

80.9MeV $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 能量耗散和核子交换的关系

殷旭 沈文庆 诸永泰 冯恩普
王琦 谢元祥 詹文龙 李松林
(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

摘 要

用带 $\Delta E-E$ 望远镜系统的飞行时间系统测量了 80.9MeV $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应出射产物的三重微分截面 $d^3\sigma/dA \cdot dZ \cdot dE$. 对该反应中所出现的能量耗散和核子交换的关系进行了讨论.

一、引 言

在重离子核反应中,随着弹核和靶核相互重叠的增加,反应时间的加长,入射道的各种自由度将分别先后弛豫,最后达到平衡.核反应过程中处于不稳定状态的双核系统,要么逐步熔合,达到各自由度的完全弛豫,并通过发射轻粒子退激到基态,这种反应称完全熔合反应;要么进行若干核子的交换,耗散大部分或全部动能,最后重新断裂为不对称的两块碎片并保持部分对入射道的记忆.这就是深部非弹性反应过程.

在轻系统中,对某些能量下 ^{16}O 轰击 ^{27}Al 的反应的研究,如在入射能量 90MeV、100MeV 时^[1],在 88MeV 时^[2],在 88MeV、70MeV、60MeV 时^[3],表明在这一轰击能区,大约从 70MeV 开始 ^{16}O 轰击 ^{27}Al 出现了深部非弹性过程.其截面值随入射能量增加而增加.中国科学院近代物理研究所诸永泰、沈文庆等人研究了 80.6MeV $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应,进行了反应产物的电荷鉴别,分析了弛豫过程与势能面的影响等.但实验无法对产物质量、电荷同时进行鉴别^[4,5].

我们采用了带 $\Delta E-E$ 望远镜系统的重离子飞行时间谱仪——TOF 联合装置系统,对反应产物进行质量和电荷的同时鉴别.这种联合的重离子飞行时间谱仪是我们设计制作的.利用这种谱仪对上述反应的产物同时进行了 M, Z 的鉴别,得到了作为产物能量、质量、电荷数为函数的三重微分截面 $d^3\sigma/dA \cdot dZ \cdot dE$. 这样可对该反应中的耗散过程与核子交换的关系、质子和中子交换的关联程度、在不同激发能区质子和中子交换优势程度以及势能面对核子交换的影响等问题进行探讨.

二、实验装置和方法

选用入射能量为 87.5 MeV ^{16}O 束作弹核, 厚度为 $0.76\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 ^{27}Al 作无衬靶. 为了降低轻元素产生本底反应的沾污, 选用本所制造的无油靶室系统进行核反应^[6], 并用电子溅射法对靶进行了清洗. 入射束经 $1.94\text{mg}/\text{cm}^2$ 的隔油 Ni 箔, 再经半靶后的最终能量为 80.9 MeV. 质心系能量和库仑位垒比值 (E_{cm}/B) 约为 3.1. 用 ΔE - E 望远镜系统和 TOF 飞行系统组成联合探测器对反应产物进行三维测量. 三参数事件谱为 $\Delta E, E, T$. 由 $\Delta E, E$ 给出产物的 Z 值, 由 E, T 给出产物的 M (或 A) 值. 联合探测器系统同时给出某角度下产物的 $Z, M(A)$ 和出射能量 E 的值.

ΔE 探测器内充有 $\text{Ar} + \text{CH}_4$ (90% + 10%) 混合气体. 厚度为 $0.795\text{mg}/\text{cm}^2$, 相应压强 37 Tor. 能量终止探测器 E 为硅锂探测器. TOF 装置中飞行总长度为 127.9 cm. 起始时间信号 t_0 由闪烁薄膜加光倍管组成的“零时间讯号”装置给出. 终止时间信号 t 由 E 探测器和电荷灵敏快前级组成的快输出线路给出. 飞行时间 $T = t - t_0$. 整个系统时间分辨 < 500 ps, 最后得到的质量分辨 $\Delta M/M$ 为 1%, 电荷分辨数 $\Delta Z/Z$ 为 3.5%. 探测系统对靶所张立体角为 5×10^{-5} sr, 束流测量用刻度好的束流积分器进行. 用 plurimat-N 多参数数据获取系统进行三参数数据获取, 并以逐个事件方式记录在磁带上. 离线分析是在 Wang-2200VS 计算机和 IBM-PC/At 计算机上分别进行的.

