弹核附近的元素,等高图上展现出两个组分:角分布在前方向成峰、能量弛豫小的 QE 组分和从小角度向大角度延伸的岭状 DIC 组分。当角度增大时, QE 成分急剧下降, DIC 成分下降平缓,其 DIC 组分最可几动能降低,最后趋向平衡值,即全弛豫动能。对于远离弹核的元素,只有 DIC 一种组分,在小角度时最可几能量已经较小,随角度增加稍微降低,最后也趋向全弛豫能量。对比后发现,高轰击能量下的 DIC 产额较低轰击能量时高。两种能量下,出射类弹碎片的全弛豫动能与出射元素  $z$  值的关系,列于表 2 中。

图 2 示出从 Li 到 Na 求和,不同 TKEL 间隔积分的角分布和对全能谱积分的角分

电  
同  
的

对这种  
角度)弛

比较少。

$\text{Al}^{(3)}$  和  
数据的  
反应研  
布明显  
影响在

能和轰

至光粒

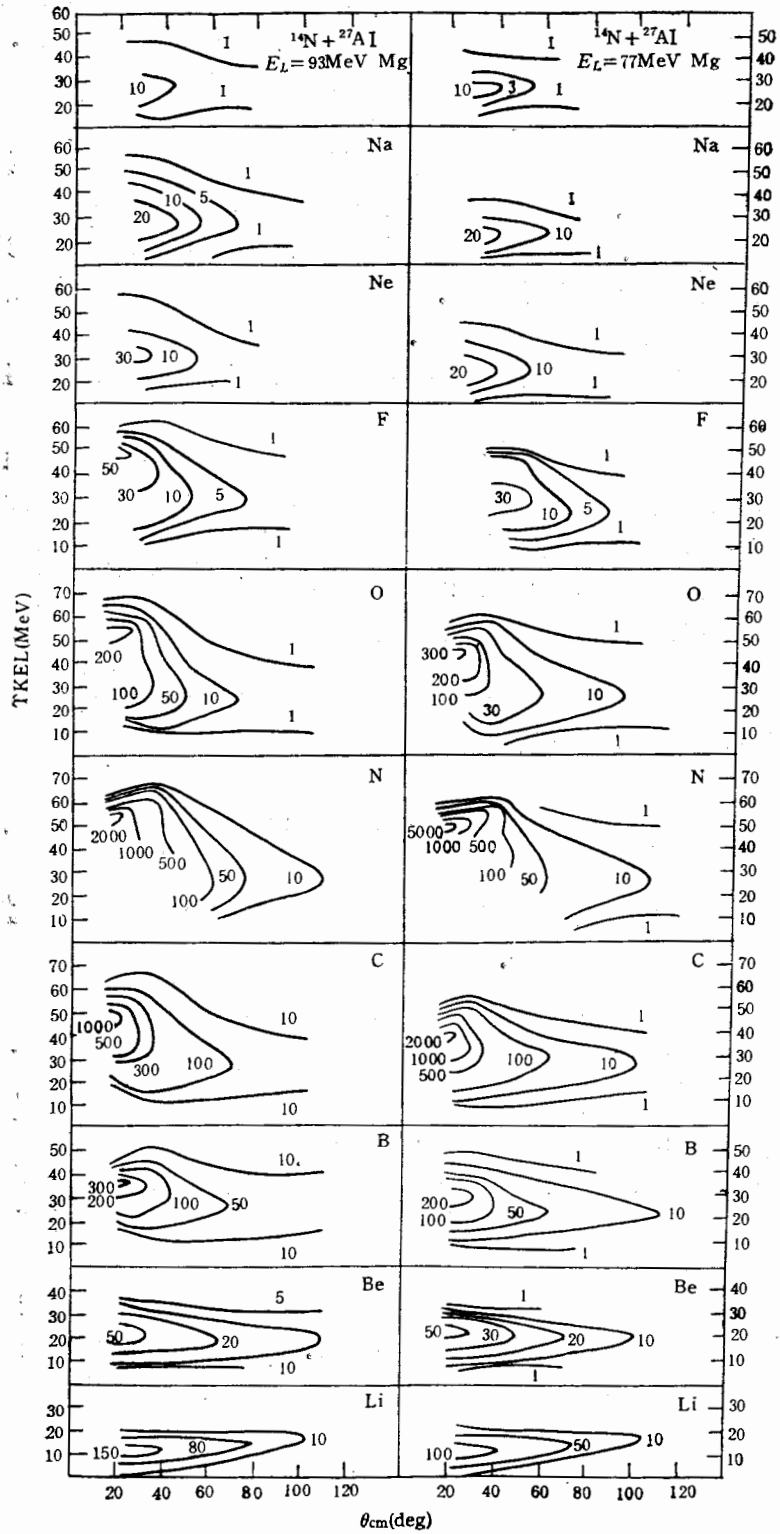


图 1 93 MeV 和 77 MeV 轰击能量下, 在  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应中出射碎片从 Li 到 Mg 在 TKE- $\theta$  平面上  $d^2\sigma/dE d\Omega$  等高图

表 2  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应在 93 和 77 MeV 轰击能量下的反应产物的全弛豫动能

