

# 非完全深部非弹的简单模型分析

祝翔 沈文庆 胡晓庆 诸永泰 王柄

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

## 摘要

根据  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  实验中的一些特殊现象, 提出了一个弹核先碎裂, 然后碎裂的余核与靶核发生深部非弹的非完全深部非弹模型. 并将计算的结果与实验的能谱、角分布及维辛斯基图进行了对比和分析.

## 一、引言

近年来一些轻系统重离子反应实验<sup>[1,2]</sup>表明, 在中重和重系统的重离子反应中所表现出来的各种耗散现象, 仍是轻系统重离子反应的基本特征. 在耗散反应中, 保持了对入射道的部分记忆, 大量的相对运动动能被逐渐耗散为内部激发能. 在轻系统反应中由于核子少, 不利于从非平衡态的统计力学的角度研究深部非弹, 但另一方面对于轻系统发射粒子和壳效应会带来较大影响, 所以在轻系统中对它们进行研究可以得出比较明确的结果.

轻系统非完全深部非弹 (INDIC) 最明显的实验根据来自  $82.7\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  反应对类弹碎片和发射  $\alpha$  粒子的符合测量<sup>[2]</sup>. 在伽利略协变截面  $d^3\sigma/CPd\Omega_H d\Omega_\alpha dE_\alpha$  当中清楚地显示出三个峰. 较大角度的两个峰可由类弹和类靶产生的通常的相继发射机制来解释; 第三个峰比较陡, 相应的反应截面最大, 出现在前角区, 极大处速度相应于炮弹速度 (见图1). 这强烈地提示向前角  $\alpha$  粒子来自  $^{16}\text{O}$  碎裂的贡献.

非完全深部非弹反应模式可描述如下: 轻核  $a$  作为入射弹核时, 在靶核的力场作用下, 反应的初期会有一些的几率碎裂为一个  $\alpha$  粒子和剩余碎片  $x(a = x + \alpha)$ . 对于一些  $\alpha$  结团结构影响较大的核碎裂的几率会比较大, 如  $^{16}\text{O}$  碎裂为  $^{12}\text{C} + \alpha$ . 碎裂后的重碎

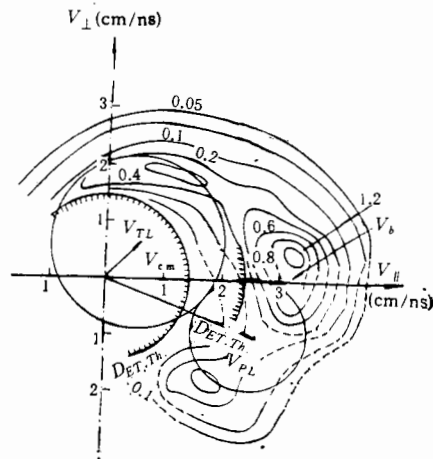


图1  $82.7\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  产生的 C- $\alpha$  伽利略协变截面  $d^3\sigma/CPd\Omega_H d\Omega_\alpha dE_\alpha$  在速度平面上的等高图

片会继续同靶核发生各种相互作用,因而,当碰撞参数由小变大时可能出现完全熔合、非完全熔合、非完全深部非弹性碰撞和准弹性碎裂等重离子反应机制.对  $80.6\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  反应<sup>[2]</sup>,从相对运动角动量的观点看,这种分类也是合理的.这个系统中擦边角动量和临界角动量分别为  $l_{gr}(^{16}\text{O}) = 36.9\hbar$ ,  $l_{cr}(^{16}\text{O}) = 31.6\hbar$ . 入射角动量小于临界角动量的分波,  $l_a < l_{cr}(^{16}\text{O})$  发生完全熔合反应,而对  $l_a > l_{cr}(^{16}\text{O})$  的分波,有一定的几率发生碎裂.如考虑重碎片以弹核速度沿束流方向运动,  $E_x = E_a \frac{m_x}{m_a} = 60\text{MeV}$ , 相应各分波的角动量为  $l_x = l_a m_x / m_a$ , 而对  $60\text{MeV}$  的  $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$  反应,  $l_{gr}(^{12}\text{C}) = 31\hbar$ ,  $l_{cr}(^{12}\text{C}) = 26\hbar$ , 这样对所有  $l_x > l_{gr}(^{12}\text{C})$  和  $l_x < l_{cr}(^{12}\text{C})$  将相应地发生弹性碎裂和非完全熔合(ICF), 而  $l_x$  处于两者之间的分波将发生 INDIC. 这说明在总的碎裂截面中,弹性碎裂和 ICF 并不占有其全部,在一定的人射角动量区域,直接碎裂后相继发生耗散碰撞是可能的.基于这种可能性,本文将中高能能区的重离子碎裂反应模型和 DIC 反应的扩散模型相耦合,通过对  $80.6\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  反应的分析,讨论了该能区非完全深部非弹(INDIC)反应的可能性.

