

^{12}C 离子在 ^{27}Al 靶上的准弹性和深部非弹性反应

吴钟立 诸永泰 夏国中 刘补生 李发渭 范国英

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

用 ΔE - E 计数器望远镜鉴别反应产物, 研究 71.5 兆电子伏的 ^{12}C 离子在 ^{27}Al 靶上引起的准弹性和深部非弹性反应, 得到了反应产物硼、铍、锂等的能谱、角分布、以及在 E - θ 平面的 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$ 等高线图。对实验结果作了讨论。

引 言

用重离子作为弹核轰击靶核所引起的深部非弹性反应是重离子核反应的一个重要组成部分。虽然很早在研究重离子引起的准弹性转移反应时就偶然地从实验中观察到深部非弹性反应现象^[1], 但迟至 1973—1974 年才正式肯定这种新的核反应过程的存在^[2-9]。

重离子深部非弹性反应的特征, 可以简略地概述如下: 当用能量超过库仑位垒的重离子轰击靶核时, 会产生这样一种类型的核反应——在反应过程中, 相碰撞的核基本上保持其个性。但是, 相对运动动能大部份甚至全部被耗散。轨道角动量的一部份也转换为产物的内禀角动量。相碰撞核的质量和中子-质子比都有某些调整。相互作用时间比直接相互作用时间长, 但比复合核形成时间要短。在此时间内, 相碰撞核形成一个不稳固的合成系统。在合成系统全部自由度达到完全的统计平衡之前, 此系统就瓦解了。

迄今为止, 有关深部非弹性反应的知识绝大部份来自较重的弹核-靶核系统^[10,11]。对较轻的弹核-靶核系统, 研究工作做得较少^[12-21]。自然, 系统轻、核子数少, 对于观测带统计性质的深部非弹性反应现象是不利的。但另一方面, 较轻的系统可能呈现从直接相互作用到深部非弹性反应的过渡特征, 进行这方面的研究对建立统一的核反应机制理论是有益的。此外, 对于较轻的系统, 复合核裂变过程往往可以忽略, 从而可以避免裂变产物与深部非弹性反应产物混淆带来的困难。因此, 我们选取 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 这样一种可能存在深部非弹性反应现象的轻的弹核-靶核系统^[1,22], 同时观测准弹性反应和深部非弹性反应这两类反应的产物, 探索较轻的弹核-靶核系统深部非弹性反应的性状特征。

实 验

实验是在我所 1.5 米迴旋加速器上完成的。从加速器引出 71.5 兆电子伏的 $^{12}\text{C}^{+}$ 离子,经过光栏系统,在靶上得到直径为 3 毫米,束流强度 50—100 毫微安的离子束。靶子为 0.27 毫克/厘米²厚的无衬底 ^{27}Al 靶。靶室系统及探测系统示意图见图 1。

