

80.6MeV¹⁶O 轰击 ²⁷Al 出射类弹 碎片的测量

沈文庆 尹淑兰 郭忠言 詹文龙 诸永泰

靳根明 乔卫民 邬恩九

(中国科学院近代物理研究所)

姜承烈

(中国科学院原子能研究所)

摘 要

用大面积位置灵敏电离室测量了 80.6MeV¹⁶O 轰击 ²⁷Al 时产生的出射类弹碎片,得到了从 Li 到 Na 的能谱、角分布、 $E-\theta$ 平面上的 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$ 等高线图及 Z 分布;导出了准弹和深部非弹的截面;并对实验结果进行了讨论。

一、引 言

七十年代初期发现重离子轰击靶核时会引起一种叫做深部非弹性反应的核反应^[1-3]。从此以后深部非弹性反应的研究成了重离子核反应研究领域的一个重要组成部分。这种反应介于直接反应和复合核反应之间。在这种反应过程中发生了大量相对运动动能的耗散,一部分轨道角动量弛豫成内禀角动量,中子质子比自由度、形变自由度、质量不对称自由度等均发生弛豫。现在这种反应已成为研究非平衡态统计力学及核反应过程动力学的有力工具。到目前为止,对深部非弹性反应的研究大部分集中在较重的弹核-靶核系统上^[4,5],对较轻的弹核-靶核系统研究工作进行得并不多。虽然由于系统轻,核子数少,对于从非平衡态的统计力学角度来研究深部非弹不利,但是由于系统轻可避免裂变造成的干扰,发射粒子和壳效应影响大,对于研究这二者的效应还是有利的^[6]。中国科学院近代物理研究所已经进行过¹²C 轰击 ²⁷Al、⁴⁰Ca 准弹和深部非弹反应的研究^[7-8],并用简单的扩散模型进行了理论拟合^[9]。发现对这样的轻系统,扩散模型可拟合实验数据的一般倾向,但是在有强烈准弹影响的小角区拟合不好,当然也不能拟合由于壳效应、奇偶效应等造成的 Z 分布偏离高斯分布的影响。为了进一步深入研究轻系统的深部非弹的一般倾向,特别是 Z 分布的平均值和离散的平均倾向以及入射粒子和靶核结构效应、奇偶效应及

类弹碎片发射粒子的影响, 我们选用 1.5 米迴旋加速器可给出的最重的炮弹 ^{16}O 轰击 ^{27}Al 靶, 用大面积位置灵敏电离室测量了类弹产物。

1976 年 T. M. Cormier 等^[10] 测量了 90 MeV 和 100 MeV ^{16}O 轰击 ^{27}Al 的深部非弹转移。1980 年 T. Mikhmo 等研究了 88 MeV $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 的多核子转移和反应 Q 值的依赖关系^[11]。1983 年 M. Sato 等人研究了 88 MeV、70 MeV、60 MeV ^{16}O 轰击 ^{27}Al 产生的多核子转移反应^[12]。这些研究工作得出结论: 能量降到 88 MeV 的 ^{16}O 轰击 ^{27}Al 还存在深部非弹。而且发现 ^{12}C 产额得到特别的加强。我们选取轰击能为 80.6 MeV, 研究此时是否还存在深部非弹, 并着重研究 Z 分的平均值和离散。

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 87.3 MeV 的 $^{16}\text{O}^{+5}$ 离子, 经过光栏系统, 在靶上得到直径为 3 mm, 流强约 50 nA 的离子束。为了降低油沾污, 用 $2\mu\text{m}$ 厚的 Ni 窗把加速器和靶室的真空分开, 用涡轮分子泵获得真空, 并在靶周围放置一个液氮冷阱以降低油在靶上的累积。靶子为约 $800\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚的无衬 ^{27}Al 靶。为了除去表面的氧化铝及其他杂质, 用电子溅射法对靶进行了清洗和表面分析。实验过程中照射约 10 小时后就换一块新靶。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。该电离室及其靶室, 供气和电子学系统的细节可参阅文献 [13]。实验中大面积位置灵敏电离室在三个角区进行了测量: $\theta_1 = 10^\circ - 28^\circ$, $27^\circ - 48^\circ$, $47^\circ - 68^\circ$ 。数据离线处理, 转换到质心系后把三个角区的数据拼接