## 二、计算方法

我们在处理非完全深部非弹时,对反应初期的弹核碎裂采用 Mcvoy<sup>[3,4]</sup> 等人对处理中高能反应中碎裂谱时提出的区域平面波玻恩近似(LPWBA). 这种方法避免了 DWBA 繁杂的计算,并且具有明确的物理意义.在 LPWBA 中,碎裂的作用矩阵元为:

$$|T^{PF}|^2 = |\tilde{\phi}_{ac}(\vec{K}_c - \vec{K}'_c)|^2, \quad (1)$$

其中  $\tilde{\phi}_{ac}$  是  $^{12}\text{C}$  和  $\alpha$  在弹核  $^{16}\text{O}$  中相互作用波函数的傅里叶变换,  $\vec{K}_c$ 、 $\vec{K}'_c$  是碎裂前后随  $^{16}\text{O}$  束运动的  $^{12}\text{C}$  在库仑位垒附近的区域动量. 上式反映了  $^{12}\text{C}$  在  $^{16}\text{O}$  中费米运动的动量分布. 实验室双微分截面为:

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = NE^{1/2} \exp \left[ -\frac{2m_F C E - 2(EE_0)^{1/2} \cos \varphi + E_0}{2\sigma^2} \right], \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \frac{m_F(m_P - m_F)}{m_P - 1}, \quad (3)$$

$N$  是归一化系数,  $E_0$  是碎片在入射粒子中随束流运动的动能,  $E$  是碎片的出射动能.  $\sigma$ 、 $\sigma_0$  分别是动量分布宽度和约化动量分布宽度,  $m_P$  和  $m_F$  分别是弹核和碎片质量数,  $\varphi$  是碎裂前后碎片动量的夹角.

非完全深部非弹中对 DIC 过程用常系数福克-普朗克方程描述<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = -V_x \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial x^2}, \quad (4)$$

方程解为:

$$P(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x t}} \exp \left( -\frac{(x - V_x t)^2}{2D_x t} \right), \quad (5)$$

$P(x, t)$  代表了在  $t$  时刻观察到宏观参量值为  $x$  的几率. 上述理论中认为中间复合系统

的存活几率,在任何时刻都为 1,这并不符合实际情况.文献[6]提出一个假设,认为中间系统以类似于放射性衰变规律指数衰变,即复合系统的存活几率为  $e^{-\lambda t}$ . 三重微分截面  $\frac{d^3\sigma}{dZdEd\theta}$  表示为:

$$\frac{d^3\sigma}{dZdEd\theta} = N \sum_{n=1}^K [P(Z, t_n)P(E, t_n)e^{-\lambda t_n} + P'(Z, t'_n)P'(E, t'_n)e^{-\lambda t'_n}], \quad (6)$$

$N$  是归一化常数,  $\lambda$  是衰减常数,在计算中是一个可调参数,  $t_n, t'_n$  分别是类弹和类靶碎片通过不同的转动方式达到观察角所需的时间.

$$t_1 = \frac{\theta_{gr} - \theta}{\omega}, t_2 = \frac{\theta_{gr} + \theta}{\omega}, t_3 = \frac{\theta_{gr} - \theta + 2\pi}{\omega} \dots, \\ t'_n = t_n + \pi/\omega \quad (7)$$

其中  $\theta_{gr}$  为擦边角,  $\omega$  为双核系统的平均角速度. 实际上主要贡献来自于  $t_1$  和  $t_2$  的分量.  $D_Z, D_E, V_Z, V_E$  相应为电荷和动能的扩散系数和漂移系数. 它们可由 Nörenberg<sup>[5]</sup> 的扩散理论计算得到, 电荷的漂移和扩散从入射粒子和靶核的电荷数  $Z_P$  和  $Z_T$  开始,  $E$  相应于出射碎片动能.

