

82.7 MeV $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 碰撞中类弹碎片和 发射 α 粒子的符合测量

沈文庆 詹文龙 诸永泰 尹淑芝
郭忠言 齐卫民 范国英 靳根明
李松林 张震 张玉虎
(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

摘 要

在 82.7 MeV $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应的类弹碎片和发射 α 粒子的符合测量中, 得到了在速度平面上的类弹碎片 C 和 α 粒子符合的伽利略协变截面的等高图和符合关联角分布. 测到的关联 α 粒子在正角度区(与类弹产物在束流的同侧)主要来源于类弹发射; 在负大角区主要来源于类靶发射; 在负小角区主要是弹核 ^{16}O 碎裂的贡献. 提出了弹核碎裂后的余核在靶核作用下继续进行阻尼碰撞的反应机制的可能性. 同时也确定了单举 DIC 测量时强的碳碎片产额中, 来自 DIC 激发的 ^{16}O 发射 α 粒子的余核 ^{12}C 的贡献并不大.

一、引 言

深部非弹性碰撞的特征之一是运动动能的耗散, 所发射的反应产物具有较高的激发能, 相应地就容易发射轻粒子. 反应所发射的轻粒子也会给出有关反应中弛豫过程各阶段的讯息. 因此通过发射轻粒子与反应产物的符合测量可进一步研究深部非弹性碰撞反应机制. 实验中(尤其是轻系统)发现了大量来自三体反应的 α 粒子, 对其反应机制存在多种解释: ① 直接反应即弹核碎裂; ② 类弹碎片发射; ③ 类靶碎片发射; ④ 双核系统裂开前发射等. 不同的 α 粒子发射机制相应于能量耗散过程的不同阶段. 在 80.6 MeV $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应的单举测量实验中^[1], 得到了很强的碳碎片产额, 除了核结构的影响^[2]外可能也和发射 α 粒子有关. 为了进一步研究强的碳产额的来源, 发射 α 粒子的反应机制及它们之间关系, 我们进行了 82.7 MeV $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应中出射的类弹碎片和发射的 α 粒子的符合测量的研究.

文献 [3, 4] 指出, $E_L = 65\text{MeV}$ 时 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应产生的 $^{12}\text{C}-\alpha$ 粒子的符合大部分来自类靶产物的跟随发射. 文献 [3] 指出, 在小角区可能有小部份 (~10%) 的 ^{16}O 裂开并预平衡发射 α 的贡献. 文献 [5] 指出 $E_L = 88\text{MeV}$ 时, $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应产生的 C- α

子符合大部
角区有小部
反应, 而 E_L
同轰击能量下
机制随轰击能

实验是在
 $^{16}\text{O}^{+5}$ 离子的能
100 nA. 为了
涡轮分子泵表
污. 靶子为 1
用置于 2
类弹碎片. 与
作符合 α 粒子
和 12 μ , 在小
箔以阻止弹
用 Pluric
事件为 6 个参
或 ($\Delta E-E$).
开门信号的直

实验数据
符合的 T 参
微处理机上;
Al 箔和半靶

片和

量中, 得到
图 and 符合
侧) 主要来
弹核 ^{16}O 碎
片的反应机
DIC 激发

具有较高的激
弛豫过程各阶
非弹性碰撞反
反应机制存在
; ④ 双核系
在 80.6 MeV
构的影响^[2]外
子的反应机制
和发射的 α

子符合大部份来自于类弹产物的跟随发射, 只在与类弹产物探测器相对的束流异侧的大角区有小部分类靶产物跟随发射的贡献. 其差别可能是当 $E_L < 70 \text{ MeV}$ 时主要是熔合反应, 而 $E_L > 70 \text{ MeV}$ 后是其它反应的产额 (例如 DIC) 急剧增加造成的. 为此, 在不同轰击能量下深入进行 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应中类弹碎片和发射 α 粒子的符合测量对搞清反应机制随轰击能量的变化及与发射 α 粒子之间的关系是很有意义的.

