

61.8 MeV ^{12}C 在 ^{27}Al 上的深部 非弹性碰撞研究

冯恩普 王琦 诸永泰 殷旭
苗合宾 孙述明 李松林 吴钟立
范国英 谢元祥 詹文龙

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

用 $\Delta E-E$ 望远镜技术和飞行时间技术对 61.8 MeV 的 ^{12}C 离子轰击 ^{27}Al 靶的反应测量了从 ^6Li 到 ^{16}O 的诸同位素能谱。得到了质心系微分截面等高图及出射碎片角分布。从而得到轻系统深部非弹性碰撞过程的能量全弛豫值,并在耗散模型框架中,通过实验的能量全弛豫值与理论值的比较,得到了出射道的库仑能、核势能与转动能各自的贡献。通过理论拟合角分布,得出双核系统平均相互作用时间在 1×10^{-21} — 1.4×10^{-22} 秒之间,得到了出射碎片分离时的最接近距离的参数值。通过势能面的计算,说明了出射产物产额的变化趋势。并从总产物角分布分解出准弹性截面及深部非弹性截面数值。

一、引 言

重离子深部非弹性碰撞(DIC)现象是介于准弹性碰撞过程与全融合过程之间的一种反应机制。国际上,对此种反应机制的研究侧重于选取较重的炮弹和靶核系统,对轻系统的深部非弹性碰撞过程研究得较少。我们对 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 这样的轻系统的深部非弹性碰撞过程的研究,在入射能量为 71.5 MeV^[1] 和 68 MeV^[2] 的情况都有报道。在这些实验中,观察到了该反应出射道的能量弛豫现象。我们的工作是在进一步发展测量装置的基础上,同时鉴别出反应产物的能量、质量和电荷数,并选择更低的入射能量,以便观察 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 在全融合反应激发函数第一转折点附近的深部非弹性碰撞过程。其入射能量为 61.8 MeV。

二、实验技术

在实验中使用了近代物理研究所 1.5 米迴旋加速器引出的 $^{12}\text{C}^{+}$ 离子束和不锈钢带

转动密封靶室^[2,3]。离子束经过隔油镍箔和 3.74mg/cm 的铝降能片后,在靶中心厚度处的能量为 61.8 MeV 。主束流被放在零度方向上的法拉第筒接收,并通过束流积分器测量束流强度。与此同时,在靠近束流的固定的小角度位置上装有半导体探测器,对弹性散射粒子进行监测。靶厚有 714 和 $788\mu\text{g/cm}^2$ 两种。

将本研究组建立的飞行时间测量装置^[4]和 $\Delta E-E$ 望远镜联合起来测量了反应产物的电荷、质量及能量三个物理参数。离子的飞行距离为 1279mm 。采用厚度为 $860\mu\text{g/cm}^2$ 的 ST-401A 型闪烁薄膜做“零时间”探测器,离子穿过闪烁薄膜时产生的光信号被抛物面铝反射镜反射到光电倍增管的光阴极上,经倍增后的电信号为“零时间”信号。终止时间信号是由飞行管道末端的半导体探测器提供的,系统的总的时间分辨为 760 ps 。该半导体探测器与紧靠它前面的电离室组成 $\Delta E-E$ 望远镜。实验装置见图 1。电离室内充以 $(90\%\text{Ar} + 10\%\text{CH}_4)$ 的混合气体,在不同的出射角,工作气压在 $43-50$ 托之间。入射窗是厚度为 $0.8\mu\text{m}$ 的 Mylar 膜。探测器对靶所张的立体角为 $5 \times 10^{-3}\text{Sr}$,在前向角区每隔 2° 测一次,大角度处的间隔为 $5^\circ-10^\circ$ 。