在 INDIC 反应机制中,入射弹核轰击在靶核上,以一定的几率碎裂,碎裂产物能量和角度的分布由碎裂模式决定,这些碎裂产物中的一部分会继续和靶核发生 DIC 反应,成为 INDIC 反应. 如果用  $W_1(E_m, \theta_m)$  表示在入射能量  $E$  下碎裂碎片的能量和角度相应为  $E_m, \theta_m$  的几率,  $W_2(E_m, \theta_m)$  为该碎片继续发生深部非弹的几率, 则整个过程中发生 INDIC 的几率为:

$$W = \int_m W_1(E_m, \theta_m)W_2(E_m, \theta_m)dE_m d\theta_m. \quad (8)$$

显然,  $W_1, W_2$  与碎裂和 DIC 的截面有关,仔细地计算这个折合积分是比较困难的. 从实验上对碎裂过程的分析可以看出,弹核碎片主要集中在小角范围内,在理论计算中我们假设碎裂后碎片仍以原弹核入射方向和靶核发生 DIC 反应, 两步过程的耦合只是能量上的耦合,用数值积分求出总 INDIC 几率. 在上述框架下,  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  反应中反应产物的各种分布可分解为三部分: ①  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  发生深部非弹的贡献  $\sigma_1$ ; ②  $^{16}\text{O}$  碎裂为  $^{12}\text{C}$  的贡献  $\sigma_2$ ; ③  $^{16}\text{O}$  碎裂为  $^{12}\text{C}$  后  $^{12}\text{C}$  和  $^{27}\text{Al}$  发生 INDIC 的贡献  $\sigma_3$ . 它们所占的部份反映了各种反应机制所占的部份,在计算中为可调参数.

### 三、计算结果和分析

碎裂过程的动量分布宽度值与碎片质量成抛物线关系式(见(3)式),在理论上由 A. S. GOIDHABER<sup>[7]</sup> 给出了一种可能的解释. 在中高能区,约化动量分布宽度  $\sigma_0$  的饱和值为  $90\text{MeV}/c$ ,理论和实验符合较好.但许多实验表明,轰击能从  $5\text{MeV}/u$  向  $100\text{MeV}/u$  过渡时,  $\sigma_0$  是从  $20\text{MeV}/c$  逐渐达到饱和值的,反映了核的一体作用向二体作用的转变,这仍然是一个很值得研究的问题. 由  $80.6\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  实验拟合得到的  $\sigma_0$  为  $23\text{MeV}/c$ , 与这个趋势是一致的. 图 2 是单举  $^{12}\text{C}$  质心系能谱的计算和实验结果的

比较。能谱分解为三部分： $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  的 DIC 贡献，碎裂产物  $^{12}\text{C}$  的贡献和碎裂后

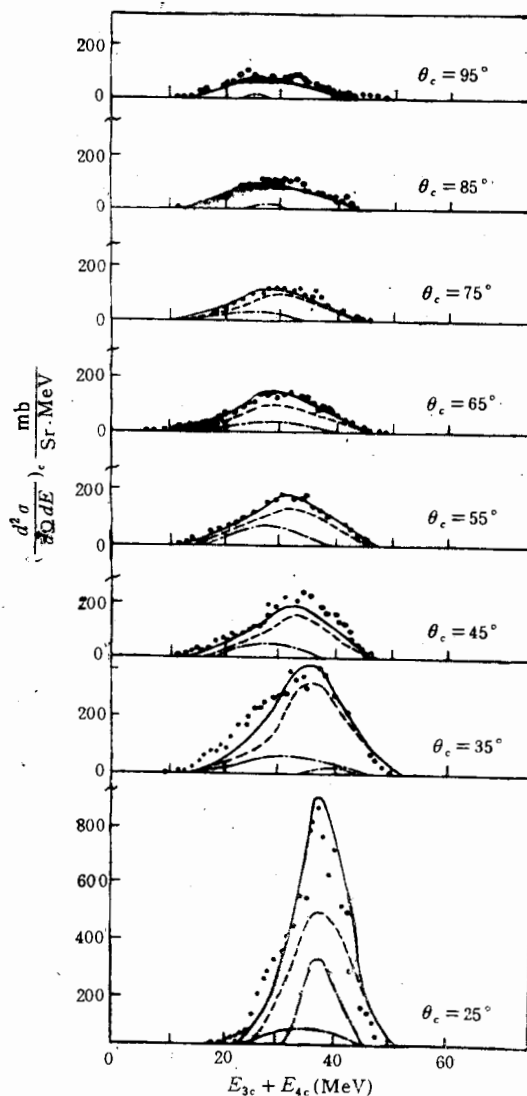


图2 80.6 MeV 单举  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  出射  $^{12}\text{C}$  质心系能谱  
计算和实验比较