在实际测量中, 对 $\theta_L = 14.5^\circ$ 进行了 Z 和 A 鉴别及 E 的测量. 对 $\theta_L = 10^\circ - 60^\circ$ 产物进行了 A 的鉴别和 E 的测量.

三、实验结果和分析

图 1 是 $\theta_L = 16.5^\circ - 40^\circ$ 三个角度反应产物的 M 分布曲线. 这是一条宽的质量分布曲线. 类弹碎片、类靶碎片这两部分产物都较好的表示在图中. 这是两组质量数分别接近弹核和靶核的产物核的贡献. 以轻碎片和重碎片分布为中心, 在弹核和靶核附近基本保持了各自个性. 在大角度时产物的重碎片因其动能几乎大部被阻尼, 从而大大加长了飞行时间, 致使数据获取系统不能纪录到这部分产物.

在深部非弹性散射反应中, 产物的质量分布, 电荷分布以及中子分布均呈现高斯型. 图 1 中类靶碎片受探测器工作状态限制, 只测得附近产物, 分析时提取了 $M \leq 27$ 的结果. 而类弹碎片稍许偏离高斯分布. 不难看出 $M = 8$ 的深谷应是 ^8Be 的贡献. 即 ^8Be 不稳定性, 很快衰变成两个 α 粒子. $M = 12$ 的峰值, 除去核子交换的结果外, 或许还有准弹裂开等机制的贡献. 在靶场作用下, 具有较高能量的弹核将按下述方式散裂 $^{16}\text{O} \rightarrow \alpha + ^{12}\text{C}$. 又考查 $\theta_L = 14.5^\circ$ 的 M - E 能谱图中(图 2), $M = 12$ 的能谱其峰值能量具有较其两边产物为高的动能及较高的产额. 这种现象可能意味着, 在产物的高能量组分中, 有一部分来自向前飞行的准弹裂开产物 ^{12}C 的贡献.

由各自角度下各产物的能谱积分所得到的角分布看出, 在弹核及其附近, 角分布曲线有着极高的斜率, 前冲很利害, 而远离弹核的产物的角分布曲线大多具有两种斜率的双重

式中
计算

分布
法:

了,
应机

的各
较关

及中
加长
方向

增加
能损

反应
性等

结构,即从小角度区域的前冲型逐步过渡到大角度区域的平坦型。

质量分布随角度增加而变宽及角分布曲线的上述特点表明随相互作用时间加长,核子交换逐渐增多,动能损耗加大,反应的准弹部分减少,向深部非弹性反应逐渐过渡的状况。

图 3 给出了各类平均值和相应的离散及关联系数 ρ 与总动能损耗之间的变化关系。它们分别定义为

$$\bar{A} = \frac{\sum_i A_i \sigma_{Ai}}{\sum_i \sigma_{Ai}}; \quad \sigma_A^2 = \frac{\sum_i (A_i - \bar{A})^2 \sigma_{Ai}}{\sum_i \sigma_{Ai}}$$

$$\bar{Z} = \frac{\sum_i Z_i \sigma_{zi}}{\sum_i \sigma_{zi}}; \quad \sigma_z^2 = \frac{\sum_i (Z_i - \bar{Z})^2 \sigma_{zi}}{\sum_i \sigma_{zi}}$$

$$\bar{N} = \frac{\sum_i N_i \sigma_{Ni}}{\sum_i \sigma_{Ni}}; \quad \sigma_N^2 = \frac{\sum_i (N_i - \bar{N})^2 \sigma_{Ni}}{\sum_i \sigma_{Ni}}$$