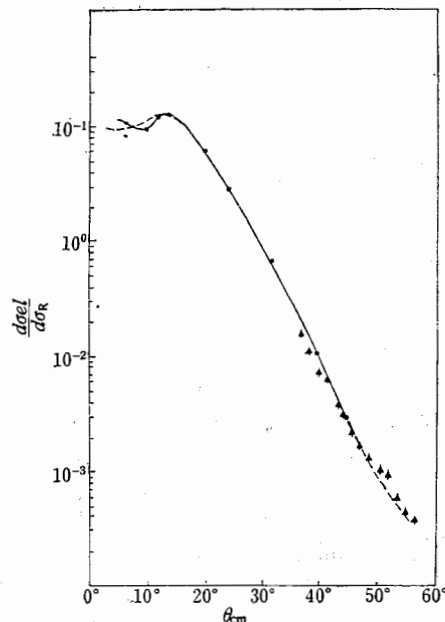


图 1 弹性散射角分布及光学模型(实线)和 Frahn 模型(虚线)的拟合

●取自文献[14], ▲取自本工作。

起来,连接区数据在实验室有 2° 重叠,拼接时采用了求平均或光滑化处理。

用 Plurimat-N 多参数系统进行在线数据获取,逐个事件的数据记录在磁带上。在小角区 ($10^\circ-28^\circ$) 有很强的弹性散射计数。为了减小磁带上记录的数据量,从而减少离线处理时间,同时也为了减小多参数获取系统的死时间造成事件漏记,在该角区对弹性散射部分采用了计数率分除器。在 $27^\circ-48^\circ$ 角区未采用计数率分除器,弹性散射计数是可靠的,得出的结果和文献 [14] 在重叠的角区基本一致。我们的数据在更大角区的趋势也是对的,可见图 1。

三、数据处理方法

实验数据是在甘肃省计算中心 WANG 2200VS 计算机上进行离线处理的。离线处理程序的细节可参看文献 [15]。实验中磁带对每个事件记录了 ΔE_1 、 ΔE_2 、 ΔE_3 、 ΔE_R 、 X 、 Y 六个参数。用线性化子程序组对 ΔE_1-E_T 二维图进行线性化,导出反应产物的核电荷数 Z 。该软件来自文献 [16]。用 Northcliffe 和 Schielling 的能损表^[17]对出射粒子进行了 Mylar 膜,半靶厚中的能损修正后,得到出射粒子的能量 (EL_3) 和核电荷数 (Z)。同时从几何参数 x 、 y 可得到出射方向 (θ_1 , φ_1) 的伪逐个事件谱。

假设反应事件是两体反应事件,根据二体反应运动学把实验室伪逐个事件转换成质心系中的 $E_{cm} = E_{3c} + E_{4c}$ 、 θ_{cm} 、 Z 伪逐个事件谱。转换中用到质量时采用相应事件 Z 值的最稳定同位素的质量值。读 E_{cm} 、 θ_{cm} 、 Z 伪逐个事件谱可得到各种我们需要的累积谱。

线性化方法得出的电离室 Z 分辨能力 $Z/\Delta Z \sim 27$ 。

四、实验结果

产物分布以弹核和靶核为中心形成两组。类靶产物射程短,大都阻止在 ΔE_1 中,仅测到能谱高能区的部分,而大部分 α 粒子未被全阻止在电离室中,因此我们仅分析了从 Li 到 Na 的出射类弹产物。

从 Li 到 Na 的不同质心角下的质心系能谱都表现出随角度增加峰位逐渐降低的趋势,反映了能量在逐步弛豫。峰值处截面也随角度增加逐渐下降,但到 70° 以后峰位值截面就基本不变了,这都反映出深度非弹的特征。和文献 [7、8] 不同,在这些能谱上基本没有结构。这可能是由于没有鉴别同位素,而同一元素的不同同位素的不同激发态相互叠加,加上所用的靶较厚及电离室本身能量分辨不够好(实验中总能量分辨约为 $2\%-3\%$) 造成的。但可以看到在 $25^\circ-45^\circ$ 区域内能谱不对称,高能区截面大,质心角增大时能谱变宽,可能反映了未分出的孤立态准弹的影响。