- 计算总截面
- - - 碎裂贡献
- $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  贡献
- · - ·  $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$  贡献

$^{16}\text{O}$  和  $^{14}\text{N}$  的正角和负角分量, 在计算中也得以正确的反应。

从上述计算结果看, 尽管模型是半唯象和简单的, 但仍能较好地符合实际, 给出反应的一些特征, 理论解释的物理图象也是比较直观和明确的。

$^{12}\text{C}$  和  $^{27}\text{Al}$  发生 DIC 的贡献。在小角区碎裂的成份有很陡的角分布, 随角度增大很快衰减为零。角度增大时, 实验能谱峰位变低, 半宽逐渐变大, 反映了深部非弹中能量的漂移和扩散。计算的两种耗散组份, 在数值和形状上均符合了实验结果。应指出的是, 所有角度处的能谱的拟合是在同样的归一化系数下得到的, 这也说明计算同时拟合了  $^{12}\text{C}$  的能谱和角分布。

图3是产物 Z 分布的比较。实验结果表明 Z 分布并不是以  $^{16}\text{O}$  对称的, 而是在  $Z < 8$  时有较大的产额。在  $30^\circ \leq \theta_{\text{CM}} < 90^\circ$  和全能谱积分得出的 Z 分布中,  $^{12}\text{C}$  产额特别高; 随着出射角的增大耗散加深, 碳产额和氧产额之比也增大。这是由于  $Z < 8$  处具有更小的势能面值, 也是由于小角度激发的  $^{16}\text{O}$  碎裂成  $\alpha$  和  $^{12}\text{C}$ , 使碳产额得以加强。当然在大角度由于较大的能量耗散, 深部非弹产生的氧有较大的激发能, 从而更可能相继发射  $\alpha$  粒子。计算的结果较好地反映了碳产额特别的加强和随着出射角的增大,  $^{12}\text{C}$  和  $^{16}\text{O}$  产额相对变大的趋势。从 Z 分布的符合, 可看出 INDIC 的解释是比较合理的。实验产物角分布 (图4) 随角度变大呈现较陡的分布, 从中提取的复合系统寿命  $t_{1/2}$  约为  $10^{-22}$  秒, 与重系统相比要小得多。图5是实验的维辛斯基图和计算的维辛斯基图, 计算的 Be—F 元素的维氏图清楚地表明了随弛豫能量增加, 产物从正角到负角的演化。实验中显示的

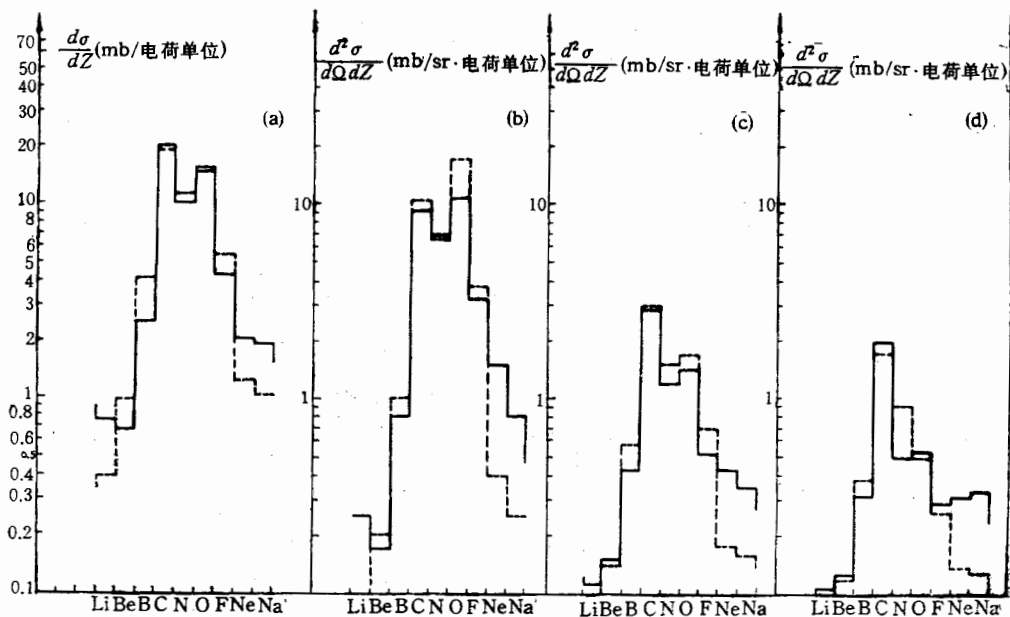


图 3

(a)  $30^\circ \leq \theta_{CM} < 90^\circ$  积分, 对全能谱积分的 Z 分布 (b)  $\theta_{CM} = 30^\circ$ , 全能谱积分的 Z 分布  
 (c)  $\theta_{CM} = 60^\circ$ , 全能谱积分的 Z 分布 (d)  $\theta_{CM} = 90^\circ$ , 全能谱积分的 Z 分布

