

$68\text{MeV}^{12}\text{C} + {}^{27}\text{Al}$, $68.6\text{MeV}^{12}\text{C} + {}^{\text{nat}}\text{Ca}$

深部非弹性碰撞的研究

谢元祥 诸永泰 冯恩普 殷旭 苗合宾
才景祥 李发渭 沈文庆 孙述明 魏建军
李松林 肖钦羨 王琦 贾胜明 朵含宏

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

入射能量为 69.5MeV 的碳束轰击 ${}^{27}\text{Al}$ 和 ${}^{\text{nat}}\text{Ca}$ 靶,用 $\Delta E-E$ 计数器望远镜鉴别反应产物,测得 Li、Be、B、N、O 诸元素能谱,在两体反应假设下,得到了质心系能谱、角分布、 $E-\theta$ 平面上双微分截面 $d^2\sigma/dE d\theta$ 的等高线图. 假定在断裂时刻碎片相对运动动能可以忽略,绝热近似条件得到满足,并且碎片只有旋转对称的四极形变,从而得到决定断点处碎片运动的三个方程,求解这组方程,得到断点拉长度,并得到出射碎片的总动能. 计算得到的出射碎片的形变参数是在 0.28—0.44 之间,其全阻尼能量与实验结果基本相符. 由拟合实验角分布得到的平均寿命是 $(4-6) \times 10^{-22}$ 秒.

一、引 言

深部非弹性碰撞是七十年代初发现的一种反应机制. 它仅发生在包含相当多数目的核子的二个复杂核碰撞的时候. 这种反应的特点是二种不同的核反应机制——直接反应和复合核衰变所特有性质的结合. 因此研究这种新的反应机制,对于核反应的全过程的认识,对于介于直接反应和复合核反应的中间过程的认识,都有着十分重要的意义.

深部非弹性碰撞首先在 Dubna、在 Orsay 和 Berkeley 各自观测到的. 近年来对中重系统、重系统研究比较多,无论在实验上或是在理论上都有所深入,已有不少比较系统的工作. 但是对较轻系统的深部非弹性碰撞研究较少. 从实验技术讲也仅用 $\Delta E-E$ 望远镜方法对反应产物的动能驰豫做了些工作.

人们对在这样轻的系统所产生的反应机制是有不同看法的. 日本人对轻系统做了不少工作. 1977 年他们完成了 $90\text{MeV } {}^{100}\text{Mo}({}^{14}\text{N}, {}^{12}\text{B}) {}^{101}\text{Ru}$ 反应中产物 ${}^{12}\text{B}$ 极化的测量^[1]. 按照 Wilczynski 假设能量损失比较小的产物的极化是正的,能量损失比较大的产物(来自于负角偏转)的极化是负的. 而实验结果,与此相反. 如果认为这种反应是转移反应,则可以用 Brink 提出的理论定性的解释实验. 此后他们完成了 60,70,90 MeV 碳和氧轰击

^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{50}Ti 和 ^{59}Fe 的实验^[2] 以及 1980 年 $^{16}\text{O} + {}^{27}\text{Al}$ 的实验^[3], 系统地研究了最佳 Q 值与靶核、炮弹和轰击能量以及转移核子数目的关系. 他们用精密有限程扭曲波 Born 近似成功地拟合了 $149\text{MeV } ^{40}\text{Ca} ({}^{13}\text{C}, {}^9\text{Be}) {}^{44}\text{Ti}$ 和 $153\text{MeV } ^{40}\text{Ca} ({}^{14}\text{N}, {}^{10}\text{B}) \text{Ti}$ 的能谱和角分布.

1976 年以后法国 Billerey 等人在炮弹能量不太高的情况下 ($\leq 100\text{MeV}$) 用 $\Delta E-E$ 望远镜技术研究轻系统的深部非弹性碰撞 (DIC). 早期工作着重于分析能量的耗散和引进摩擦项计算相互作用时间. 1980 年在 ${}^{14}\text{N} + {}^{27}\text{Al}$ 实验中^[4], 他们由角分布提取了相互作用时间 t . 发现 σ_2 和 t 关系曲线不完全是直线关系, 在某一时间值后, 曲线开始变平. 因此不能简单地用 Fokker-Plank 扩散方程解释. 他们提出了二步模型: 开始是扩散过程, 紧接着是局部平衡.