图 2 显示了对全能谱积分的不同元素的角分布。以 5MeV 为间隔,积分可得到不同 TKEL 下不同元素的角分布。它们基本上都是向小角度前冲的指数型分布。在这些角分布中可以看到,当 TKEL 增加或出射碎片远离入射粒子时角分布下降陡度变小,随角度增加角分布也在变平。

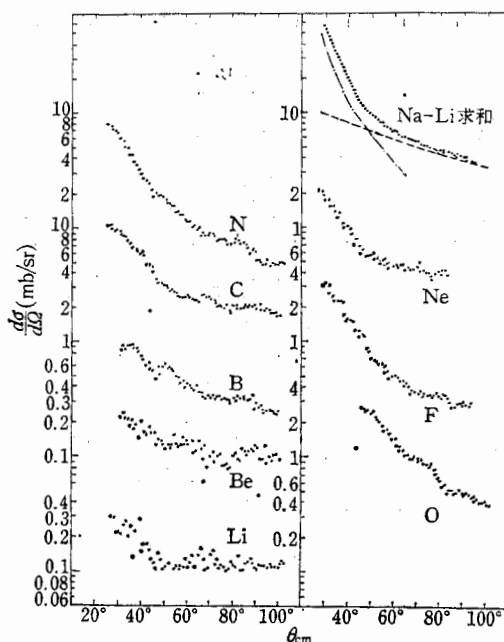


图 2 不同出射元素的对全能谱积分的角分布. 图中标 Li—Na 的曲线是对 Li—Na 求和, 对全能谱积分的角分布.

由 Be—Na 的 $E-\theta$ 平面上的 $\frac{d^2\sigma}{dQdE}$ 等高图 (图 3) 可更清楚地看出能量随角度增加的弛豫和产额分布随 TKEL 增加及远离入射粒子时逐渐变平等反应从准弹向深部非弹过渡的特征. 图左下方 F、Ne、Na 在小 TKEL 和小 θ_{cm} 处产额有些增长, 可能是混入和大角类弹相应的小角出射的类靶造成的. 对 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$, 出射类弹为 Ne, 相应类靶为 Na; 出射类弹为 Na, 相应类靶恰是 Ne. 此时影响最大. 在类弹远离 Ne、Na 时这种影响就很快减小了. 当然类弹碎片发射轻粒子, 例如 α 等效应, 也可产生这方面的影响.

图 4 给出了 $30^\circ \leq \theta_{cm} < 90^\circ$ 内积分且对全能谱积分的 Z 分布. Z 分布明显地偏离高斯分布, 例如有很强的碳产额, 反映了出射粒子的核结构, 奇偶、类弹碎片出射粒子等效应.

对 Li—Na 求和, 对全能谱积分的角分布 (图 2), 在小角区和大角区有不同的下降速度. 小角区分布更陡些, 这可能反映了小角区主要是准弹, 大角区主要是深部非弹. 用 $\frac{d\sigma}{d\Omega} = A \frac{1}{\sin \theta} \exp(-\mu\theta)$ 拟合大角区的角分布 (图 2 中虚线) 导出 μ 值、 A 值. 根据此 μ 及 A 外推到 0° 和 180° , 且对 θ_{cm} 积分得出的截面为 101 mb, 这是该轰击能量下该系统深部非弹性截面的总和. 拟合小角度区的角分布 (图 2 中点划线), 并根据该角分布的 μ 及 A 外推到 0° 和 180° , 且对 θ_{cm} 积分得出的截面为 157 mb, 这可能对应于该轰击能下该系统的准弹截面. 拟合角分布导出 μ 和 A 的误差并不大 (小于 10%). 绝对归一时, 靶厚, 束流积分和立体角的误差总计是 10—20%. 但角分布外推得上述划分准弹和深部非