$E_{\text{Lab}}$ (MeV)	出射粒子	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na
93	实验全弛豫动能 (MeV)	18.0	21.0	25.0	27.0	28.0	29.0	30.0	30.0	29.5
	$r_0 = 1.31$ fm 库仑能(MeV)	10.9	13.4	15.4	17.2	18.9	19.4	19.9	20.1	19.9
	$r_0 = 1.31$ fm 库+核+离(MeV)	17.9	21.5	24.3	26.4	28.1	29.3	30.0	30.2	29.9
77	实验全弛豫动能 (MeV)	16.0	19.9	21.5	24.0	25.0	26.5	27.0	27.0	26.5
	$r_0 = 1.31$ fm 库仑能 (MeV)	10.9	13.4	15.4	17.2	18.5	19.4	19.9	20.1	19.9
	$r_0 = 1.31$ fm 库+核+离 (MeV)	15.7	19.0	21.6	23.6	25.2	26.3	26.9	27.1	26.9

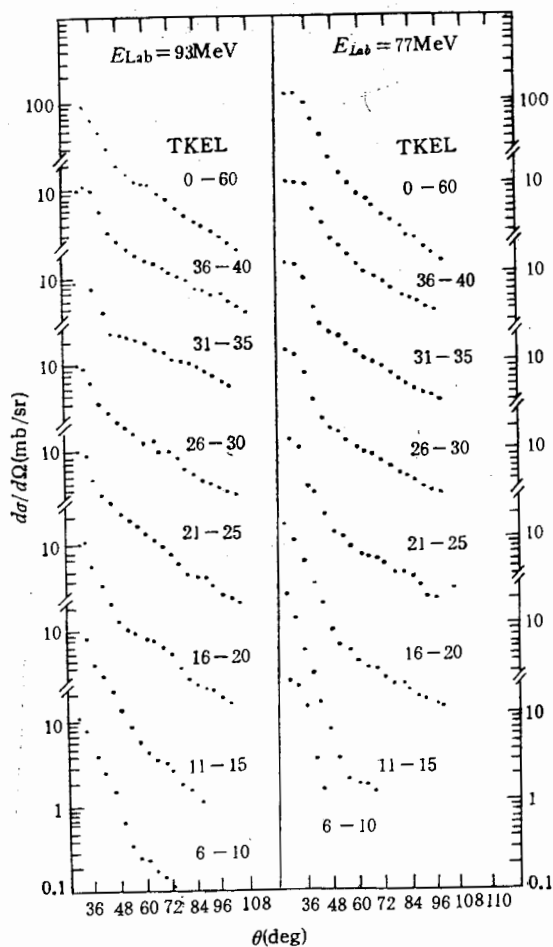


图 2 93 和 77 MeV 轰击能量下  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应对出射碎片从 Li 到 Na 求和, 不同 TKEL 积分角分布和全能谱积分的角分布