1977 年美国 Natowitz 报告了 $120\text{MeV}^{20}\text{Ne}$ 与 ${}^{27}\text{Al}$ 反应的结果^[5]. 根据所测得实验全阻尼能量值, 计算出库仑能、转动能、核能各部分的大小. 并且指出在轻系统中, 裂开的复合系统的转动能对全阻尼能量的贡献是可与库仑斥力的贡献比拟的.

为了更好了解轻系统的反应机制, 我们做了下面的实验: $68\text{MeV } ^{12}\text{C} + {}^{27}\text{Al}$ 反应和 $68.6\text{MeV } ^{12}\text{C} + {}^{40}\text{Ca}$ 反应, 并对所得的结果进行了分析. 通过拟合深部非弹性产物的动能, 我们可以了解复合系统断裂时的结构, 而反应产物的角分布将提供有关复合系统的平均寿命的数量级.

二、实 验

实验是在近代物理研究所 1.5 米回旋加速器上完成的. $72.5\text{MeV}^{12}\text{C}^{4+}$ 离子束经过 Ni 箔(将靶室系统与加速器真空系统隔开. 箔厚 2μ , 碳束能量降为 69.5MeV) 以及一组光阑系统进入靶室. 靶室内径为 30 厘米, 其侧壁有一条可转动的钢带. 探测器固定在钢带上. 转动钢带, 探测器可在 -10° 到 135° 范围内活动. 为了捕集靶室内的油蒸汽, 在靶位上方安装了液氮冷阱, 并在靶位周围(除了所要探测的角度外) 安装了与冷阱连接的冷凝板. 利用钛泵系统对整个靶室系统进行抽空, 真空度达 1×10^{-5} 托.

靶子法线与束流方向的夹角为 30° . Al 靶为 69×14 条形靶. 每做完一次测量, 将靶移动一个位置, 以保证靶点是在新鲜靶面上. 采用厚度为 $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 的无亲 Al 靶, 以降低可能的表面沾污元素产额在实验结果中的比份. 经过半靶厚的碳束能量为 68MeV .

钙容易氧化, 因此靶的制作、保存和安装尽量避免暴露在空气中. 天然钙 ($\sim 97\% {}^{40}\text{Ca}$) 蒸发在无解离剂的玻璃片上, 然后蒸发系统充氩气, 迅速取出膜片放入充氩的手套箱内. 用刀片划开蒸发的膜, 它自动剥落, 然后用胶将膜粘在靶框上. 制做好的靶放进手套箱内的真空干燥器内, 并立即将它抽成真空. 实践证明靶子必须保存在干燥环境内. 在安装钙靶时, 靶室系统先抽空, 同时将靶室与真空干燥器通入氮气, 取出靶子后迅速放在靶位上, 并将系统立即抽空. 估计从制做到安装的全过程暴露在空气中的时间不超过 2 分钟. 实践也证明钙靶氧化的影响是不大的. 一共用了五块靶子, 靶厚在 $1.16-1.32\text{mg}/\text{cm}^2$ 之内. 每个靶子在不同位置做三次实验. 碳束在钙靶半靶厚处的能量为 68.6MeV .

在采取了上述几项措施后,根据碳靶的本底实验,估计碳沾污量在 $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下。这对 DIC 能谱的低能部分略有影响,在谱的低能部分未扣除碳的贡献,而是依据谱的变化趋势延伸的。

ΔE (电离室)- E (硅锂探测器) 计数器望远镜分辨了产物的原子序数 Z 。电离室为屏栅型,有效长度为 5.13 cm 。入射窗为 0.8μ 聚酯薄膜,窗前加了光阑。电离室内充混合气 (90% Ar + 10% 甲烷) 110 托,折合的质量厚度为 $1.22 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 。栅极接地,阳极和阴极电压分别为 $+500 \text{ V}$ 和 -500 V 。对于碳离子达到的能量分辨为 200 keV 。每测量完一个角度的数据,要更换气体以防止气体中毒, E 探测器为 $\phi 12 \times 3$ 硅锂探测器,工作电压 150 V 。计数器望远镜所张的立体角 $\sim 0.15 \text{ mSr}$ 。