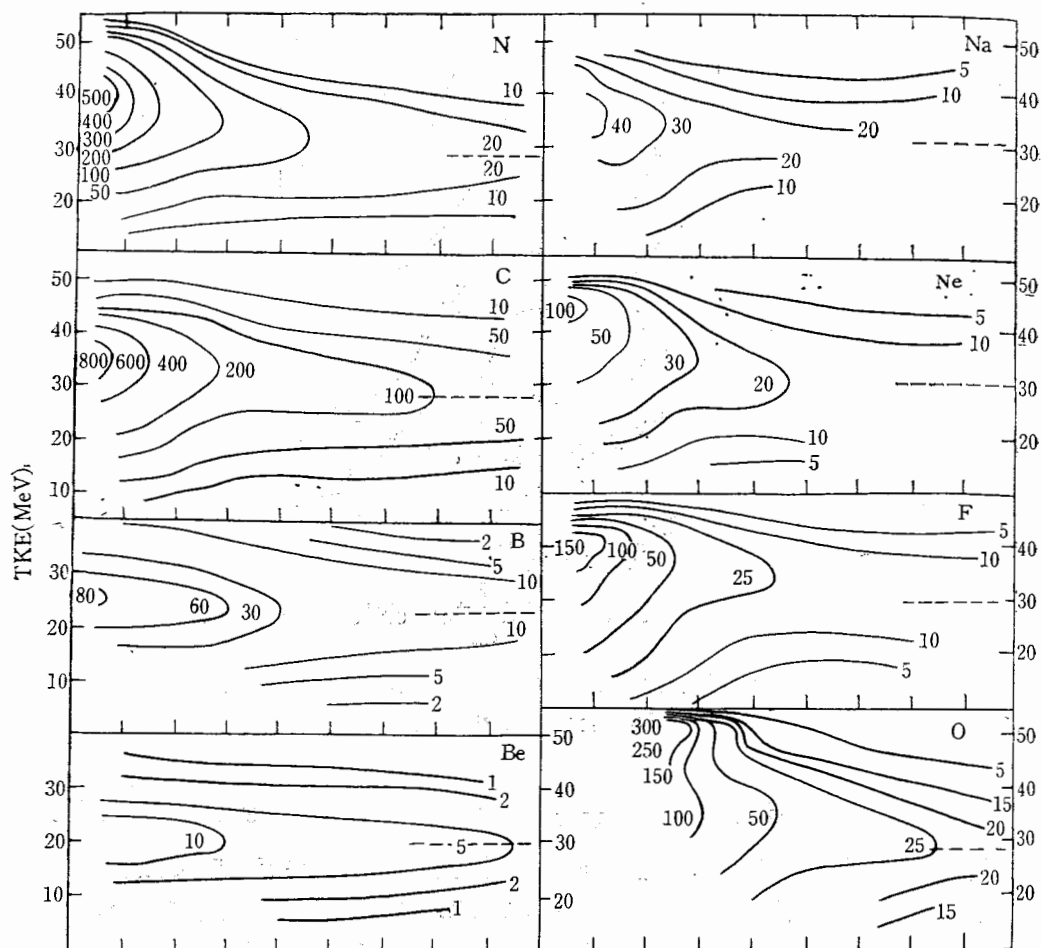


图3 出射类弹 Be—Na 的 $E-\theta$ 平面上的 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$ 等高图。

弹的方法可能会导入较大的误差,例如准弹在我们测的更小角区的角分布可能不是前冲型的,而是小角成峰的,这样上述外推将会带来很大的误差。大电离室在实验中一次覆盖 21° 角区,实验数据在同一角区相对误差是较小的。

五、讨 论

1. 能量弛豫

从各个质子角度的深部非弹反应质心系能谱可以得到其平均总动能。对不同元素它都随角度增大而逐步减小并在大角度趋于一个常数,即能量逐渐弛豫,从部分阻尼达到全阻尼。对不同元素的全阻尼动能值列在表1中,该值的误差在 $\pm 1.2\text{MeV}$ 左右。要拟合这个全阻尼能量,仅考虑库仑能 $\left[\frac{Z_3 \cdot Z_4 \cdot e^2}{r_0(A_3^{1/3} + A_4^{1/3})} \right]$ 得到的 r_0 为 0.98fm 。这个值和轻系系统的文献[7]的 1.06fm 及文献[18]的 1.04fm 基本一致。这样的 r_0 和全熔合的临界半径差