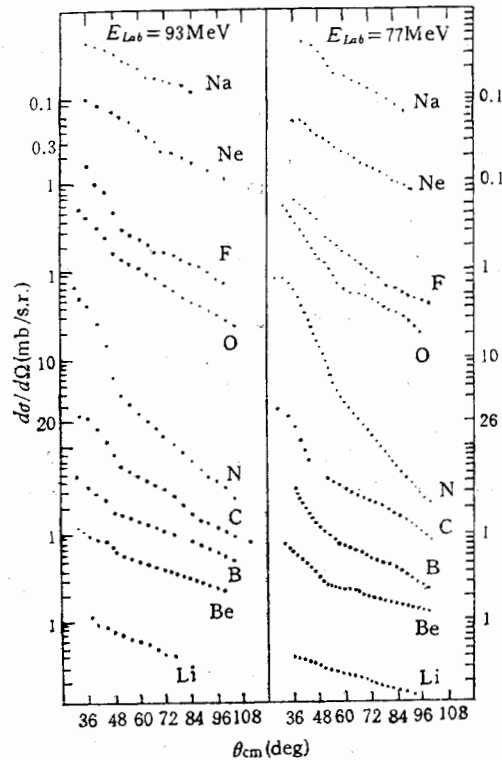


图 3 93 和 77 MeV 轰击能量下  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应出射碎片对全能谱积分的角分布

布。两种轰击能量下的角分布都展现前冲型特征，并且由 QE 和 DIC 两种组分构成，它的对应图形曲线的两种斜率。DIC 组分的斜率随 TKEL 增加逐渐变平坦。由 DIC 过程似统计性质，可以有  $d^2\sigma/dE \cdot d\Omega \propto \exp(-\mu\theta)/\sin\theta$ ，用它拟合 DIC 部分的角分布得到不同 TKEL 下的角分布衰减系数  $\mu$ ，从  $\omega\tau = \frac{1}{\mu}$  推出反应时间  $\tau$ ，其中

$$\omega = \left[ \frac{2(E_{cm} - V_C)}{\mu} \right]^{1/2} / R,$$

表 3  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  在 93 和 77 MeV 轰击能量下反应时间  $\tau$  和 TKEL 关系

$E_{\text{Lab}}$ (MeV)	TKEL (MeV)	6—10	11—15	16—20	21—25	26—30	31—35	36—40	0—60
93	$\mu$ (rad <sup>-1</sup> )	5.9	4.5	2.9	1.8	1.3	1.0	0.8	1.8
	$\tau$ ( $\times 10^{-22}$ s)	0.42	0.55	0.85	1.36	1.89	2.45	3.1	1.36
77	$\mu$ (rad <sup>-1</sup> )	7.9	6.7	3.9	2.3	1.6	1.2	1.0	1.6
	$\tau$ ( $\times 10^{-22}$ s)	0.36	0.42	0.72	1.22	1.76	2.34	2.81	1.76

$E_{cm}$  和  
变长

出各  
QE 和

明显

$E_{\text{Lab}}$   
(MeV)

93

77

$E_{\text{cm}}, V_C, \mu, R$  分别为质心系轰击能量, 入射道库仑位垒, 折合质量和弹核与靶核的半径和。得到的  $\mu$  和  $\tau$  值列于表 3 之中, 从表中看出, 当 TKEL 增加时,  $\mu$  变小, 反应时间  $\tau$  变长。

图 3 给出不同元素对全能谱积分的角分布。利用前面叙述的提取  $\mu$  和  $\tau$  的方法, 提出各元素的衰减系数和反应时间  $\tau$ , 并列于表 4 中。总观各元素的角分布, 仍明显地呈现 QE 和 DIC 过程的特征, 对 DIC 部分的斜率, 随远离弹核而变小, 相应地, 反应时间变长。

图 4 给出两种轰击能量下, 不同 TKEL 间隔积分的  $Z$  分布。 $Z$  分布偏离高斯型, 但明显地比  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  反应的  $Z$  分布光滑, 在大  $Z$  的方向有一“尾巴”, 该“尾巴”随 TKEL 增

表 4  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应在 93 和 77 MeV 轰击能量下反应时间  $\tau$  与出射元素  $Z$  关系

$E_{\text{Lab}}$ (MeV)	元素	$^3\text{Li}$	$^4\text{Be}$	$^5\text{B}$	$^6\text{C}$	$^7\text{N}$	$^8\text{O}$	$^9\text{F}$	$^{10}\text{Ne}$	$^{11}\text{Na}$
93	$\mu$ ( $\text{rad}^{-1}$ )	0.1	0.2	0.4	1.4	2.5	1.5	1.1	0.2	0.1
	$\tau$ ( $\times 10^{-22}\text{s}$ )	27.7	13.9	6.9	2.0	1.1	1.8	2.5	13.9	27.7
77	$\mu$ ( $\text{rad}^{-1}$ )	0.1	0.2	1.0	1.1	3.4	1.5	1.3	0.2	0.2
	$\tau$ ( $\times 10^{-22}\text{s}$ )	32.2	16.1	3.2	2.9	0.9	2.1	2.5	16.1	16.1