二、实验装置和数据获取、处理方法

实验是在中国科学院近代物理研究所的 1.5 米迴旋加速器上进行的. 加速器给出的 $^{16}\text{O}^{5+}$ 离子的能量为 87.5 MeV, 经过光栏系统, 在靶上得到直径为 2.5 mm 的束斑, 流强约 100 nA. 为了降低油沾污, 用 0.694 mg/cm^2 的 Ni 箔把加速器真空和靶室的真空隔开, 用涡轮分子泵获得靶室真空, 并在与靶室连接处和靶子周围分别放置液氮冷阱以降低油沾污. 靶子为 1.62 mg/cm^2 厚的无衬 Al 靶, 估计靶上的碳沾污量小于 $10 \mu\text{g/cm}^2$.

用置于 21.5° (稍大于擦边角) 电离室作 ΔE , Au(Si) 探测器为 E 的望远镜探测器测类弹碎片. 另外采用三组安装在可独立转动的转臂上的 Au(Si) 探测器望远镜中的两组作符合 α 粒子的测量 (如图 1). 探测 α 粒子的望远镜的 ΔE 探测器的厚度分别为 17, 9 和 12μ , 在小角区 ($-20^\circ - +20^\circ$) 测量时, α 粒子探测器前加一层 17.5 mg/cm^2 厚的 Al 箔以阻止弹散粒子. 实验中进行了 $-140^\circ - +100^\circ$ 之间的在平面符合测量.

用 Plurimat-N 多参数系统进行在线数据获取, 数据以逐个事件方式记在磁带上. 每个事件为 6 个参数, 这些参数分别为: 重离子探测器的 ΔE 和 E 两个参数, 大角区 $(\Delta E - E)_{\alpha_1}$ 或 $(\Delta E - E)_{\alpha_2}$ 的两个参数, 一个经过电子学线路符合并选择出 α 粒子的 $E_{1\alpha}$ 参数和作为开门信号的重离子与 α 粒子符合时间 T 参数.

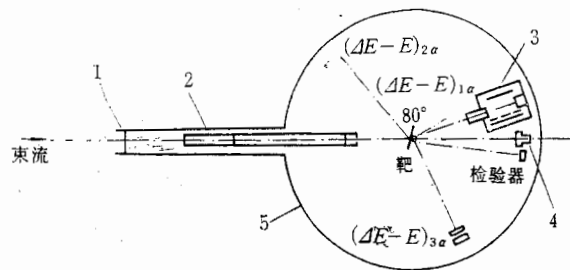


图 1 出射碎片和发射 α 粒子符合实验的装置示意图

- 1. 隔油镍窗 2. 准直管道 3. ΔE 电离室和 E 半导体探测器 $\theta_{HI} = 21.5^\circ$
- 4. 法拉第筒和抑制偏压 5. ϕ 1 米散射室

实验数据经 $(\Delta E - E)_{HI}$ 进行 Z 鉴别后, 在对应于一定 Z 的 ΔE_{HI} , E_{HI} 和对应于真符合的 T 参数上加窗, 分别读出 E_{α_1} , E_{α_2} , E_{α_3} 的原始数据. 离线数据处理是在 TRS-80 微机处理机上进行的. 采用 Northcliffe 的能损表^[6]对出射的 α 粒子进行了 ΔE 薄片, 阻止 Al 箔和半靶厚中的能损修正, 得到了实验室系能谱和速度平面上的伽利略协变截面等高

的符合大部
) 的 ^{16}O 裂开
产生的 C- α

图. 伽利略协变截面为: $\frac{1}{\rho_\alpha C} \cdot \frac{d^3\sigma}{dQ_{HI} \cdot dE_\alpha \cdot dQ_\alpha}$, 其中 C 是光速; P_α 、 E_α 分别为测到的 α 粒子的动量和能量; Q_{HI} 、 Q_α 分别是重离子探测器和 α 粒子探测器的主体角. 这种速度和空间的截面具有对伽利略坐标变换的不变性.