$$\rho = \frac{\sigma_A^2 - (\sigma_z^2 + \sigma_N^2)}{2\sigma_z \sigma_N}$$

式中 $N_i = A_i - Z_i$, 即由测量到的质量数和电荷数计算得到。

自从 Huizenga 发现总动能损失 TKEL 和电荷分布离散 σ_z^2 之间的普遍关系之后,作为一种通用的方法,把两核之间的能量耗散与核子转移相联系,建立了 TKEL $\sim \sigma_z^2$ (或者为 σ_A^2, σ_N^2) 的函数关系,这对反应机制的研究是十分重要的。同时由于实验中所得到的各类分布均偏离高斯分布,此时采用上述数学方法

较为合理的反映了平均值和宽度的平均行为,它们将分别量度系统的漂移和扩散的性质。

采用实验中得到的数据利用上述平均值公式计算的质量平均值 \bar{A} 和电荷平均值 \bar{Z} 及中子平均值 \bar{N} 随 TKEL 的变化具有相同的规律: 随 TKEL 的增加,即反应时间的加长都向各自小量的方向漂移约一个单位,然后随 TKEL 的增加,各平均值再向大量的方向回漂。

在图 3 中显示的各类离散 $\sigma_A^2, \sigma_z^2, \sigma_N^2$ 随 TKEL 的变化关系,平均来讲,随 TKEL 的增加,二次矩也在相应增加。总动能损耗在小区域内增加时,各类离散增加较小。在总动能损耗较大时,各离散随 TKEL 的增加很快。

这种各项离散随总动能损耗增加而增加、先慢后快的现象和重系统深部非弹性散射反应的行为有类似之处。对于较轻系统,低能量轰击时,碎片的轻粒子发射,核结构、奇偶性等有其影响外,其核子的扩散过程一般还起主导作用。