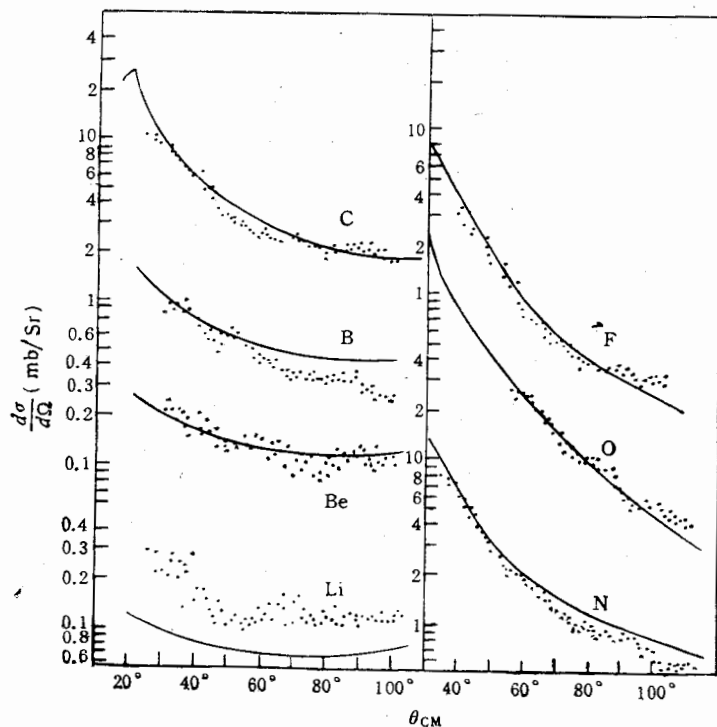


图 4  $80.6\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  不同出射元素对全能谱积分的角分布的计算和实验比较

小角度的高能出射产物中, 碎裂和转移是互相竞争的。一般认为能量高时碎裂占优势, 低能时转移占优势。但结构效应很重要, 许多实验表明即使在较低轰击能下, 具有  $\alpha$