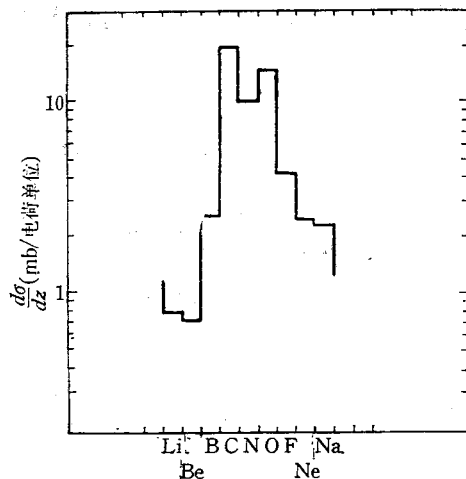


图 4 $E_i = 80.6\text{MeV}$ 时 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 对 $30^\circ \leq \theta_{\text{cm}} < 90^\circ$ 积分, 对全能谱积分的 Z 分布。

不多, 显然太低了。这说明要拟合轻系统深部非弹的全阻尼能量, 除了库仑能外还要考虑离心能、核能及其他因素的影响, 采用文献 [19] 的方法考虑库仑能、离心能和核能后拟合深部非弹全阻尼能量所得的出射道分离时的半径参数 $r_f = 1.32\text{fm}$ 。拟合结果显示在表 1 中。可以看出 r_f 介于全熔合的临界半径和核势开始起作用的互作用半径参数^[20] $r_{\text{int}} = 1.65\text{mf}$ 之间。这表明深部非弹反应在比准弹作用半径小但比全熔合半径大的区域, 可能是一个比较合理的量。

表 1 全阻尼动能

出射元素	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
实验全阻尼动能 (MeV)	16	19	22	25	27	28	29	30
($r_0 = 0.98\text{fm}$) 库仑能 (MeV)	15.4	18.9	21.9	24.3	26.2	27.6	28.6	29
($r_f = 1.32\text{fm}$) 库仑+离心+核能 (MeV)	15.9	19.4	22.3	24.8	26.9	27.9	28.7	29.3

2. 强的碳产额的缘由

在测到的出射产物中碳元素的产额特别高, $30^\circ \leq \theta_{\text{cm}} < 90^\circ$ 积分的碳产额为 100mb, 而其他元素的产额均在 50mb 以下。这是和文献 [10] 观察到的 90MeV、100MeV¹⁶O + ²⁷Al 的情况一致的。我们分析产生这样强的碳产额的原因可能为两个: ①除 α 、 p 外, 出射 ¹²C 的 Q_{ss} 最低, 比出射 ¹⁴N 低 3MeV, 比出射 ¹⁰B 低 7MeV, 比出射 ¹⁹F 低 9MeV。由于轰击能较低, Q_{ss} 对出射产物的产额有很大的影响, 造成了碳产额的增强。②激发 ¹⁶O 或者深部非弹产生的 ¹⁶O 碎成 α 和 ¹²C 或发射 α 使得碳产额增强。如果我们仔细分析一下 Z 分布随 TKEL 的变化得 Z 分布随产物出射角的变化^[21], 就会发现碳产额和氧产额之比随 TKEL 增加得出射角的增加在增大。这可能意味着对较大的弛

豫能量、深部非弹产生的氧有较大的激发能,从而容易有较大几率发射 α 。

3. 反应截面的分配

根据对 Li—Na 求和,对全能谱积分的角分布导出的深部非弹性反应截面为 101mb, 准弹截面 157mb。

由于准弹性反应主要发生在表面区,用 Frahn 的闭合形式理论^[22] 拟合弹散导出 $\Lambda = 33.5$, 表面区模糊度 $\Delta = 2.2$ (见图 1), 其中擦边角动量 $l_g = \Lambda - \frac{1}{2} = 33$, 反应截面 $\sigma_R = 1425\text{bm}$ 。根据锐切断模型:

$$\sigma_{QE} = \frac{\pi}{k^2} [\Lambda^2 - (\Lambda - \Delta)^2] = \frac{2\pi}{k^2} \Lambda \Delta$$

$$\sigma_R = \frac{\pi}{k^2} \lambda^2$$

所以对 $80.6 \text{ MeV}^{16}\text{O} + {}^{27}\text{Al}$ 有:

$$\frac{\sigma_{QE}}{\sigma_R} = \frac{2\Delta}{\Lambda} = 0.131.$$

J. C. Acquadro 等^[23] 认为 Δ 、 λ 都和轰击能量有关,但 $\frac{\Delta}{\Lambda}$ (即 $\frac{\sigma_{QE}}{\sigma_R}$) 和轰击能量近似无关。他们分析了文献[14、10]中 ${}^{16}\text{O} + {}^{27}\text{Al}$ 的数据,导出 $\frac{\sigma_{QE}}{\sigma_R} = 0.113$, 和我们的弹散导出的值在 15% 的误差范围内是一致的。采用二者的平均值 $\frac{\sigma_{QE}}{\sigma_R} = 0.122$ 。根据拟合弹散给出的 σ_R 则可得 $\sigma_{QE} = 171\text{mb}$ 。与我们外推角分布导出的准弹截面还是一致的。