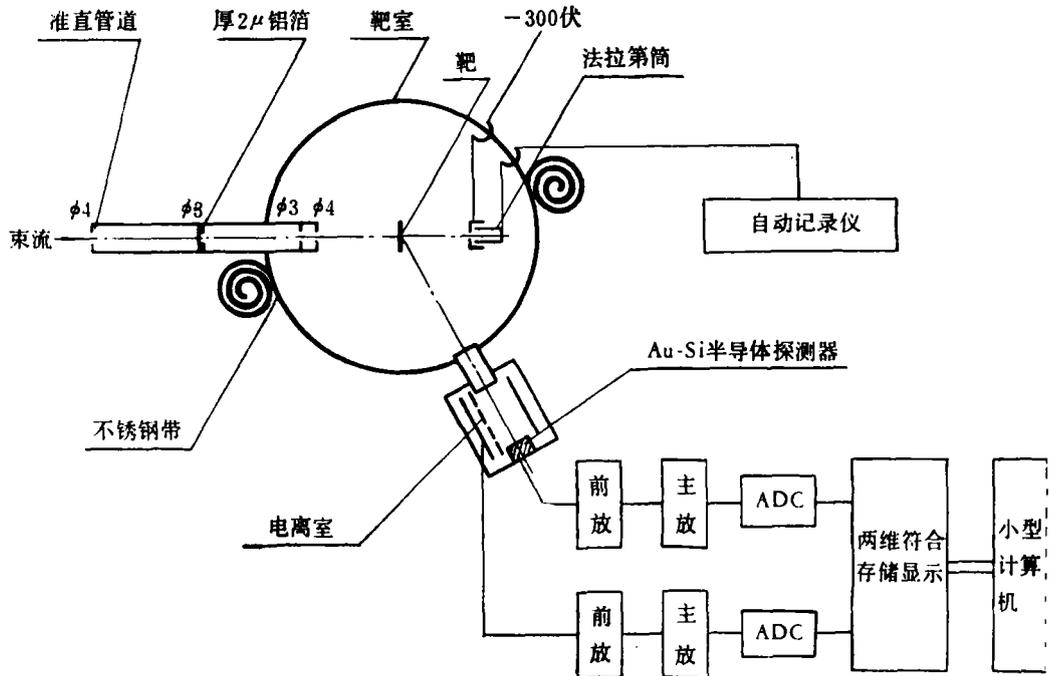


图 1 实验装置

靶室为圆柱形,直径为 30 厘米、高为 12.5 厘米。在靶室侧壁柱面上沿 θ 角方向开了一条狭长的弧形槽(从 $\theta_L = -20^\circ$ 到 $\theta_L = 145^\circ$),压上一条不锈钢带,借助于真空橡皮与聚四氟乙烯制成的复合“O”圈与靶室侧壁封接。在保持靶室真空 (1×10^{-5} 托)的情况下,钢带可沿靶室侧壁滑动。由薄电离室与金硅面垒探测器组成的 ΔE -E 望远镜固定在钢带上而处于靶室外侧。电离室工作气体为:氙气(90%)+甲烷(10%),工作气压为 80 托(相应的质量厚度为 0.653 毫克/厘米²)。入射窗为 0.26 毫克/厘米²的聚酯薄膜。为防止气体“中毒”,采用半流动式供气。

从薄电离室与金硅面垒探测器得到的讯号,分别经放大后,送入由小型电子计算机控制的多道脉冲幅度分析器作两维分析(128 道 \times 128 道),结果记录在磁带上。我们在实验室角度 $\theta_L = 10.5^\circ - 70^\circ$ 之间十二个角度分别测得了反应产物的 ΔE -E 双维谱。

数据处理分两步进行:首先根据重带电粒子在物质中的能损关系^[23]鉴别不同 Z 的产物,利用同时测得的弹性散射粒子作能量刻度,并作了靶厚、窗厚等修正,然后计算出每种

产物在各个实验室角度的能谱: $\left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}\right)_L \sim E_L$. 这里 σ, Ω, E 分别代表截面、立体角、出射道总动能, 下标 L 代表实验室系. 以上处理是在与多道脉冲幅度分析器相联的小型电子计算机上完成的. 其次, 由于实验已经证实: 至少 90% 以上的深部非弹性反应事件是两体反应事件, 故按两体反应运动学处理, 根据关系式:

$$\left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}\right)_{c.m.} = \left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}\right)_L \frac{\sin\theta_L}{\sin\theta_{c.m.}}$$

(其中 $\sigma, \Omega, E, \theta$ 分别代表截面、立体角、出射道总动能、散射角, 下标 $L, c.m.$ 分别代表实验室系、质心系) 把实验室系能谱转换到质心系, 从而得到质心系能谱、微分截面角分布及在 $E-\theta$ 平面 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$ 的等高线图. 以上处理是在 DJS-6 计算机上完成的. 在处理过程中要用到能量-射程关系^[24]以及出射道两体各自的质量. 后者根据中子过剩自由度平衡比质量非对称自由度平衡能更快地达到^[25]而给出:

$$\frac{M_3}{Z_3} = \frac{M_4}{Z_4} = \frac{M_1 + M_2}{Z_1 + Z_2},$$

其中 $M_i (i=1-4), Z_i (i=1-4)$ 分别代表弹核、靶核及反应产物的质量数和原子序数.