三、实验结果

在这样较轻的反应系统中出射的 α 粒子有较大的质心速度, 因而大角区的 α 粒子在实验室系中能量很低, 由于探测器望远镜有一定的探测阈故无法测到全能谱. 实验中我们测量了 -140° — $+100^\circ$ 角区之间的 20 个角度下的在平面与类弹产物相符合的发射 α 粒子能谱. 这里仅给出统计较高的 C- α 符合的结果.

图 2a 显示了 C- α 在速度平面上的伽利略协变的符合截面 $d^3\sigma/CP_\alpha \cdot dQ_{HI} \cdot dQ_\alpha \cdot dE_\alpha$ 等高图. 图中 V_{\parallel} 和 V_{\perp} 分别为平行或垂直于束流方向的 α 粒子的速度分量, V_{cm} 是系统的质心速度, V_b 为入射离子速度, V_{PL} 和 V_{TL} 分别是类弹碎片和类靶碎片的速度. 带阴影的圆弧是 α 探测望远镜的探测阈, 前方向的带阴影的圆弧是附加 Al 阻挡箔造成的测量 α 粒子能量的截断值. 图中标出了以 V_{TL} 、 V_{PL} 矢量的终点为圆心, 发射 α 粒子和发射后的余核间的库仑排斥能对应的速度为半径作出的类靶和类弹发射 α 粒子的最可几速度圆. 图中虚线是实验中未测到, 而根据实验数据倾向外推的. 可以清楚地看出等高图中有三个峰, 与文献 [3,4] 报道的不一样. 在负的较大角区有一个较缓的峰, 其极大值与

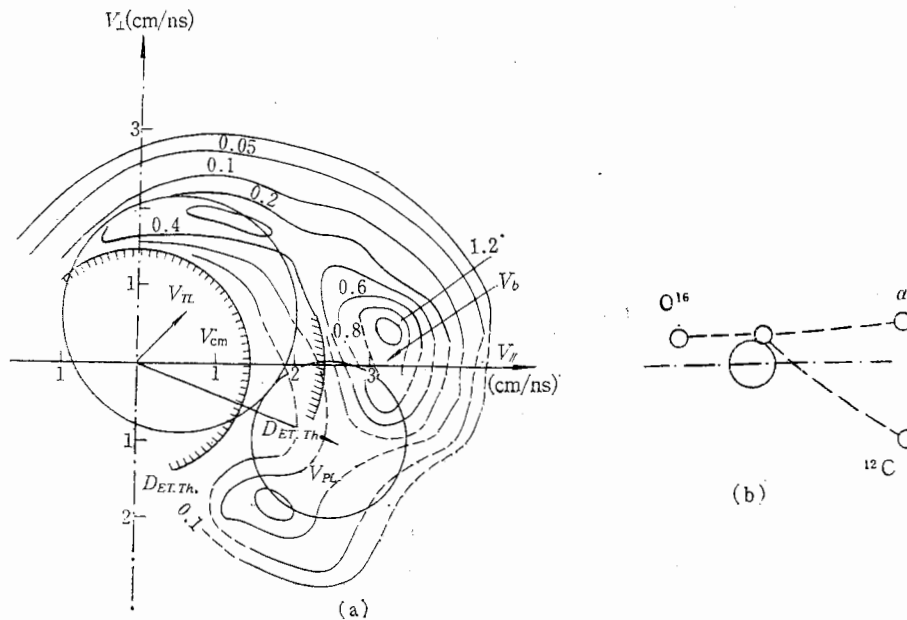


图 2(a) $82.7\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 产生的 C- α 伽利略协变截面 $\frac{d^3\sigma}{CP_\alpha dQ_{HI} dQ_\alpha dE_\alpha}$

在速度平面上的等高图.

(b) $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应中, 弹核碎裂 ($^{16}\text{O} \rightarrow ^{12}\text{C} + \alpha$) 的示意图.

类靶产物大, 极大的正角区有较大的发射 α 粒子. 发射源与文献 [1] 较厚且阻变坏 (实际 3%), 产对不行积分得角分布. 地方出现发射源的坐标 $\frac{d^2}{dQ_\alpha dQ_I}$ $\int \frac{d^2\sigma}{dQ_\alpha dQ_I}$

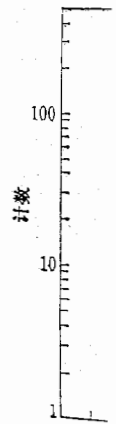


图 4 ^{16}O

图中的虚 27 ns. 对行时间差. 可见我们于飞行时是可靠的.