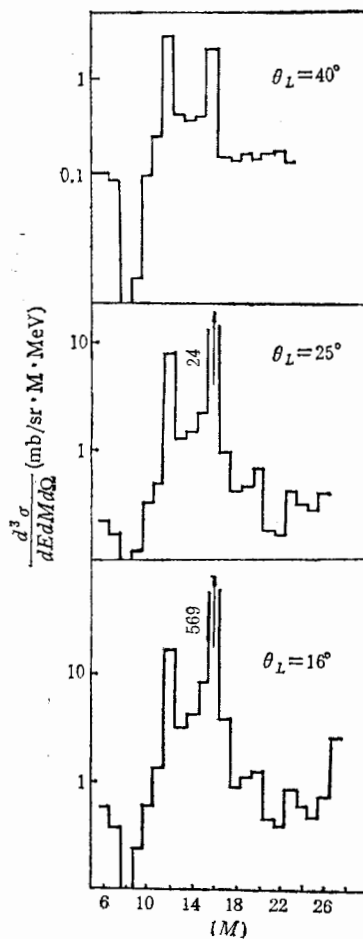
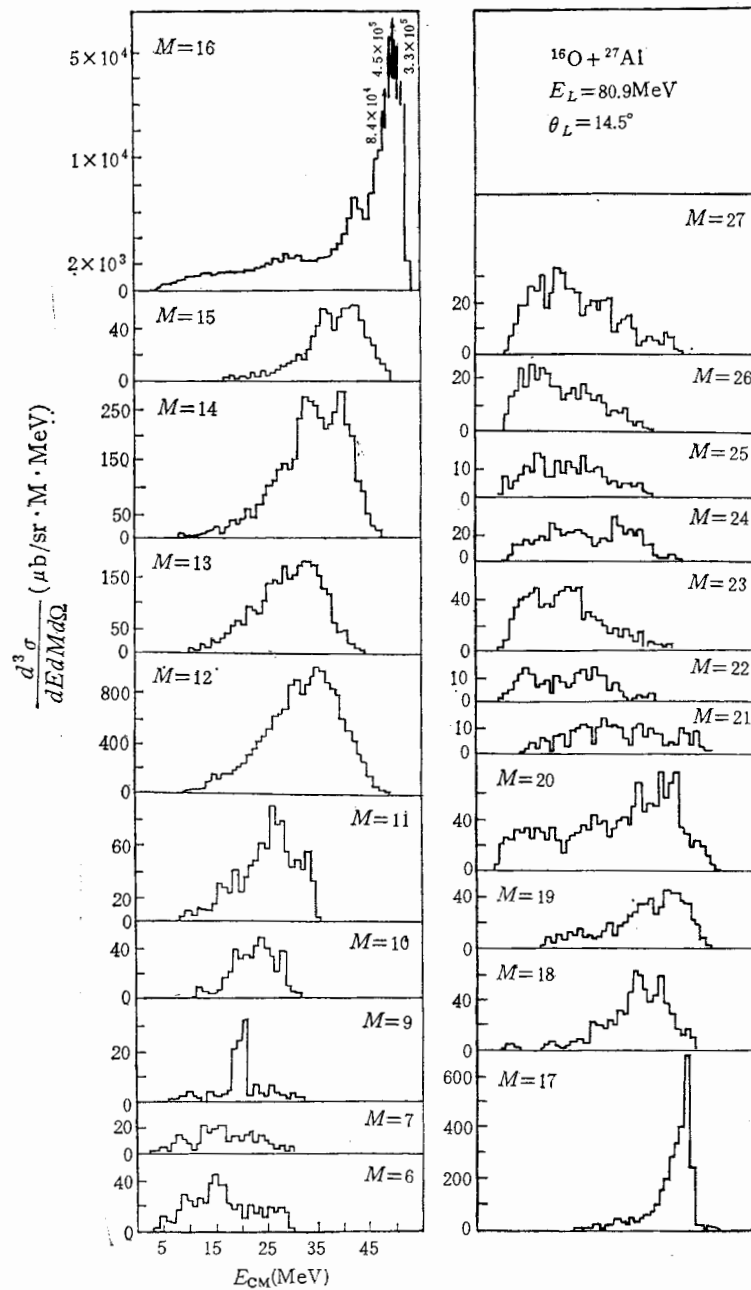


图 1 $\theta_L = 16^\circ - 40^\circ$ 的 M 分布图

纵轴为对数作标。箭头处数字为弹散截面。

图 2 $\theta_L = 14.5^\circ$ 时产物的能谱图

在图 3 中，还给出了反应过程中一个描述中子、质子交换相关联的物理量——关联系数 ρ 与总动能损耗的关系。这是一个比较好的物理量。早期人们用另一个物理量 σ_1/σ_2 来描写中子和质子交换的关联程度。按定义：