结果与讨论

实验测得的双维谱, 经过处理后可以鉴别出从氦到铝的各种产物元素. 产物分布以弹核和靶核为中心形成两组, 氟的产额几乎可忽略. 这里仅给出轻产物: 硼、铍、锂的结果, 并予以讨论.

首先给出三个典型的能谱(图 2). 硼的能谱清楚地显示出: 可以分成两个不同的组分. 其一是高能组分, 由两个高斯型的窄峰组成. 根据峰对应的能量, 可以定出: 第一个峰相应于终态核 ^{11}B (以及 ^{28}Si) 处于基态, 第二个峰相应于终态核 ^{11}B 处于第一激发态, ^{28}Si 处于基态. 其二是低能组分, 分布较宽, 接近于钟罩形. 离擦边角稍远的较大角度的硼能谱, 则仅有低能组分, 随角度增大, 高能组分逐渐减弱以至完全消失. 我们将每个角度硼的能谱从高能端起按 2.5 兆电子伏能量间隔积分, 然后按对应的能量间隔作出一系列角分布. 可以看出: 对第一、第二两个能量间隔 (45—47 兆电子伏, 42.5—44.5 兆电子伏, 正好分别相应于图 2 (a) 的第一、第二个峰) 积分得到的角分布在擦边角处成峰. 对第三个能量间隔积分得到的角分布已开始转变为随角度增大而单调下降. 以后各能量间隔积分得到的角分布随角度增大而缓慢下降以至于在大角度处逐渐变平. (图 3) 仅给出能量最高的三个能量间隔的结果. 此外, 对于我们的实验所选用的这样的轻系统而言, 裂变位垒是相对高的. 而且实验观测到: 相应于对称裂变产物的氟产物的产额几乎可以忽略, 因此弹核与靶核全熔合后裂变的贡献不足以明显影响硼的能谱. 综上所述, 我们认为: 硼能谱的高能组分来源于准弹性转移反应, 低能组分主要来源于深部非弹性反应. 从后面将给出的在 $E-\theta$ 平面 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$ 等高线图 (图 6) 可以看出这两种反应机制对硼产物的贡献的全貌. 然而, 在擦边角附近, 在硼能谱的低能组分的高能端还有一、两个高斯型的小峰叠