E_α 分别为...
的主体角.

区的 α 粒子...
符合的发射 α

$d\Omega_{HI} \cdot d\Omega_\alpha$...
分量, V_{cm} 是...
碎片的速度...
阻挡箔造成...
射 α 粒子和...
子的最可几...
地看出等高...
峰, 其极大值

类靶产物发射 α 的最可几速度基本一致; 前角区有一个较陡的峰, 相应的反应截面也最大, 极大处的速度相应于炮弹速度 V_b ; 正的较大角区还有一个峰, 与类弹碎片发射 α 速度相符. 这些峰对应于不同的 α 发射源. 速度谱没有明显的结构, 这与文献 [5] 的结果不一样, 可能是靶子较厚及阻挡箔的影响, 它们使能量分辨变坏 (实验中 α 粒子能量分辨约为 2—3%), 产生较为光滑的速度谱.

对不同的角区分别对符合 α 能谱进行积分得到如图 3 所示的 C- α 符合关联角分布. 该关联角分布在和图 2 相应的地方出现有峰, 可清楚地看出来来自不同发射源的 α 粒子的产额. 图中右侧的纵

坐标 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega_\alpha d\Omega_{HI}} / \frac{d\sigma}{d\Omega_{HI}}$ 为微分多重性, 由此可以得到相应 C- α 符合的多重性 $\langle M \rangle = \int \frac{d^2\sigma}{d\Omega_\alpha d\Omega_{HI}} / \frac{d\sigma}{d\Omega_{HI}} \cdot d\Omega_\alpha$. 对应负的小角区的峰, 的微分多重性很大, 这与文献 [5] 的结果基本相同. 图中标出的误差仅包括统计误差.

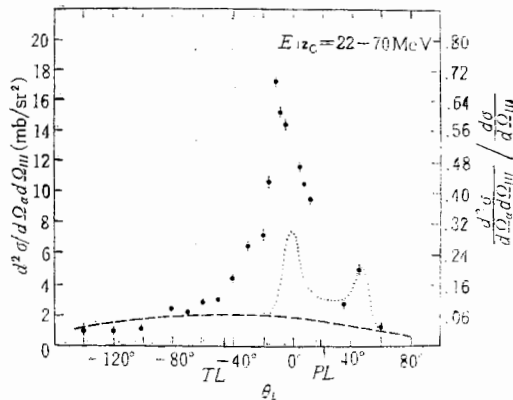


图 3 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应实验室系 C- α 符合关联角分布. 图中的曲线是在简单的模型假设下计算的 DIC 类弹 (.....) 和类靶碎片 (----) 相继发射的 α 粒子关联分布

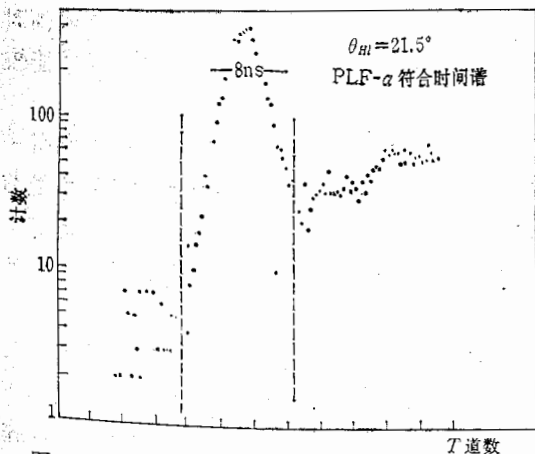


图 4 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应中出射碎片与 α 粒子符合的时间谱

图中的虚线是取出关联能谱和角分布时所加的窗.