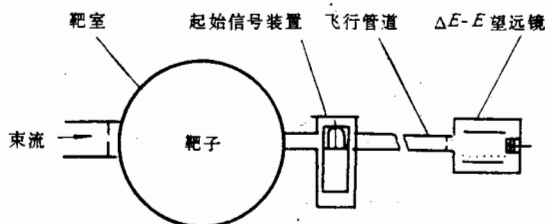


图 1 实验装置示意图。

能量、电荷及飞行时间信号送入 Plurimate-20 计算机多道系统进行多参数在线获取并按事件记录在磁带上。然后在 Wong-VS2200 计算机上进行离线处理。在处理数据时以能损与能量的 H. A. Bethe 方程^[5]为基础对 $\Delta E-E$ 二维谱进行线性化处理,得到了按电荷分布的元素谱。再在多元素谱基础上对已经线性化了的 $M-E$ 二维谱进行同位素谱的处理。其所用程序是经过改进与发展的^[6],以利于分时处理。在由实验室系统至质心系的转换过程中假定了两体反应运动学。

三、结果与讨论

1. 质心系微分截面等高图

把实验室能谱按 $d^3\sigma/d\Omega \cdot dE \cdot dA$ 形式转换到质心系中,得到了如图 2 所示的微分截面等高图。纵坐标是出射道总动能,横坐标是质心系出射角。从全部等高图中,我们见到了一种相似的结构。即“岭”从较高的总动能值随着角度的增大而移向较低的总动能值。在大角度处,总动能的“岭”趋向一个平衡值,如图 2 中虚线所示。另外可以看到,对应于单粒子转移道的 ^{11}B 和 ^{13}N 两种同位素有明显的准弹性结构。当远离炮弹时,这种结构逐渐消失。我们所选择的这个人射道,其擦边角在质心系为 21° 。从图 2 中我们看到的准弹性结构,正是处在这个角度附近的区域内。但是随着双核系统的转动,在它们之间