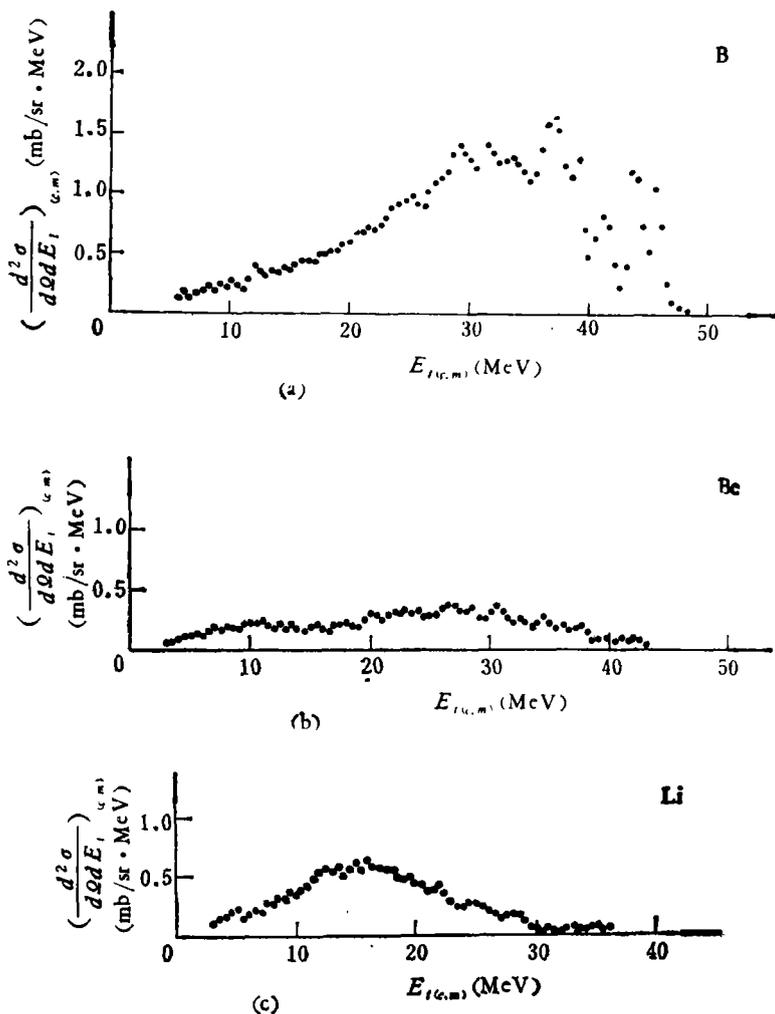


图 2 轻产物硼、铍、锂的能谱 $\theta_{c.m.} = 25^\circ$
 (a) 硼的能谱 (b) 铍的能谱 (c) 锂的能谱

加于其上, 而不是平滑结构. 一种可能性是: 终态核处于较高激发态的准弹性转移反应产物能谱叠加在深部非弹性反应产物能谱上, 但本实验不能明确判别, 姑且存疑. 铍能谱 (图 2 (b)) 也可以大体上区分为两部分, 高能组分相应于准弹性反应, 低能组分相应于深部非弹性反应. 同样也可以按不同能量间隔积分能谱得到角分布来协助判断 (图 4). 但准弹性反应产物的产额已相对地低了. 锂的能谱 (图 2 (c)) 基本上相应于深部非弹性反应, 准弹性反应产物的产额几乎可忽略.

我们把各个角度的产物硼、铍、锂的能谱中相应于深部非弹性反应的组分分别积分, 就可以得到深部非弹性反应产物硼、铍、锂的微分截面的角分布 (图 5). 此角分布显示出轻的弹核-靶核系统深部非弹性反应的特征^[21]: 在小角度向前突起, 在较大角度逐渐变平. 而且, 随着产物与弹核的 Z 差别增大, 向前突起愈小, 变平得愈快. 铍的微分截面比锂的微分截面稍小 (而不是稍大) 可归因于 ^8Be 在从靶子到探测器的途中衰变, 而不能被探测到.