应

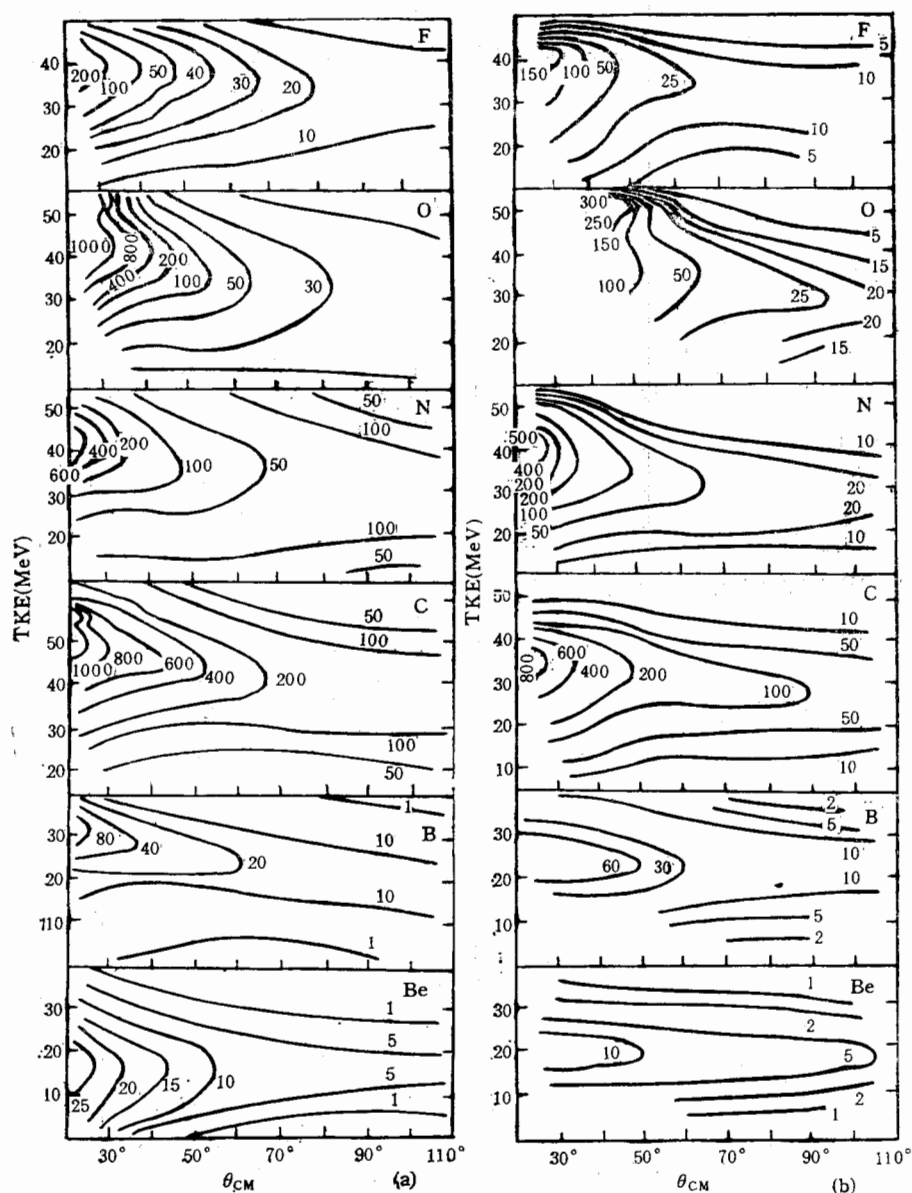


图 5  $80.6\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  中出射类弹 Be-F 的  $E-\theta$  平面上的  $d^2\sigma/d\Omega dE$  等高图  
(a) 计算; (b) 实验

结团结构的弹核易发生碎裂,  $82.6\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}^{[2]}$  类弹碎片和  $\alpha$  的符合测量也说明了这一点. 为了进一步研究这种机制, 文献[8]进一步用  $10.8\text{MeV/u } ^{20}\text{Ne} + ^{27}\text{Al}$  反应研究了 INDIC 反应. 从  $Q_{\text{eff}}$  值和轰击能看  $^{20}\text{Ne}$  弹核比  $^{16}\text{O}$  更容易碎裂, 实验的主要结果反映在符合数据中. 但用上述模型来分析符合数据是困难的, 主要问题在于该模型两步过程的耦合中没有角动量的耦合, 扩散模型计算时, 只是在给定入射能量和电荷下进行扩散和漂移, 所涉及的角动量只是发生深部非弹的平均角动量. 对角动量耦合的仔细计算应回到 DWBA, 并对折合积分给出比较严格的算法, 这就需要用更恰当的理论模型来描述

DIC.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Zhu Yongtai, *J. Phys. Soc.*, **54**(1985), Suppl. II. 335—350.
- [ 2 ] Shen Wenging et al., *Nucl. Phys.*, **A472**(1987), 358.
- [ 3 ] K. W. Mcvov, M. Caroline Nemes, *Z. Physik*, **A295**(1980), 177—185.
- [ 4 ] F. Cuzman Martinez, R. Reif, *Nuclear Physics*, **A436**(1985), 294—310.
- [ 5 ] A. Gobbi, G. Nörenberg, *Heavy Ion Collision* vol.2.
- [ 6 ] A. Sgarwal, *Z. Physik*, **A297**(1980), 41.
- [ 7 ] Goldhaber, *Phys. Lett.*, **53B**(1974), 306.
- [ 8 ] Zhu Yongtai, *Nucl. Phys.*, **A488**(1988), 409—422.

## A SIMPLE MODEL ANALYSIS OF THE INCOMPLETE DIC REACTION

ZHU XIANG SHEN WENQING HU XIAOQING ZHU YONGTAI WANG BING  
(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou*)

## ABSTRACT

From some special phenomena observed in the reaction of  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ , we proposed a simple model of INDIC, in which a direct projectile breakup in the initial stage ( $^{16}\text{O} \rightarrow ^{12}\text{C} + \alpha$ ) is succeeded by a dissipative interaction between the heavy projectile fragment (HPF)  $^{12}\text{C}$  and the target nucleus  $^{27}\text{Al}$  in the final state. An analysis and comparison with the experimental data for  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  reaction was performed.