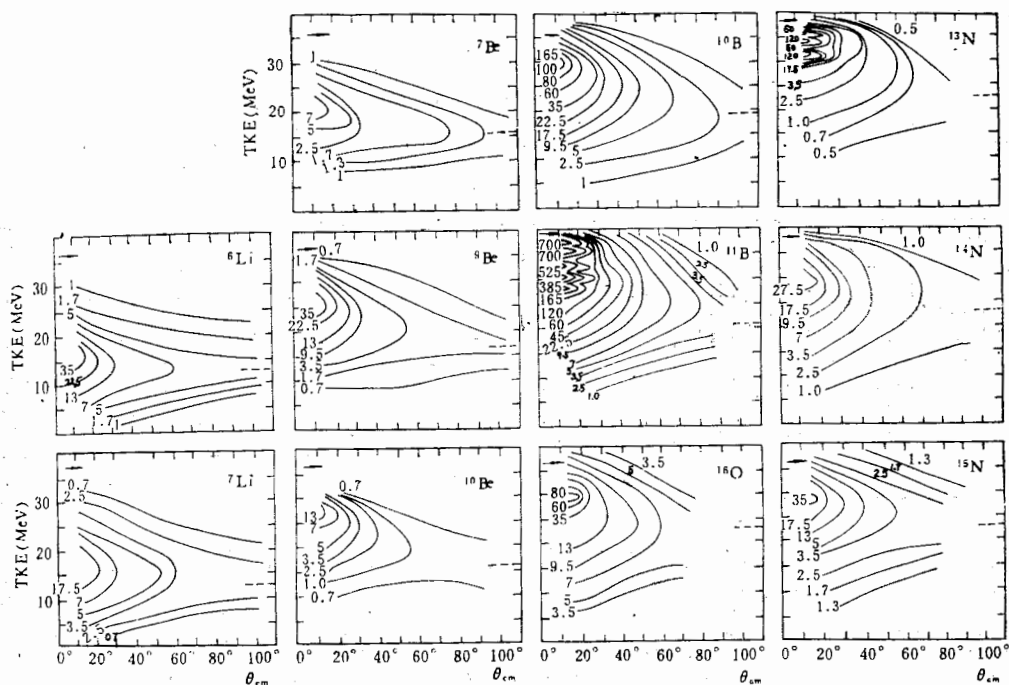


图 2 质心系微分截面等高图。

进行着能量交换(即由相对运动动能转变成内部激发能)及角动量转移(即由轨道角动量转变成内禀角动量),同时还进行着粒子交换等。当双核系统转到大角度处时,出现复合体分裂的现象,这时它们的总动能也减少到了一个平衡值,我们称它为能量全弛豫值,这些是和准弹性过程不相同的现象,通常称为深部非弹性碰撞过程。对上述的能量全弛豫值可以通过理论拟合给以进一步说明。在形成双核系统时,对于不同的出射道而言,有它们各自的库仑能、核势能与转动能。这三种主要作用能量的总效果,便表现为双核系统解体后碎片的出射总动能,即:

$$E_{\text{总}} = E_{\text{库}} + E_{\text{核}} + E_{\text{转动}}^{[1,2]} \quad (1)$$

其中

$$E_{\text{库}} = Z_3 \cdot Z_4 \cdot e^2 / D, \quad (2)$$

D 为出射碎片分离时的最接近距离。

$$E_{\text{转动}} = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2 \left[\mu_i D^2 + \frac{2}{5}(A_1 r_1^2 + A_2 r_2^2) \right]} \cdot \frac{\mu_f D^2}{\left[\mu_f D^2 + \frac{2}{5}(A_3 r_3^2 + A_4 r_4^2) \right]}, \quad (3)$$

其中

$$r_i = r_0 A_i^{1/3},$$

$$\mu_i = A_1 \cdot A_2 / (A_1 + A_2),$$

$$\mu_f = A_3 \cdot A_4 / (A_3 + A_4),$$

l 为形成双核系统的平均轨道角动量。

$$E_{\text{核}} = -50 \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \exp \left[-\frac{D - (R_1 + R_2)}{a} \right], \quad (4)$$

的束粒
物 m^2 物
时半以射
每

接
能
荷
均
处
系

散分
我
们
动
能
，
对
种
结
看
到
之
间

其中

$$R_i = 1.233A_i^{1/3} - 0.978/A_i^{1/3},$$

$$a = 0.63\text{fm}.$$

在我们的计算中, l 值采用由实验^[7]所给出的值 $24\hbar$. 计算结果列为表 1(单位: MeV).

表 1

MeV	⁶ Li	⁷ Li	⁷ Be	⁹ Be	¹⁰ Be	¹⁰ B	¹¹ B	¹³ N	¹⁴ N	¹⁵ N	¹⁶ O
$E_{库}$	10.2	10.0	12.6	12.3	12.2	14.3	14.2	16.8	16.8	16.7	17.5
$E_{核}$	-7.8	-7.9	-8.2	-8.1	-8.1	-8.3	-8.3	-8.3	-8.3	-8.3	-8.2
$E_{转}$	10.1	11.0	11.0	12.4	12.9	12.9	13.3	14.0	14.2	14.4	14.6
$E_{总}$	12.4	13.1	15.6	16.5	17.0	19.0	19.3	22.5	22.8	22.9	23.9
实验值	12.7	13.2	15.7	16.4	17.0	19.2	20.5	22.3	22.6	22.7	23.1

从表 1 中, 我们看到了对不同出射道有从 10.1MeV—14.6MeV 不同的离心转动能, 有大约—8MeV 的核势能以及从 10MeV 到 17.5 MeV 的库仑能. 它们的总和 $E_{总}$ 与实验值是接近的. 同时我们也看到了总出射动能(或全弛豫能量)比出射道库仑能没有高出很多. 大约对不同出射道分别高出 2—6MeV 不等. 可见入射能量超过库仑位垒的部份, 转变为系统的内部激发及产生双核系统的转动. 从而, 使一部份相对运动轨道角动量转变为系统内部角动量(或称自旋). 可见, 具有深部非弹性碰撞的特征.