27 ns. 对所测到的 C 的能量范围为 22—70 MeV, α 能量范围为 5—35 MeV. 相应的飞行时间差分别为 20.3 ns—11.3 ns 和 6.45 ns—2.44 ns, 因此可引起的最大时间差约为 18 ns. 可见我们在 T 谱上看到的半宽度和所开的窗是合理的. 在 T 谱的高道数上出现的包是由于飞行时间更长的类靶碎片引起的. 从 T 谱上估计偶然符合约占 15%, 由此可见, 数据是可靠的.

果基本相同. 图中标出的误差仅包括统计误差. 由于 ΔE 探测器的厚度和前角区加上的 Al 阻挡箔限制了低能 α 粒子的测量, 但从测到的 α 能谱看, 其峰位却测到了. 根据较完整的 α 粒子能谱形状外推, 把这部份截面补上, 这部分截面约占总截面的 3%, 这种外推对符合关联角分布引起的误差并不大. 实验截面是根据检验器计数相对归一的; 而靶厚, 束流积分, 探测器立体角等误差在绝对归一时产生的系统误差约为 10—20%.

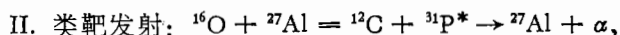
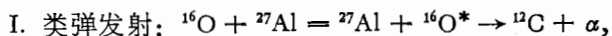
图 4 给出了出射类弹碎片与 α 粒子符合的时间谱, 半宽度为 8 ns. 图中虚线表示数据处理时在 T 谱上开的窗, 约



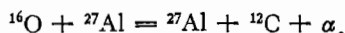
ΔE_α

四、讨 论

从图 2 看出 α 粒子来自不同的发射源. 在 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 系统的三体反应中, 跟随衰变发射 α 粒子的可能反应机制如下:



III. 双核系统发射 α , 随后裂开:



根据运动学分析(图 2), 以 V_{PL} 为圆心的速度圆表示类弹碎片发射 α 粒子的最可几速度圆, 以 V_{TL} 为圆心的速度圆表示类靶碎片发射 α 粒子的最可几速度圆. 在我们所研究的反应中, 类弹碎片发射 α 粒子主要分布在正角区, 类靶碎片发射则主要分布在负角区. 由于大角区测到的反应截面很小, 所以在本实验中双核系统在分裂前发射 α 粒子的贡献不大.

正角区出现的峰正好落在以 V_{PL} 为圆心的速度圆上(图 2). 在类弹碎片静止的坐标系里, 假设发射 α 粒子的几率各向同性, 对应类弹碎片静止的坐标系转到实验室坐标系时, 不同的实验室角度对应于不同的类弹碎片发射 α 粒子的立体角. 图 2 可见在 $+60^\circ$ 和接近 0° 方向对应类弹发射 α 粒子的主体角最大, 于是这两处测到的反应截面出现了极大值, 这是主体角效应的结果. 在类弹碎片的激发能较低, 也就是所测到的碳能量较高时(图 5 (b)), 这种贡献较大; 图 5 (a) 对应于测到的碳的能量较低, 即类弹碎片激发能较高时, 这种假设机制的贡献较小.

比较图 5 (a) 和 5 (b), 可以看出对碳谱开较高的能量窗时, 类靶碎片出射的方向有一较显著的峰, 这可能是类靶碎片向前发射的 α 粒子的贡献. 而在碳谱上加较低的能量窗时, 这种机制的贡献较小. 如图 3 虚线所示的组份为类靶贡献, 若假设在 φ 角方向类靶发射 α 粒子几率一样, 类靶发射的 α 粒子占同样假设下估算的发射 α 粒子的总截面较大的比份.