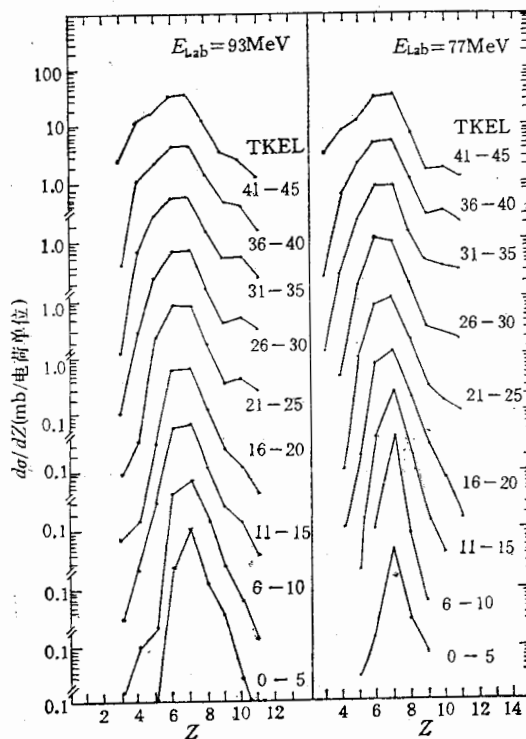


图 4 在 93 和 77 MeV 轰击能量下,  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应中出射碎片在不同 TKEL 下对角度 ( $20^\circ < \theta_{\text{cm}} < 110^\circ$ ) 积分的  $Z$  分布

构成, 它  
DIC 过程  
分布得到

0	0-60
1.8	
1.36	
1.6	
1.7	

大而增大。由  $Z$  分布可算出  $\bar{Z}$ ,  $\sigma_z^2$  和 TKEL 的关系, 再由 TKEL 和  $\tau$  的关系得到  $\bar{Z}$ ,  $\sigma_z^2$  与  $\tau$  的关系, 并将它们绘于图 5 中。图 4 中当 TKEL 增加时,  $Z$  分布曲线的 FWHM 变大, 这对应于图 5 中  $\sigma_z^2$  随 TKEL 变大而变大, 且 93 MeV 时  $\sigma_z^2$  比 77 MeV 时大。由图 5 还可以看出随 TKEL 增加,  $\bar{Z}$  向小  $Z$  方向漂移, 开始较快, 然后变慢, 最大可达一个电荷单位。

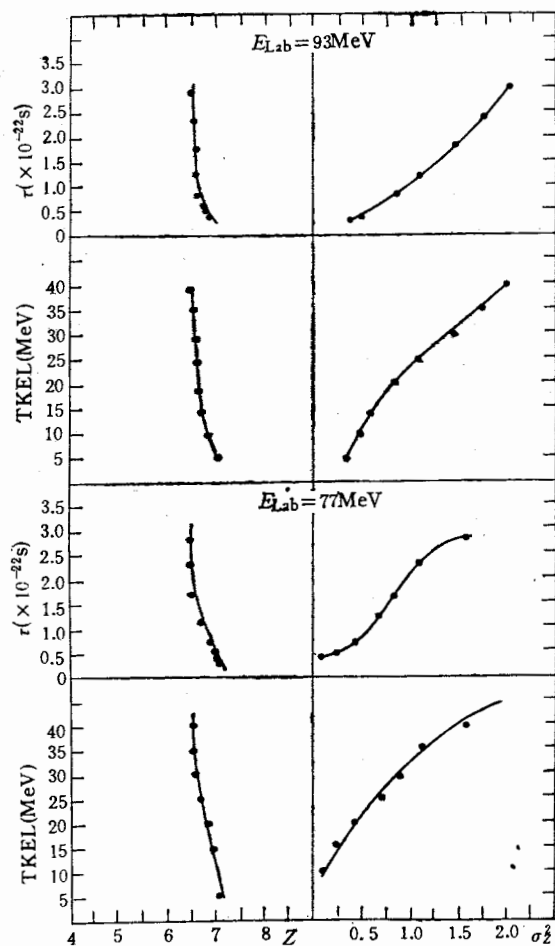


图 5 在 93 和 77 MeV 轰击能量下,  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应出射碎片电荷平均值  $\bar{Z}$  及离散  $\sigma_z^2$  与 TKEL 和反应时间  $\tau$  的关系 (图中的实线是实验点的连线)