由于外推角分布导出的准弹截面的不确定性太大,我们采用 171 mb 作为准弹截面。根据 $\sigma_R = \sigma_{QE} + \sigma_{DIC} + \sigma_{fu}$, 可导出全熔合截面为 1153 mb。这和文献[14]用飞行时间谱仪测出的 $80\text{MeV}^{16}\text{O} + {}^{27}\text{Al}$ 全熔合截面 $1160 \pm 50 \text{ mb}$ 及文献[24]用正比计数器 ΔE 加半导体 E_R 测出的 81MeV 全熔合截面 $1020 \pm 50 \text{ mb}$ 是一致的(见表 2)。

根据锐切断模型 $\frac{d\sigma}{dl} = \frac{2\pi}{k^2} l$, 由文献[14]及我们实验导出的各种截面定出的擦边角动量,深部非弹和准弹分界的角动量及限制全熔合的临界角动量列在表 3 中。反应截面

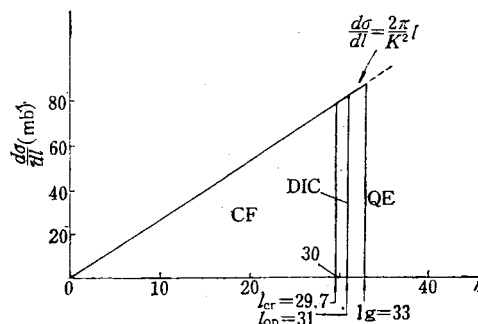


图 5 $80.6\text{MeV}^{16}\text{O} + {}^{27}\text{Al}$ 反应截面按角动量划分图。

表 2 反应截面的分配

	反应截面 $\sigma_R(\text{mb})$	准弹截面 $\sigma_{QE}(\text{mb})$	深部非弹截面 $\sigma_{DIC}(\text{mb})$	全熔合截面 $\sigma_{fu}(\text{mb})$
截面 I 来源	1556 80.6MeV 弹散光学 模型拟合 ^[14]	176 由经验规律 $\frac{\sigma_{QE}}{\sigma_R} =$ 0.113 导出 ^[23]	69 由测量的非弹性截面 245 \pm 30 减 σ_{QE} 得 到 ^[14]	
截面 II 来源	1405 测量 ^[14] 非弹性和熔 合截面和 ^[14]	159 同上	86 同上	1160 \pm 50 测量值 ^[14]
截面 III 来源	1425 本工作 80.6MeV 中间 角区弹散的 Frahn 闭合形式理论拟合	171 本工作拟合弹散 导出 $\Delta = 33.5$, $\Delta =$ 2.2 由 $\frac{\sigma_{QE}}{\sigma_R} = \frac{2\Delta}{\Delta}$ 及 [23] 值的平均值导出	101 本工作拟合 Li—Na 求和全能谱积分的 大角度角分布外推 到 0° 及 180° 求出	1153 由 $\sigma_{fu} = \sigma_R - \sigma_{QE}$ $- \sigma_{DIC}$ 导出

表 3 由锐切断模型从表 2 截面导出的各种角动量

	擦边角动量 l_{cr}	准弹和深部非弹分 界的角动量 l_{QD}	限制全熔合的 临界角动量 l_{cr}
由截面 I 导出	34.5	32.5	
由截面 II 导出	32.8	30.9	29.8
由截面 III 导出	33	31	29.7