在负的小角区发射 α 粒子的强度最大, 根据上述分析不能归属于前面提到的三种跟随衰变发射 α 粒子的反应机制. 此处 α 能谱峰位的速度正好接近入射弹核的速度, 它们可能来自 ^{16}O 碎裂的贡献. 其反应机制如图 2 (b) 所示, 入射的 ^{16}O 与 ^{27}Al 相互作用中, ^{16}O 碎裂成 $^{12}\text{C} + \alpha$, 与轰击能量较高时的情况一样, 碎裂是在反应的初期发生的, 还来不及有大量的动量、能量的弛豫, 因而 α 粒子带着原有的入射弹核速度在前冲方向出射, 余核 ^{12}C 受到靶核 ^{27}Al 的作用经历一个弛豫过程在束流方向的另一侧出射. 从图 5 (a) (b) 可见当碳的能量较高时(与能量较低时相比), 碎裂的 α 粒子峰位落在稍大的角度处, 这可理解为: 当反应的碰撞参数较大时, 对应入射角动量较大, 因此碎裂后的系统转动速度较大, 转动到类弹碎片探测角所需的时间较短, 所弛豫的能量就较小. 与之相反, 入射碰撞参数较小, 系统转动速度小, 到达类弹碎片探测角所需的时间长, 从而使能量耗散增大.

从上述分析可见, 实验中测到的 α 粒子是来自不同的发射源的, 其中类靶发射的 α 粒子组份对于类弹碎片单峰 DIC 测量中的分析并没有影响. 假设图 3 中的关联角分布在

立中, 跟随衰变

子的最可几速度
在我们所研究的
布在负角区. 由
 α 粒子的贡献不

碎片静止的坐标
到实验室坐标系
可见在 $+60^\circ$ 和
截面出现了极大
匀碳能量较高时
单碎片激发能较

出射的方向有一
口较低的能量
 θ 角方向类靶发
匀总截面较大的

提到的三种
的速度, 它们可
相互作用中, ^{16}O 碎
, 还来不及有
出射, 余核
5 (a) (b) 可见
度处, 这可理
转动速度较大
, 入射碰撞参
散增大.