$$\rho = 0 \text{ 时, } \sigma_1^2/\sigma_2^2 \rightarrow A_c/Z_c$$

$$\rho = 1 \text{ 时, } \sigma_1^2/\sigma_2^2 \rightarrow (A_c/Z_c)^2$$

$\rho =$
和电
大于
区域
容易
数 ρ
交换

它可
几率

表明
的变
时，例
子交
行为
的。

个向
势能
N =
曲线。

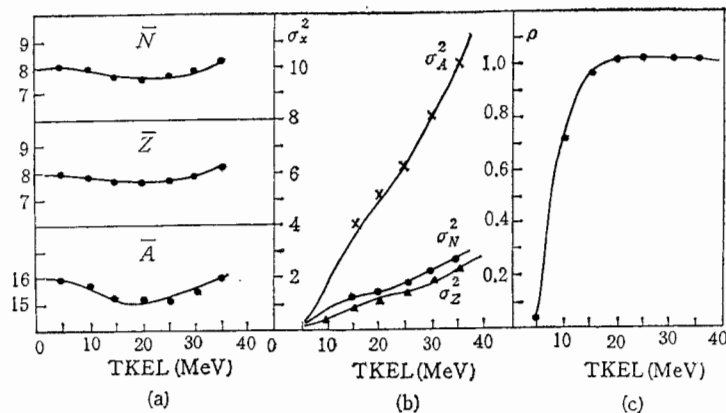


图 3 a) 各平均值与 TKEL 关系 b) 各离散与 TKEL 关系 c) $\rho \sim \text{TKEL}$ 关系

前者为中子,质子交换不相关联。这相当于单核子转移反应或者非激发态机制。而 $\rho = 1$ 为中子质子在反应过程中转移交换完全关联或最大关联。 A_c , Z_c 为复合系统质量和电荷数。当耗散能量从零增加到全阻尼时, ρ 从零增加到 1。而量 σ_A^2/σ_Z^2 却从最初的大于 $A_c/Z_c = 2.1$ 到能量全阻尼时的近似等于 $(A_c/Z_c)^2$ 。它和 ρ 的变化在小的 TKEL 区域中有所偏离。这和某些重系统的反应有类似的变化状态。最近的一些研究表明量 σ_A^2/σ_Z^2 似乎不能完全用来描述粒子转移的关联程度,而用来表示中子的转移较质子的转移为容易的程度。在一些工作中^[7],甚至将它作为反映注入点处的壳结构效应的标度,关联系数 ρ 从 0 到 1 随动能损耗的变化过程,表明反应从准弹向深部非弹的演化过程,中子质子交换由最初的不关联逐步发展到最后的完全关联。

另一个物理量 R 被定义:

$$R = (\sigma_A^2/\sigma_Z^2)/(A_c/Z_c).$$

它可作为小激发能区时,中子质子交换过程中的优势程度。 $R = 1$,表示中子质子交换几率相同, $R > 1$,表明中子交换几率大于质子,反之则 $R < 1$ 。

通过计算表明,TKEL 大约从 0 增加到 15 MeV 时, R 大致在 1.5~1.8 范围之间。这表明在小激发能区时,中子的交换比质子交换容易些。在大激发能区时,因为量 A_c/Z_c 的变化与激发能的变化有关系,应用 R' 来描述。 $R' = \sigma_A^2/\sigma_Z^2/(A_c/Z_c)^2$ 在大的 TKEL 时,例如 25~40 MeV 时, $R' \approx 1.1$ 。这表明,在总动能损耗的这部分区域内,中子和质子交换几率相同。这也和关联系数 ρ 从 0 到 1,中子质子从交换的不关联到完全关联的行为是一致的。在大 TKEL 时,中子质子的交换是完全关联的,交换的几率应该是相同的。

各类平均值在实验中都向小方向漂移,引起这种漂移的一个主要原因是系统受到一个向势能面梯度减小的方向上的驱动势的作用。图 4 给出 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 系统二维和一维势能面图。在二维(系统 DIC 发生的平均角动量 $\bar{L} = 32$)势能面中,注入点在该图 $N=8, Z=8$ 处。但势的最低谷处在 $N=6, Z=6$ 处。其余为由内向外的逐一增高的等高线。为了较清楚的表明势能面的精细结构,一维图中给出了考虑壳效应的驱动势图。图