#### 四、结论和讨论

实验得到 93 MeV 和 77 MeV  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  出射类弹碎片的能谱、角分布、 $Z$  分布及它们之间的关系, 和我们进行的用  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  及  $^{16}\text{O}$  作炮弹的轻系统碰撞实验中一样<sup>[3-6]</sup>, 证实了这两个轰击能量下的  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应中确实有深度非弹性反应机制存在, 具有与人们研究较多的重的和中重系统的深度非弹性碰撞的基本特征与规律性。

核  
散  
量  
互  
作  
用  
各  
种  
距  
离  
显  
然  
统  
一  
作  
程  
度  
非  
核  
定  
大  
心  
深  
但  
TK  
慢  
态  
由  
不  
势  
不  
的  
布  
中  
布

得到  $\bar{Z}$ ,  
FWHM  
大. 由  
可达一个

实验观察到的反应产物的能谱, 大体上分成两个组分: 作用时间短, 偏转角小, 交换核子少, 能量耗散少的准弹组分; 及随作用时间增长, 偏转角增大, 交换核子较多, 能量耗散逐渐增大最后达到全弛豫动能的深度非弹组分. 随轰击能量增加, 准弹组分出射的能量也增加, 但全弛豫动能增加很少. 轻系统的全弛豫动能除库仑能外, 离心能和剩余核相互作用不能忽略, 全弛豫动能随轰击能增加而稍有增加是离心能增加造成的. 表 2 表明用分离距离  $r_0 = 1.31 \text{ fm}$  时的库仑能, 离心能和核能之和可拟合两种轰击能量下, 所有各种出射碎片的全弛豫动能. 而库仑能仅是全弛豫动能的  $\frac{2}{3} - \frac{3}{4}$ . 文献 [4] 中拟合

$^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  全弛豫动能时, 考虑了碎片形变, 在形变自由度全弛豫的假设下, 用分离距离参数  $r_0 = 1.2 \text{ fm}$ , 可用考虑碎片形变的库仑能, 离心能和核势之和拟合全弛豫动能. 由于形变减小了, 库仑能, 离心能及核势之和需要有较小的半径参数来拟合全弛豫动能. 显然, 对不同碰撞参数的轨道, 随反应时间的增长, 角动量和能量逐步耗散, 核子逐步交换, 形变逐步发展的动力学计算才能更好地描述整个反应过程. 而且对于轻系统, 由于统计和量子效应造成的涨落比重系统和重系统有更大的影响, 对重系统和重系统已有了考虑所有这些因素的计算<sup>[10]</sup>, 我们正在进行把这种计算作适当修改用于轻系统的工作.

在角分布中观察到的两种不同斜率的组分, 小角度处斜率较大的部分对应于准弹过程, 较大角区中斜率较小的部分对应于深度非弹性过程, 这样就可以从实验上大体分出深度非弹性反应及准弹反应的贡献. 深部非弹组份的角分布的斜率随 TKEL 增大及转移核子数增多而变小; 这实际上也反映了反应的弛豫过程. 我们还可根据角分布的斜率来定出平均的深度非弹互相作用时间及作用时间随能量耗散而增大的关系(表 3、4). 它们大致在  $10^{-22}$  秒量级, 比较重的和中重的系统反应时间短.

在双核系统中, 随相互作用时间的增加, 交换的核子数逐渐增加, 产物电荷分布的重心应该逐步向最低势能点漂移.  $Z$  分布宽度也应逐渐增加. 根据液滴模型计算, 在发生深度非弹的平均入射角动量下, 势能面是抛物线型的, 最低点在对称电荷处  $\left(\frac{Z_p + Z_T}{2}\right)$ .