2. 角分布

对每个角度的能谱进行积分, 我们得到了不同产物同位素的角分布, 如图 3 所示. 可以看出, 角分布以 ¹²C 为分界线, 其斜率随着转移核子数的增加而变小. ¹²C 的角分布斜率最大. 这表明准弹性过程的贡献随转移核子数的增加而减小. 对角分布按指数函数拟合^[8]:

$$d\sigma/d\Omega = A \cdot \exp(-\mu\theta) / \sin\theta. \quad (5)$$

其中, μ 是一个参量, 下面还要讨论它. 图 3 中的曲线即是按(5)计算的理论线. 从而我们可以对不同的出射道得到不同的 μ 值. 如图 4 所示. 图 4 左是对每种出射道碎片的不同总动能损失下所求得的 μ 值. 我们看到随总动能损失 TKEL 增加, μ 值下降. 对于不同的出射道碎片, 当碎片远离入射炮弹时, μ 值曲线变

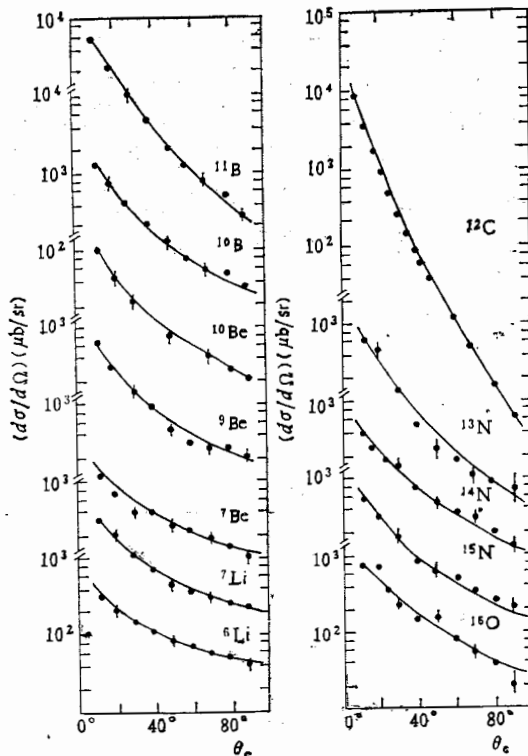


图 3 61.8MeV ¹²C + ²⁷Al 反应中出射碎片角分布.