金硅面垒半导体检验器放置在与束流成 20° 夹角处,4096 脉冲分析器记录了弹散峰。法拉第筒接收了束流,并用高阻和自动记录仪记录了束流的绝对值,并以此值来刻度弹散计数对应的束流值。截面是对弹散计数归一的,由于小角度 ($8^\circ, 10^\circ$) 弹散计数率十分高,在数据获取时产生了漏计数。利用光学模型与所测弹散角分布拟合的方法,对较小角度的测量值进行了修正。

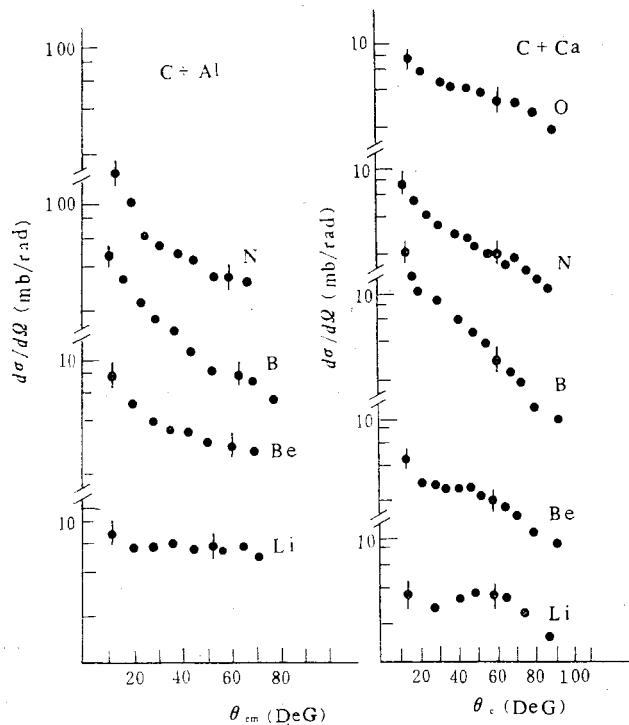


图1 质心系 $68 \text{ MeV } ^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 和 $68.6 \text{ MeV } ^{12}\text{C} + ^{44}\text{Ca}$ 反应
出射类炮弹碎片的角分布

用 Tridac-c 系统获取了 ΔE 、 E 双维谱,在实验室角度 8° — 70° 范围内所测得数据均记录在磁带中。

数据处理是在 Multi-8 和 108 乙机上进行的。在 Multi-8 机上用补偿方法:

$$\Delta E(E + K_1 \Delta E + K_0) \propto M Z^2$$

(对我们实验情况下的类弹产物 $M \approx 2Z$), 得到不同元素的能谱, 其中 K_1 和 K_0 是根据碳带拉直后所确定的常数。

在 108 乙机上将产物实验室系能谱转换到质心系。这里做了两点假定: 所测的类炮弹碎片为初始碎片; 所测碎片的质量 $\frac{M_3}{Z_3} = \frac{M_1 + M_2}{Z_1 + Z_2}$ 。根据二体运动学, 得到了质心系 $E-\theta$ 平面的双微分截面。勾画出双微分截面等高线图。对所测得数据内插, 得到了不同角度度的质心系能谱及角分布。

三、结果与讨论

图 1 给出了质心系 ${}^{12}\text{C} + {}^{27}\text{Al}$ 和 ${}^{12}\text{C} + {}^{\text{nat}}\text{Ca}$ 反应出射类弹碎片的角分布, 从图中可以看到角分布的形状是随反应产物的原子序数变化的。当转移核子数目比较少时, 碎片的角分布在前角度矗立, 这部分主要是准弹性反应的贡献; 当转移核子数比较多时, 准弹性反应贡献减小, 其角分布变得比较平坦。