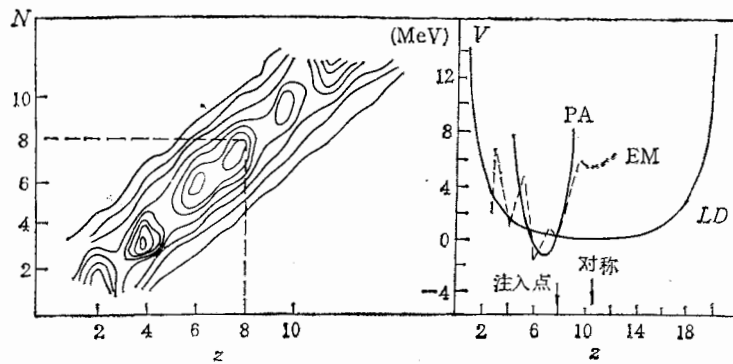
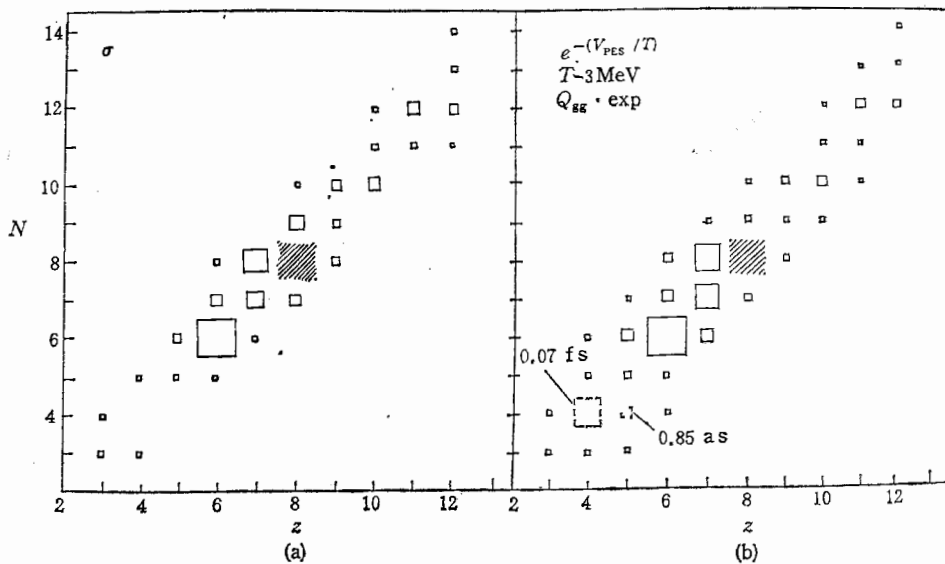
图 4 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 二维和一维势能面结构图

图 5 a) 实验测得的同位素产额分布图. b) 利用势能面计算得到同位素产额分布图

中实线均为没加壳修正的按液滴模型计算的势能面 LDM 势, 虚线是用实验的核素质量计算的驱动势 (EM), PA 则是在 $6 \leq Z \leq 9$ 的区间内对加了壳效应的势进行最小二乘法拟合得到的一支抛物线.

在不考虑壳效应势的影响下, 一次矩将在 LD 势的作用下, 向其极小方向即对称点处漂移也就是向平均值增大方向漂移. 但实验中的一次矩向小方向漂移近一个单位. 考虑壳的存在, 使得真正驱动势的极小值并非在 LD 势的对称点上. EM 势的极小值在 $N = 6, Z = 6$ 处, 在这个势的作用下, 一次矩应当减少两个单位, 才能漂向 ^{12}C 所在位置, 求其稳定. 这和实验结果也不符合. 漂移的太高了. 真正漂移减小的地方是在 PA 的谷底处.

可见, 忽略壳的影响或单一考虑壳的影响, 所得结果都和实验不相符合. 实际上, 一开始在小的动能损耗情况下, 考虑了壳效应的势在起作用. 尔后随 TKEL 的增加, 双

第

核子
势
向谱
素
的
示:

其中

这里

分
面
外,时间
 $\rho =$
激发4, 表
相同
壳效
应面
计

本工

[1]
[2]
[3]
[4]
[5]
[6]
[7]

核系统的核温度及形变逐步增加,壳效应逐步被洗掉。此时在大的 TKEL 时,液滴模型势又起了作用。这可能是造成随 TKEL 增加系统各类平均值先向小 \bar{A} 、小 \bar{Z} 小 \bar{N} 方向漂移,然后到大的 TKEL 时又向大 \bar{A} 、大 \bar{Z} 大 \bar{N} 方向回漂的原因。