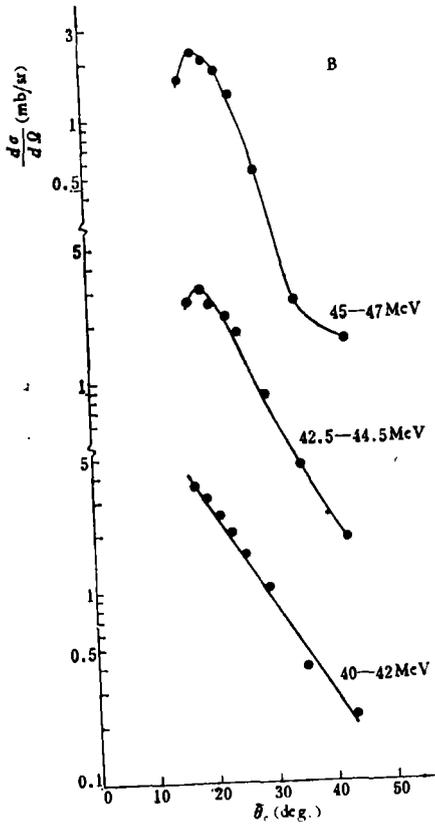


图3 对各个角度硼的能谱按 2.5 兆电子伏能量间隔积分得到的角分布。这里仅给出能量最高的三个结果

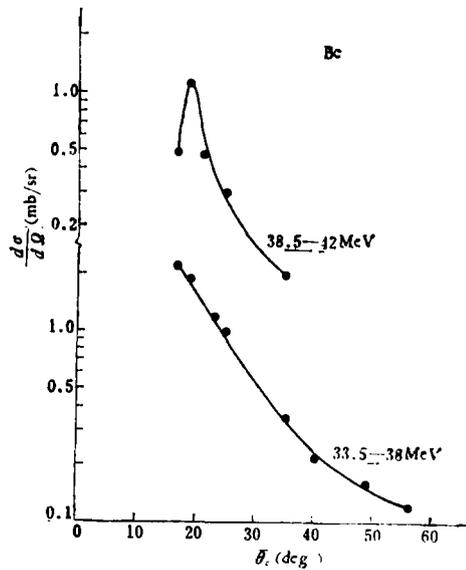


图4 对各个角度铍的能谱按 2.5 兆电子伏能量间隔积分得到的角分布。这里仅给出能量最高的两个结果

最后给出反应产物硼、铍、锂在 $E-\theta$ 平面 $\frac{d^2\sigma}{dQdE}$ 的等高线图 (图 6、7、8)。

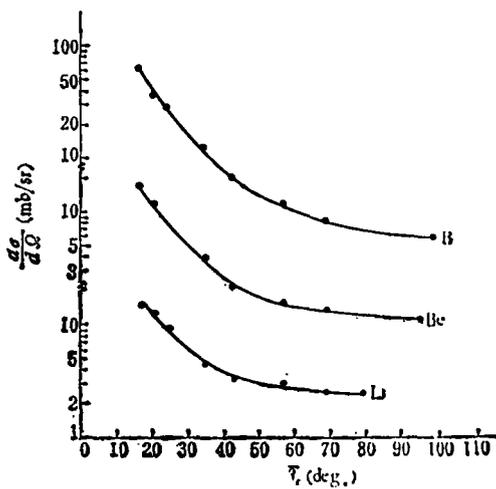


图5 深部非弹性反应产物硼、铍、锂的角分布

$\frac{d^2\sigma}{dQdE}$ 等高线图 (图 6) 可看出: 准弹性反应产物在擦边角处形成峰。

深部非弹性反应产物则形成一条斜的岭。在小角度, 此岭突起; 在较大角度, 此岭逐渐变平, 宽度也逐渐变为常数。这与类似的实验结果^[10,19]是一致的。不同的是: 在擦边角附近, 在深部非弹性产物形成的岭上叠加了一些峰。

前面已作了解释。从铍的 $\frac{d^2\sigma}{dQdE}$ 等高线图 (图 7) 可以看出: 准弹性反应产物在擦边角处也形成一个峰, 但强度较硼弱。深部非弹性反应产物形成的岭的倾斜度也较硼缓和。从锂的 $\frac{d^2\sigma}{dQdE}$ 等

高线图(图 8)可看出:准弹性反应产物的产额几乎可以忽略.深部非弹性反应产物形成的岭几乎为平的,只在向前方向有些突起,而且其分布宽度也随角度增大而迅速变为常数.这正是许多实验结果^[10]证实的:随着产物与弹核 Z 差别增大,有关自由度的弛豫程度逐渐加深.随着产物出射角度的增大,动能逐渐被阻尼.