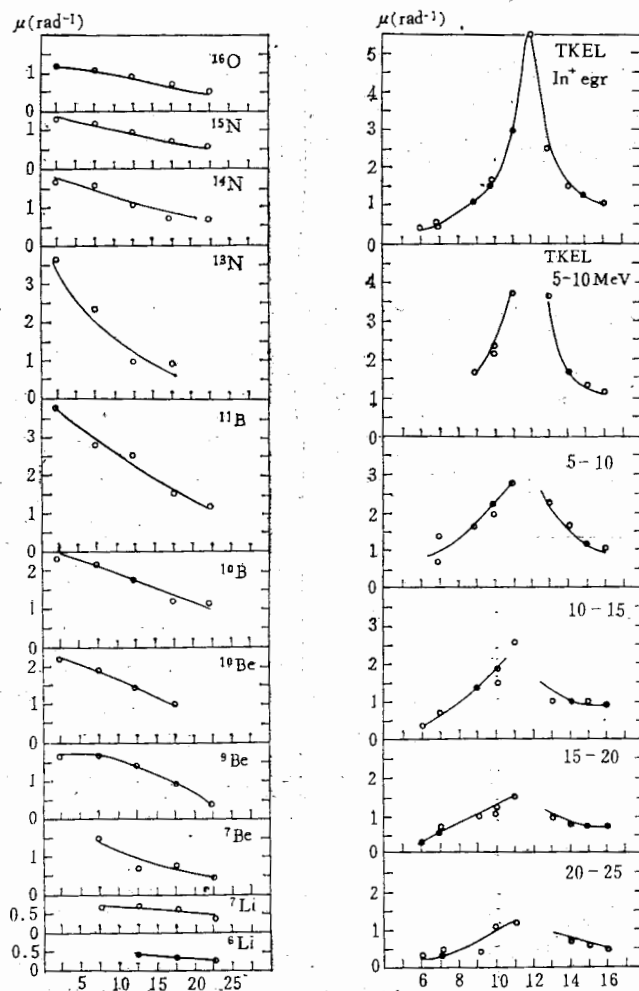


图 4 不同角分布所对应的 μ 值。

得平缓,所以 μ 值也从另一个角度反映了角分布的变化趋势。从图 4 右中可以看出,对不同的总动能损失 (TKEL) 区间, μ 值随着远离入射炮弹而变得越来越小。我们进一步讨论 μ 的意义。

3. 平均相互作用时间估算

μ 值是与双核系统在衰变到一定的出射道以前的相互作用时间有关的参数,它与平均相互作用时间 τ 的关系^[6]如下:

$$\frac{1}{\mu} = \theta_{\alpha} = \bar{\omega}\tau \quad (6)$$

其中 θ_{α} 是双核系统所转过的平均角度, $\bar{\omega}$ 是平均旋转角速度。通过实验所得到的 μ , 可

表 2 平均相互作用时间 $\tau \times 10^{-22}$ s

	⁶ Li	⁷ Li	⁷ Be	⁹ Be	¹⁰ Be	¹⁰ B	¹¹ B	¹² C	¹³ N	¹⁴ N	¹⁵ N	¹⁶ O
τ	9.8	7.8	6.5	3.6	2.6	2.4	1.4	0.7	1.6	2.6	3.0	3.6

约接大系统深

们图界可准而

(5) 它:线. 不同每种求得 KEL 道碎线变

以估算 τ_0 , 如表 2 所示。

通过表 2 我们看到对除 ^{12}C 出射道以外的各种出射道在解体之前, 双核系统的相互作用时间在 $1.4 \times 10^{-22}\text{s}$ 到 $1 \times 10^{-21}\text{s}$ 的范围内。它大于准弹性相互作用的 10^{-23}s 数量级, 又小于全熔合的 10^{-20}s 数量级。从作用时间的标度上, 我们看到, 深部非弹性过程是介于上述两个过程之间的。

4. 深部非弹性碰撞截面

对所测量到的各出射道角分布求和得到反应产物的总角分布。如图 5 所示。在低轰击能时从反应产物的能谱不能直接分出准弹和深部非弹的贡献, 可是我们发现从角分布的行为可以将它分解为准弹性碰撞与深部非弹性碰撞两种成份。其中准弹性角分布按 (5) 式可得到 $\tau_1 = 6 \times 10^{-23}\text{s}$ 的作用时间, 对深部非弹性角分布可得到 $\tau_2 = 1.3 \times 10^{-22}\text{s}$ 的作用时间, 符合于第 3 节所得到的结论。对这两种成份的角分布分别进行积分及

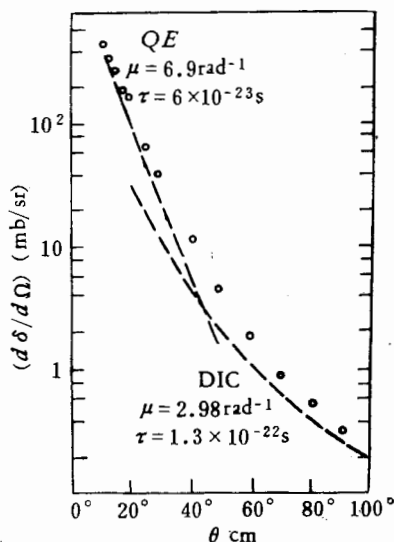


图 5 准弹性角分布和深部非弹性角分布。

外推, 我们估算深部非弹性碰撞截面为 $65 \text{ mb} \pm 10 \text{ mb}$, 准弹性截面为 $340 \text{ mb} \pm 51 \text{ mb}$ 。这两种截面和为 $405 \text{ mb} \pm 61 \text{ mb}$ 。上述两种截面应该等于反应总截面与全熔合截面之差, 实验上^[7]它在 350 mb 到 450 mb 之间。从而可见, 两者基本上是相符合的, 同时, 从该入射道的激发函数上看, 这正是处在全熔合激发函数的第一转折点附近, 所以深部非弹性碰撞过程刚开始起作用, 截面不可能占很大比份。