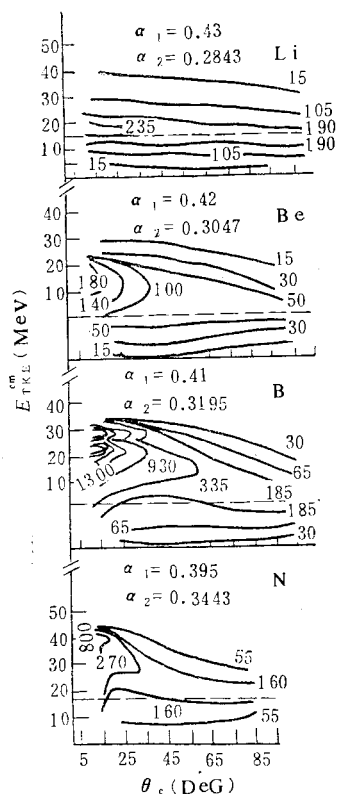


图 2 质心系 $68\text{MeV } {}^{12}\text{C} + {}^{27}\text{Al}$ 反应出射 Li、Be、B、N 碎片的双微分截面 ($\frac{d^2\sigma}{dE d\theta}$ $\mu\text{b}/\text{MeV}\cdot\text{rad}$) 等高图。虚线为理论计算全阻尼能量。 α_1, α_2 为四极形变参数值

图 2 给出了质心系 $68\text{MeV } {}^{12}\text{C} + {}^{27}\text{Al}$ 反应出射 Li、Be、B、N 等碎片的双微分截面等高图。图 3 给出了质心系 $68.6\text{MeV } {}^{12}\text{C} + {}^{\text{nat}}\text{Ca}$ 反应出射 Li、Be、B、N、O 碎片的双微分截面等高

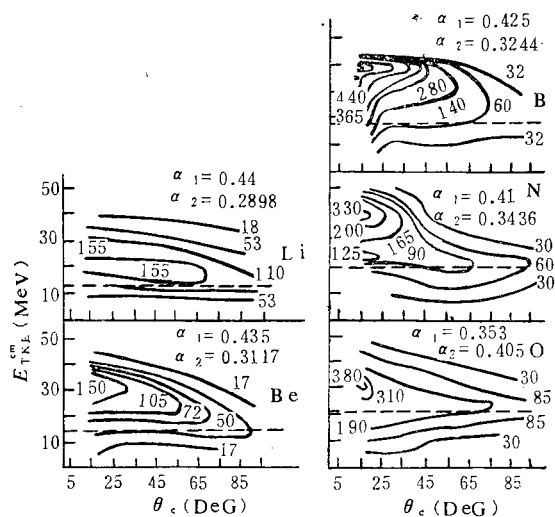


图 3 质心系 $68.6\text{MeV } {}^{12}\text{C} + {}^{\text{nat}}\text{Ca}$ 反应出射 Li、Be、B、N、O 碎片的双微分截面 ($\frac{d^2\sigma}{dE \cdot d\theta}$ $\mu\text{b}/\text{MeV}\cdot\text{rad}$) 等高图。虚线为理论计算全阻尼能量。 α_1, α_2 为四极形变参数值

图。从所给的图中可以看出对于交换核子数目较少的 B 和 N 元素来说, 在擦边角附近明显地看到准弹性产物的贡献。另外还看到一条从小角度延伸到大角度的岭, 到较大角度

逐渐变平,这是深部非弹性产物的特点.而对于交换核子数目较多的元素来说,准弹性部分不明显,深部非弹性产物的岭从较小角度就逐渐变平.总之从角分布形状,或是从双微分截面等高图来看,它们都极类似于中重系统 DIC 所得到的实验结果.

1) 完全阻尼能量的理论计算

深部非弹性碎片的弛豫动能反映了复合系统的断裂结构.通常,对于重系统,只要考虑出射道库仑能就能很好地符合所测实验值.而对轻系统则还要考虑其他贡献,诸如转动能、核能等.有关这方面的报道还是很少的.文献[6]提出一种计算方法,对中重系统和重系统进行了计算,得到较好的符合.我们将这种方法应用到轻系统也得到好的符合.从而对断裂时碎片所处的状态有所了解.