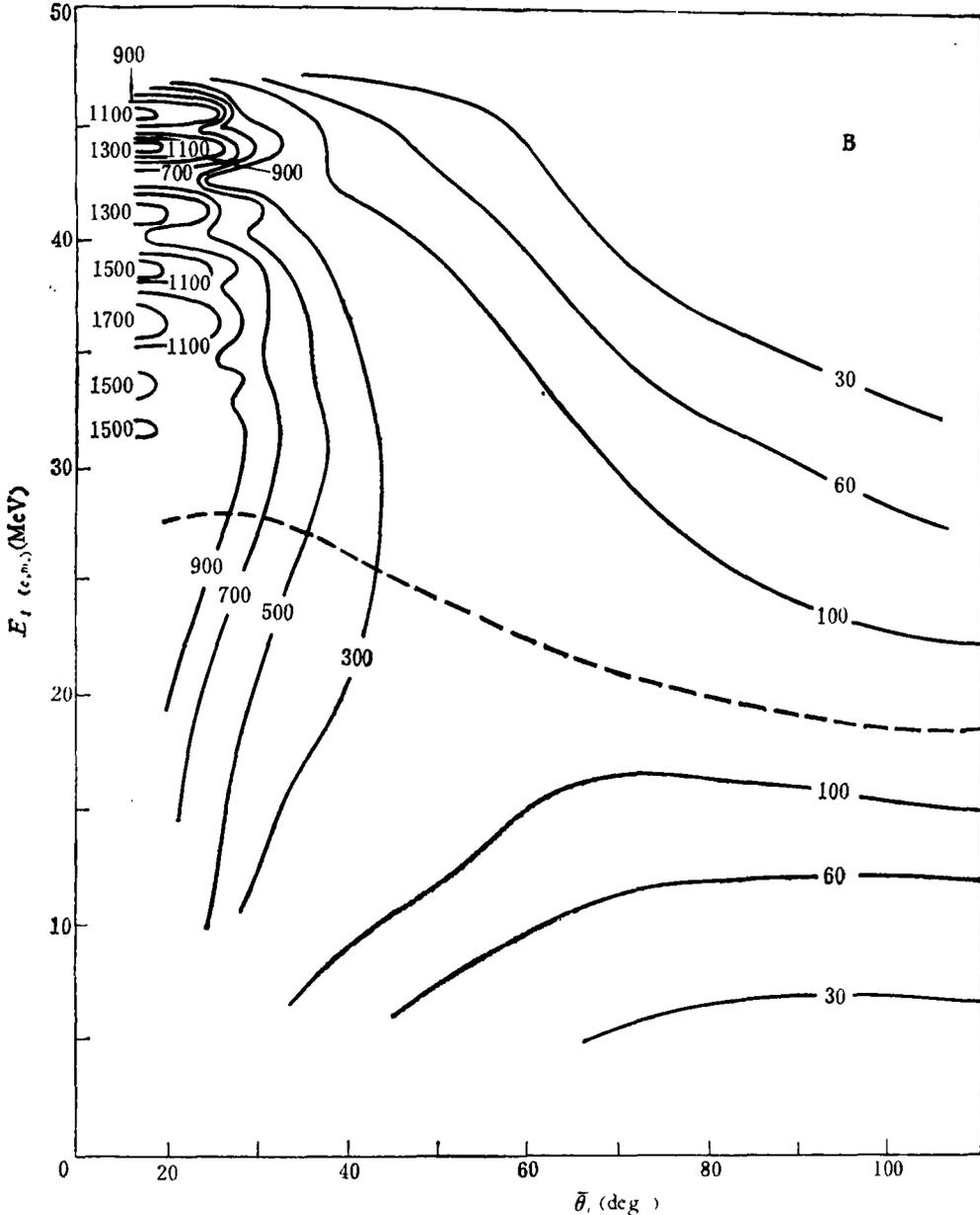


图 6 硼的 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$ 等高线图 纵轴——出射道质心系总动能; 横轴——质心系角度;
等高线单位——微靶/球面度·兆电子伏