5. 出射道分离时的最接近距离

在理论拟合能量全弛豫值时, 方程 (2), (3) 和 (4) 中有 D 参数, 称为出射碎片(或出射道)分离时的最接近距离。对不同出射道所得到的 D 参数见表 3。可见, 表 3 中的最接近距离在 $6.78\text{--}7.24 \text{ fm}$ 范围内。对我们所选择的入射道, 其擦边距离为 $D_{gr} = 7.93$

fm , 而该入射道所对应的全熔合临界距离为 $D_{cr} = 5.29 \text{ fm}$ 。

表 3 出射碎片分离时的最接近距离 (单位: fm)

	^6Li	^7Li	^9Be	^{10}Be	^{10}B	^{11}B	^{13}N	^{14}N	^{15}N	^{16}O
D	6.78	6.87	6.87	7.00	7.06	7.06	7.10	7.17	7.20	7.24

四、结 论

1. 我们观察到了在较低入射能量下, 在轻的相互作用系统中存在深部非弹性碰撞现象。得到了对应于不同核素类弹产物的反应道中的能量弛豫过程。

2. 所得到的反应产物角分布具有指数函数形式, 通过理论拟合计算, 获得了双核系统

的平均互相作用时间, 对不同出射道可在 1×10^{-21} — 1.4×10^{-22} s 之间。符合于深部非弹性碰撞过程的时间标度。

3. 通过对能量全弛豫值的理论计算, 得到了不同出射道所对应的分离时的最接近距离参数 D 在 6.78—7.24 fm 范围。

4. 该入射道的入射能量刚好在全熔合激发函数第一转折点附近, 所以深部非弹性截面所占的比比较小。

5. 通过势能面计算, 说明了 ¹²C 产额增强的原因, 即 ¹²C 是入射炮弹又刚好处于势能曲线的“谷”底。

作者感谢加速器运行组、多道组、制靶组及二室各组同志们在完成本工作中所给予的大力协助和支持。

参 考 文 献

- [1] 吴钟立等, 高能物理与核物理, 5(1981), 364.
- [2] 谢元祥等, 高能物理与核物理, 8(1984), 748.
- [3] 诸永泰等, «核反应产物低能部份源由及降低油沾污的靶室系统的建立»《近代物理研究所年报》, 1981年, 114页.
- [4] 王琦等, 高能物理与核物理, 8(1984), 366.
- [5] H. A. Bethe, *Ann. Phys.*, 5(1930), 325.
- [6] 王琦, «多参数数据处理程序» 中国科学院近代物理研究所内部资料.
- [7] 刘国兴等, 中国科学院近代物理研究所《科学技术报告汇编》(1976) 第1页.
- [8] M. Sato et al., *Phys. Rev.*, C27(1983), 2621.

STUDY OF DEEP INELASTIC COLLISION ¹²C + ²⁷Al AT ENERGY 61.8 MeV

FENG EN-PU WANG QI ZHU YONG-TAI YIN XU MIAO HE-BIN SUN SHU-MING
LI SONG-LIN WU ZHONG-LI FAN GUO-YING XIE YUAN-XIANG ZHAN WEN-LONG
(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

By using ΔE - E telescope and the time of flight detector, the energy spectra of products between ⁶Li and ¹⁶O were measured for the reaction ¹²C + ²⁷Al, at 61.8 MeV. The contour plots of differential cross section in c.m. system and the angular distributions of emitted fragments were obtained. The calculated values of fully relaxed energies in deep inelastic collisions agree with the experimental values. The mean interaction time of di-nuclear system was estimated as from 1×10^{-21} s to 1.4×10^{-22} s.