此方法的基本思想如下:假定碎片只发生四极形变,对称轴就在两核心的连结线上,在断裂时刻碎片的相对运动动能可以忽略,断裂前碎片已有足够的时间来调整各自的形状,使整个系统相互作用总势能处于最低状态,即可把相对径向自由度(r)与碎片形变自由度(α_1, α_2)分开,并作为绝热近似处理.在数学上则表达为满足极值的必要条件:

$$\left. \frac{\partial U(r, \alpha_i)}{\partial \alpha_i} \right|_{r=r_1(1+\alpha_1)+r_2(1+\alpha_2)} \quad i = 1, 2$$

其中 U 为系统的总势能, r 是两碎片质心的相对距离, α_1, α_2 分别表示碎片的四极形变参数.根据液滴模型,系统的总势能可以表示为:

$$U = U_c + U_N + U_d + U_{cc}$$

这里库仑势 U_c 和形变能 U_d 及核势 U_N 分别取自文献[7]和[8].对离心势这一项,椭球转动惯量 J_i 可写成^[10]

$$J_i = \frac{1}{5} m R_i^2 [(1 + \alpha_i)^2 + (1 + \alpha_i)^{-1} - 2(1 + \alpha_i)^{-5/2}]$$

在计算总势能时,取 $R_i = r_0 A_i^{1/3}$, 半径参数 $r_0 = 1.2 \text{ fm}$, 解上述方程可得到断点碎片的拉长形变 $\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}$.由此可计算出出射碎片的总动能 \bar{E}_K

$$\bar{E}_K = U_c(\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}) + U_N(\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}) + E_{cc}(\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, l_f)$$

其中 E_{cc} 为出射道的转动能, l_f 为出射道的角动量,可根据粘着模型计算出来,而入射道的角动量是取擦边角动量和融合角动量的平均值.对于 C + Al 和 C + Ca 反应由弹性散射角分布所确定,分别为 $30, 35\hbar$.由本所实验确定 C + Al 反应的融合角动量 $l_{cr} = 26\hbar$ ^[9],与用临界势^[10]计算值相符合.并由此计算出 C + Ca 反应的 $l_{cr} = 29\hbar$.对深部非弹性碰撞的入射道角动量取了二者平均,分别为 $28, 32\hbar$.

对 68 MeV C + Al 反应和 68.6 MeV C + Ca 反应计算了出射类炮弹碎片的全阻尼能量,结果列在表 1 (在图 2, 3 中以虚线标出).

表 1 最后一栏列出实验全阻尼能量或其上限.计算所得四极形变参数表示在图 2 和图 3 中.在 0.28—0.44 之间,从计算结果看转动能的贡献是大的,计算的全阻尼能量与实验值基本上是相符的.

2) 反应的时间标度

我们对复合系统建立完全阻尼所需的时间是感兴趣的.而这个信息可以由深部非弹性散射的角分布提供.

表 1 理论计算的 U_C 、 U_N 、 E_{ce} 值和计算得到的全阻尼能量与实验数据的比较

反 应	碎片	$r(\text{fm})$	$U_C(\text{MeV})$	$U_N(\text{MeV})$	$E_{ce}(\text{MeV})$	$\bar{E}_K^{\text{th}}(\text{MeV})$	$E_K^{\text{exp}}(\text{MeV})$
C + Al	Li	8.06	9.1	-11.4	16.8	14.5	≤ 12.5
	Be	8.33	11.0	-12.0	16.6	15.6	≤ 15.5
	B	8.51	12.6	-12.5	17.0	17.1	≤ 17
	N	8.75	14.7	-13.1	15.2	16.8	≤ 17.5
C + Ca	Li	8.69	12.1	-11.6	12.3	12.8	≤ 13
	Be	9.00	14.9	-12.3	12.1	14.7	≤ 14
	B	9.20	17.4	-13.9	13.5	18.0	≤ 19
	N	9.50	21.4	-13.7	11.7	19.4	≤ 20
	O	9.60	22.9	-13.9	11.7	20.7	≤ 22