按角动量划分的结果显示在图 5 中。

综上所述,对于很轻的 ¹⁶O + ²⁷Al 系统,在很低的轰击能量 $E_i = 80.6\text{MeV}(5\text{MeV}/A)$ 时,我们测到了准弹和深部非弹的产物;得到了产物从 Li 到 Na 的能谱、角分布、 $E-\theta$ 平面上 $\frac{d^2\sigma}{dQdE}$ 等高图;导出了反应截面在各种反应道之间的分配。结果表明,即使在全阻尼情况下,出射道动能仍明显高于终态库仑能,因此必须考虑核势和离心能的影响;对轻系统出射粒子核结构效应和类弹碎片发射粒子有明显影响,造成某些出射粒子(例如 C) 的增强,因此深入进行类弹和发射粒子符合测量及用结构效应较小的、轰击能较高的轻粒子例如 ¹⁴N 轰击类似靶的实验作为对比是很有意义的。我们已经进行了这类测量,实验数据正在分析之中。

作者们感谢杨澄中教授对本工作所做的指导。

该工作是用大面积位置灵敏电离室进行的首次实验。作者们感谢西德洪堡基金会和中国科学院对建造核电离室及其附属设备给予的财政支持;感谢西德重离子协会,以及 R. Bock 教授, A. Gobbi, H. Sann, K. D. Hildenbrand 和 G. Augustinsky 等对建造该电离室给予的帮助。

作者们感谢徐国俊同志在靶室、真空方面所做的帮助。武亚男、殷旭、苗合宾、王琦、李松林、孙述明等同志参加了上器工作,对实验做出了很多贡献。

参 考 文 献

- [1] A. G. Arkukh et al., *Nucl. Phys.*, A168 (1971), 32; *Nucl. Phys.*, A176 (1971), 284.
- [2] M. Lefort et al., *Nucl. Phys.*, A216 (1973), 166.
- [3] J. Galin et al., *Nucl. Phys.*, A159 (1970), 1467
- [4] J. Galin, *J. Phys. (Paris)*, 37(1976), 25—83.
- [5] J. R. Huizenga, *Nucl. Phys.*, A387 (1982), 257.
- [6] T. Fukada et al., *Phys. Lett.*, V.99B (1981), 317.
- [7] 吴钟立等,高能物理与核物理, 5(1981), 364.
- [8] 谢元祥等,高能物理与核物理,即将发表.
- [9] 沈文庆等,高能物理与核物理,即将发表.
- [10] T. M. Cormier et al., *Phys. Rev.*, C13 (1976), 682.
- [11] T. Mikumo et al., *Phys. Rev.*, C21 (1980), 620.
- [12] M. Sato et al., *Phys. Rev.*, C27(1983), 2621.
- [13] 沈文庆等,高能物理与核物理, 7(1983), 500.
- [14] B. B. Back et al., *Nucl. Phys.*, A285 (1977), 317.
- [15] 郭忠言等, 1982年中国科学院近代物理研究所年报.
- [16] O. Schull et al., GSI 内部资料.
- [17] L. G. Northcliffe and R. F. Schilling, *Nuclear Data Tables A7* (1970), 233.
- [18] P. Braum-Munzinger et al., *Phys. Rev. Lett.*, 37 (1976), 1582.
- [19] 吴钟立等,近物所科学技术报告汇编(第四集)p1.
- [20] W. W. Wilale et al., UR-NSRL-221.
- [21] 沈文庆等,高能物理与核物理,待发表.
- [22] W. E. Frahn et al., *Phys. Rev.*, 27C(1978), 1.
- [23] J. C. Acquadro et al., *Phys. Lett.*, 100B (1981), 281.
- [24] R. L. Kozub et al., *Phys. Rev.*, C11 (1975), 1497.

MEASUREMENT OF PROJECTILE-LIKE FRAGMENTS PRODUCED BY 80.6 MeV ^{16}O ON ^{27}Al

SHEN WEN-QING YIN SHU-ZHI GUO ZHONG-YAN ZHAN WEN-LONG

ZHU YONG-TAI JIN GEN-MING QIAO WEI-MIN WU EN-CHIU

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

JIANG CHENG-LIE

(Institute of Atomic Energy, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

The projectile-like fragments produced by 80.6 MeV ^{16}O on ^{27}Al were measured using the large area position sensitive ionization chamber. The energy spectra, angular distributions, contour plots of $d^2\sigma/d\Omega dE$ in the E - θ plane of the reaction products from Li to Na and the Z -distribution were obtained. The cross sections of the quasi and deep inelastic scattering were introduced. A brief discussion of the experimental results is also given.