由各个角度的深部非弹性反应能谱可以得到其平均总动能值(在图 6、7、8 中以虚线表示).可以看出:随角度增大,出射道平均总动能趋于常数.亦即通常所说的入射动能由

部分阻尼逐渐达到完全阻尼。由我们的实验结果(图6、7、8)得到的此常数值,对于硼、铍、锂三种产物,分别为: 18、16、13兆电子伏,误差为: ± 0.8 兆电子伏左右。通常认为

为^[10,18]: 对于此常数总动能值,不仅要考虑出射道库仑能的贡献,而且要考虑离心能、核吸引能以及粒子发射带走能量等贡献。诚然如文献[19]在讨论文献[18]的结果时所指出: 只要 r_0 值取得足够小,仅仅考虑库仑能的贡献, $E = Z_3 Z_4 e^2 / [r_0 \cdot (A_3^{1/3} + A_4^{1/3})]$,也可以得到与实验值一致的结果。他们^[19]得到的 r_0 值为 $r_0 = 1.04 \text{ fm}$ 。在我们实验的情况下,得到 r_0 值为 $r_0 = 1.06 \text{ fm}$ 。两者是一致的。然而,这样的 r_0 值已与全熔合临界 r_0 值 r_c 大致相等,显然太低了。所以文献[19]的作者 in 文献[20]中仍然要考虑其它项的贡献计算此常数总动能值。从上面的讨论可知: 对于我们的实验结果,采用类似的方法^[18,20],自然可得到好的拟合。

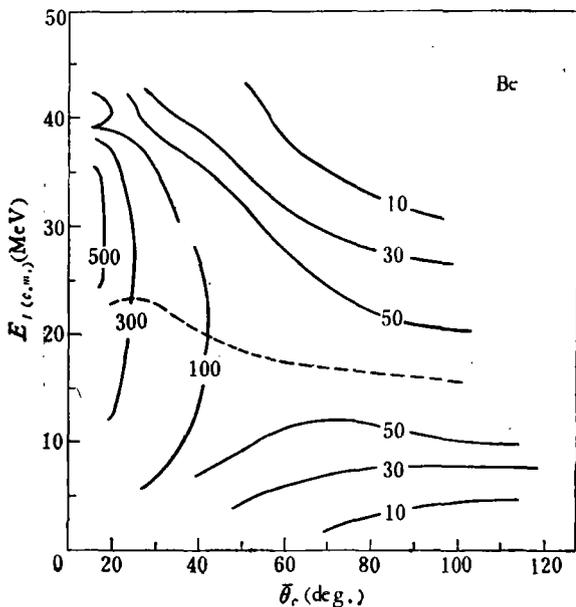


图7 铍的 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$ 等高线图 纵轴——出射道质心系总动能,横轴——质心系角度,等高线单位——微靶/球面度·兆电子伏

综上所述,对于很轻的 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 弹核-靶核系统,我们同时观测了准弹性和深部非

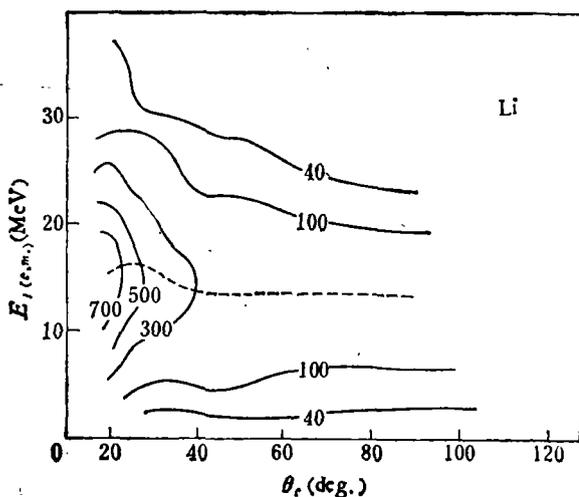


图8 锂的 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$ 等高线图 纵轴——出射道质心系总动能;横轴——质心系角度;等高线单位——微靶/球面度·兆电子伏