假定刚体粘合的复合系统绕着一个垂直于散射平面的轴转动, 系统的角频率可表示成:

$$\omega = \frac{L\hbar}{J}$$

其中 L 是入射道的角动量, J 是这个系统的转动惯量. Barrette et al.^[11] 推导出把角分布与转动频率 ω 和平均寿命 τ 相联系的表达式:

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \cos 5\tau \left[\exp\left(-\frac{\theta}{\omega\tau}\right) + \exp\left(-\frac{2\pi - \theta}{\omega\tau}\right) \right]$$

式中第一项表示左旋系统对角分布的贡献, 第二项是右旋系统的贡献. 将上节所得到角动量和转动惯量值代入, 可计算出理论的角分布, 与实验角分布拟合, 即可得到平均寿命 τ . 对两种反应的几个反应道均进行了计算. 准弹性部分的 τ 是在 $(1-2) \times 10^{-22}$ 秒, 深部非弹性反应的 τ 在 $(4-6) \times 10^{-22}$ 秒.

四、结 论

我们测量了 68 MeV C + Al, 68.6 MeV C + Ca 反应类炮弹产物, 给出了质心系的角分布和双微分截面等高图. 从角分布和双微分截面等高图形状看是极类似于中重系统的 DIC 结果. 说明在这样低的人射能量, 轻系统是存在 DIC 过程的. 对完全阻尼能量进行理论的计算, 计算值和实验值基本相符. 由拟合实验角分布得出深部非弹性碰撞的平均寿命是在 $(4-6) \times 10^{-22}$ 秒数量级.

本工作是在杨澄中先生指导下完成的, 作者对此表示感谢. 作者感谢加速器运行组和计算机组的大力协作, 同时对王正大同志在拟合数据中给与的帮助表示感谢.

参 考 文 献

- [1] K. Sujimoto et al., *Phys. Rev. Lett.*, **39**(1977), 323.
- [2] T. Mikumo et al., *Phys. Rev.*, **C14**(1976), 1458.
- [3] T. Mikumo et al., *Phys. Rev.*, **C21**(1980), 620.

- [4] R. Billerey et al., *Z. Physik*, **297**(1980), 317.
 [5] B. Natowitz et al., *Nucl. Phys.*, **A277**(1977), 477.
 [6] 王正大等, 高能物理与核物理, **4**(1980), 788.
 [7] 郑蔓荪等, 中国科学院近代物理研究所年报, 1981, p. 10.
 [8] 王正大等, 高能物理与核物理, **5**(1981), 765.
 [9] 刘国兴, 科学技术汇编第2集 p.1(近物所内部资料).
 [10] C. Ngô, Thesis, Orsay, Universite Paris-sud, (1975).
 [11] J. Barrette et al., *Nucl. Phys.*, **A279**(1977), 125.

INVESTIGATION OF DIC FOR REACTION $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ AT
 ENERGY 68MeV AND FOR REACTION
 $^{12}\text{C} + ^{\text{nat}}\text{Ca}$ AT ENERGY 68.6MeV

XIE YUAN-XIANG ZHU YONG-TAI FEN EN-PU YIN XU
 MIAO HE-BING CAI JING-XIANG LI FA-WEI SHEN WEN-QING
 SUN SHU-MING WEI JIAN-JUN LI SONG-LING XIAO QING-XIAN
 WANG QI JIA SHENG-MING DUO HAN-HONG
 (Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

^{27}Al and $^{\text{nat}}\text{Ca}$ target were bombarded by the Carbon beam at incident energy 69.5 MeV. The reaction products were identified by $\Delta E-E$ telescope and the spectra of Li , Be , B , N , O elements were obtained.

The values of deformation parameter of emitted fragmente are between 0.28—0.44. Calculated energy of full damped fragments are in agreement with the experimental data. The average life-time of the system is about $(4-6) \times 10^{-22}$ s.