但实验结果表明, 电荷分布重心向小  $Z$  方向漂移, 和简单的扩散模型预言的方向相反, 小 TKEL 时漂移较快, 大 TKEL 时基本上不变. 电荷分布的宽度在小 TKEL 时增长较慢, 随后增长较快. 这些都是液滴模型计算的势能面无法解释的. 用实验核质量计算基态反应  $Q$  值的势能面表明, 在注入点 ( $^{14}\text{N}$ ) 左边有一个势能谷, 注入点在谷的右边, 这是由于轻出射碎片的结构效应造成的. 这个势能谷使系统向小  $Z$  方向漂移, 而且初始阶段不易交换核子, 使  $\sigma_2^2$  增加较慢. 随着动能耗散, 核温度升高, 壳效应影响变小, 液滴模型势能面起作用, 造成向大  $Z$  方向往回漂移及交换核子容易的趋向, 使大 TKEL 时  $Z$  基本不变,  $\sigma_2^2$  增加较快及高  $Z$  方向尾巴逐步增加等结果. 在用  $\alpha$  结团结构强烈的  $^{16}\text{O}$  作弹核的  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  反应中, 这种效应更加强烈<sup>[6]</sup>, 在用  $^{14}\text{N}$  作为弹核的  $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$  反应中,  $Z$  分布比  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  的  $Z$  分布光滑, 也证明了这一点. 一些重系统和重系统深度非弹研究中早已发现, 质量漂移大大小于输运理论计算结果. 例如  $\text{Kr} + \text{Er}$  反应中, 发现电荷分布重心基本上不变, 而不是理论预言的向对称方向漂移. 目前存在各种解释<sup>[12, 13]</sup>, 其中之

及它们  
证实了  
人们研



一是壳效应的影响<sup>[14]</sup>。我们轻系统的实验结果似乎支持了这一看法。

### 参 考 文 献

- [1] J. Galin, *J. Phys.*, C5-83 (1976), 37.  
 [2] M. Lefort, C. Ngô, *Ann. Phys.*, 3(1978), 5.  
 [3] 吴钟立等, 高能物理与核物理, 5(1981), 364.  
 [4] 谢元祥等, 高能物理与核物理, 8(1984), 746.  
 [5] 沈文庆等, 高能物理与核物理, 9(1985), 332.  
 [6] 沈文庆等, 高能物理与核物理, 9(1985), 611.  
 [7] 尹淑芝等, 93 MeV<sup>14</sup>N + <sup>27</sup>Al 深部非弹反应的研究, 高能物理与核物理, 待发表。  
 [8] 沈文庆等, 高能物理与核物理, 7(1983), 500.  
 [9] 郭忠言等, “大面积双维位置灵敏电离室离线分析程序”, 核技术, 待发表。  
 [10] H. Feldmeier, Nuclear Structure and Heavy Ion Dynamics, (1984), LXXXVII Corso. Soc. Italian di Fisica, Bologna, Italy.  
 [11] H. Freiesleben, GSI 内部资料。  
 [12] H. Feldmeier, GSI Preprint, GSI-84-19.  
 [13] L. G. Moretto, *Z. Physik*, A310 (1983), 61.  
 [14] G. Wolshin, International School of Physics “Enrico Fermi”, Varenna, Italy, July 1979.

## THE RESEARCH OF DIC PROCESS INDUCED BY 92MeV AND 77MeV <sup>14</sup>N AND <sup>27</sup>Al

GUO ZHONG-YAN SHEN WEN-QING ZHU YONG-TAI QIAO WEI-MIN

YIN SHU-ZHI ZHANG WEN-LONG WU EN-JIU

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

### ABSTRACT

The projectile-like fragments of <sup>14</sup>N + <sup>27</sup>Al reaction ( $E_{\text{Lab}} = 93$  and  $77$  MeV) were measured by using the large area position sensitive ionization chamber. The contour plots of  $d^3\sigma/d\Omega dE dZ$  in TKE- $\theta$  plane, angle distributions integrating over different TKEL window, the Z-distribution and angle distributions of different fragments from Li to Na were obtained. Variations of  $\sigma_z^2$ ,  $\tau$  with TKEL were deduced. A brief discussion of the experimental results was given also.

可以  
原子  
四极  
与此  
出了  
对研  
探索。  
达旋<sup>1)</sup>  
他并  
Primal  
在此基  
体讨论  
算子是

1) 本  
本