弹性反应现象,得到了反应产物硼、铍、锂的能谱、角分布、以及 $\frac{d^2\sigma}{dQdE}$ 在 $E-\theta$ 平面内的等高线图。其特征与较轻的或中等的碰撞系统基本上相似。但是,从准弹性反应到深部非弹性反应的过渡特征似乎更明显,值得进一步探索。此外,即使在完全阻尼的情况下,出射道动能仍明显大于终态库仑能,必须考虑离心能的贡献。

参 考 文 献

- [1] K. Kaufman and W. Wolfgang, *Phys. Rev.*, **121**(1961), 192, 206.
- [2] J. Galin et al., *Nucl. Phys.*, **A159**(1970), 1467.
- [3] A. G. Artukh et al., **A168**(1971), 32, *Nucl. Phys.*, **A176**(1971), 284.
- [4] R. Bimbot et al., *Nucl. Phys.*, **A189**(1972), 539.
- [5] M. Lefort et al., *Nucl. Phys.*, **A216**(1973), 166.
- [6] A. G. Artukh et al., *Nucl. Phys.*, **A211**(1973), 299; **A215**(1973), 91.
- [7] F. Hanappe et al., *Phys. Rev. Lett.*, **32**(1974), 738.
- [8] K. L. Wolf et al., *Phys. Rev. Lett.*, **33**(1974), 1105.
- [9] J. V. Kratz et al., *Phys. Rev. Lett.*, **33**(1974), 502.
- [10] J. Galin, *J. Phys.*, (Paris) **37**(1976), C5—83.
- [11] W. V. Schrödër and J. R. Huizenga, *Annu. Rev. Nucl. Sci.*, **27**(1977), 465.
- [12] R. Albrecht et al., *Phys. Rev. Lett.*, **34**(1975), 1400.
- [13] B. Gatty et al., *Nucl. Phys.*, **A253**(1975), 511.
- [14] J. Barrette et al., *Z. Phys.*, **A274**(1975), 121.
- [15] P. Braun-Munzinger et al., *Phys. Rev. Lett.*, **36**(1976), 849.
- [16] J. B. Natowitz et al., *Phys. Rev.*, **C13**(1976), 171.
- [17] T. M. Cormier et al., *Phys. Rev.*, **C13**(1976), 682.
- [18] R. Eggers et al., *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 324.
- [19] P. Braun-Munzinger et al., *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 1582.
- [20] T. M. Cormier et al., *Phys. Rev.*, **C16**(1977), 215.
- [21] Felix E. Obershain et al., *Phys. Rev.*, **C18**(1978), 764.
- [22] E. T. Chulick et al., IAEA-SM-174/104 (1973).
- [23] M. S. Livingston and H. A. Bethe, *Rev. Mod. Phys.*, **9**(1937), 261; F. S. Goulding and B. G. Harvey, *Annu. Rev. Nucl. Sci.*, **25**(1975), 167.
- [24] L. C. Northcliffe, *Nucl. Data Tables*, **A7**(1970), 233.
- [25] B. Gatty et al., *Z. Phys.*, **A273**(1975), 65.

QUASI-ELASTIC AND DEEP INELASTIC REACTIONS OF ^{12}C ON ^{27}Al

WU ZHONG-LI ZHU YONG-TAI XIA GUO-ZHONG LIU BU-SHENG

LI FA-WEI FAN GUO-YING

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Quasi-elastic and deep inelastic reactions of 71.5 MeV ^{12}C ions on a ^{27}Al target are measured. $\Delta E-E$ telescope is used to identify the reaction products. The energy spectra, angular distributions and contour products in the $E-\theta$ plane are obtained and discussed.