图 5 的结果表明了势能面对核子转移的影响, a) 图是在 $N-Z$ 平面上,利用飞行时间谱仪和 $\Delta E-E$ 探测系统得到的产物同位素的产额。 b) 图是利用势能面计算的相应同位素的产额值。通过局部统计平衡原理,对各出射道势能面的值用相应的产额 $d(N, Z)$ 表示:

$$d(N, Z) \propto \exp(-V_{\text{PES}}(N, Z)/T)$$

其中, T 是核温度参量。势能面用下式计算:

$$\begin{aligned} V_{\text{PES}}(N, Z) &= V_{\text{out}} - V_{\text{in}} \\ &= -Q_{\text{gg}} + V_{\text{coul}} + V_{\text{rot}} \end{aligned}$$

这里 V_{coul} ——出射道库仑能

V_{rot} ——转动离心能。

Q_{gg} 是利用核质量表计算得到的基态 Q 值。

各正方形面积表示用 ¹²C 产额归一化后的产额。核温度参数选用了 3MeV。阴影部分面积表示弹散值。经过对比,不难看出,除去少数几个产物因寿命太短不能被实验测量外,其余反应产物的实验结果和利用上述方法计算的结果相一致。

四、结 束 语

通过以上讨论,在入射能量为 80.9MeV 时,观察到 DIC 反应成份存在。随相互作用时间的加长,能量耗散逐步增加,核子交换增加,系统逐步向全弛豫发展。在小 TKEL 时, $\rho = 0$ 质子和中子的交换不是关联的。量 R 表明,此时 $\sigma_A^2/\sigma_Z^2/(A_c/Z_c) > 1$, 说明在小激发能区系统交换中子比交换质子更容易些。在强阻尼时, $\rho = 1$, $\sigma_A^2/\sigma_Z^2 \rightarrow (A_c/Z_c)^2 = 4$, 表现了核子交换是完全关联的。量 $R' \rightarrow 1$, 又表明此时交换关联的核子其交换几率相同。各种平均值随反应时间的增加向小方向漂移,然后再向大方向回漂,是先受到考虑壳效应的势能面的强烈作用,而后随 TKEL 的增加壳效应逐步被“洗掉”后又受到无壳效应势能面的作用的结果。同时,对于这个系统从实验中所得各产物的产额和利用势能面计算的各产物的产额基本是一致的。

作者们感谢 Volkswagen Stiftung, (西德大众汽车公司基金会)和 R. Bock 教授对本工作的资助和关心。

参 考 文 献

- [1] T. M. Cormier et al., *Phys. Rev.*, **C13** (1976), 682.
- [2] T. Mikumo, et al., *Phys. Rev.*, **C21** (1980), 620.
- [3] M. Sato, et al., *Phys. Rev.*, **C27** (1983), 500.
- [4] 沈文庆,《高能物理与核物理》, **3**(1985), 332.
- [5] 沈文庆,《高能物理与核物理》, **5**(1985), 611.
- [6] 殷旭, 褚永泰, 近物所年报, (1981), 114.
- [7] 邹恩九, K. D. Hildenbrand, et al., 近物所年报, (1981), 44.

质量
二乘

点处
考
直在
置,
尚谷

上,
双

THE RESEARCH OF THE DISSIPATION PROCESS
AND THE NUCLEON TRANSFER PRODUCED BY
80.9MeV ^{16}O ON ^{27}Al

YIN XU SHEN WENQING ZHU YONGTAI ZHAN WENLONG

FENG ENPU XIE YUANXIANG WANG QI LI SONGLIN

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou*)

ABSTRACT

The three-fold differential cross sections $d^3\sigma/dA \cdot dZ \cdot dE$ of the projectile-like fragment produced by 80.9 MeV ^{16}O on ^{27}Al were measured by using the time of flight system with $\Delta E-E$ telescope.

The dissipation process and the nucleon transfer in this reaction have been discussed.

产物
作属
应的

其中
为:

在这
量比
阳极

其中
与粒

时的