靶发射的 α
与关联角分布

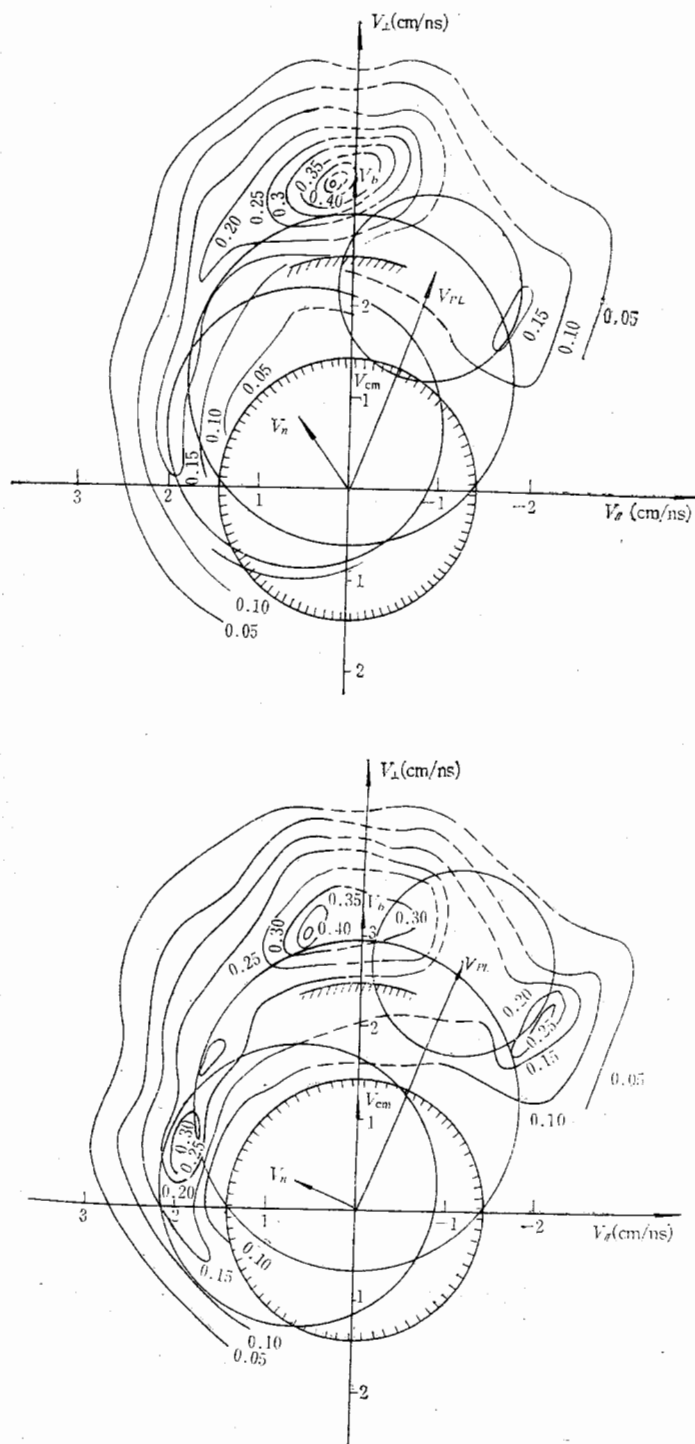


图 5 82.7MeV $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 产生的 C- α 符合伽利略协变截面 $\frac{d^3\sigma}{CP_\alpha d\Omega_{HI} \cdot d\Omega_\alpha \cdot dE_\alpha}$

在速度平面上的等高图

(a) 关联碳谱窗: $22\text{MeV} < E_c < 41\text{MeV}$. (b) 关联碳谱窗: $E_c > 53\text{MeV}$.

φ 方向发射 α 粒子是各向同性的, 积分求和后得到的 C- α 的多重性 $\langle M \rangle_{C-\alpha}$ 约 0.70, 与文献 [5] 给出的 0.6 相近. 考虑到类靶发射的 α 粒子对单峰 DIC 测量到的碳没有影响, 除去这部份后可得到 C- α 多重性约为 0.3, 但从类弹碎片和碎裂机制发射 α 粒子的机制看, 实际上出平面的 C- α 产额是很低的, 因此在 DIC 单峰测量中很大的碳产额主要并不是来自 DIC 后的 ^{16}O 发射的 α 粒子.

综合上述情况, 轰击能为 82.7 MeV (5.2 MeV/u) $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 系统中, 我们测到的 α 粒子的来源是: ① 正角度主要是类弹碎片的跟随发射; ② 负的大角区主要是类靶碎片的跟随发射; ③ 负的小角区主要是 ^{16}O 碎裂的贡献. 同时也肯定了 DIC 产生的 ^{16}O 碎片跟随发射 α 粒子对单峰测量中测到的强的碳产额影响并不大. 另外还讨论了弹核碎裂后的余核在靶核作用下继续进行能量弛豫的可能性. 因此深入进行类弹碎片和发射轻粒子符合测量, 对于进一步搞清这种反应机制是非常有意义的.

参 考 文 献

- [1] 沈文庆等, 高能物理与核物理, 9(1985), 332.
 [2] 沈文庆等, 高能物理与核物理, 9(1985), 611.
 [3] M. B. Tsang et al., *Phys. Rev.*, C23(1981), 1560.
 [4] J. W. Harris et al., *Phys. Rev. Lett.*, 38(1977), 1460.
 [5] M. Sasagase et al., *Phys. Rev.*, C27(1983), 2630.
 [6] L. C. Northcliffe and R. F. Schilling, *Nuclear Data Tables*, A7(1970), 233.

COINCIDENCE MEASUREMENT BETWEEN α -PARTICLES AND PROJECTILE-LIKE FRAGMENTS IN REACTION OF 82.7 MeV ^{16}O ON ^{27}Al

SHEN WEN-QING ZHAN WEN-LONG ZHU YONG-TAI YIN SHU-ZHI GUO ZHONG-YAN

QIAO WEI-MIN FAN GUO-YING JIN GEN-MING LI SONG-LING

ZHANG ZHEN ZHANG YU-HU

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

In the coincidence measurement between α -particles and projectile-like fragments in the reaction of 82.7 MeV ^{16}O on ^{27}Al , the contour plot of the C- α coincidence in the velocity plane and the coincident angular correlation are obtained. Different mechanisms of α -particle emission are analysed. A possible reaction mechanism of incomplete DIC is discussed.

此对
由 β
动学
而集

在五
大的成功
条新的途
合之间的
ttelson 模
立相应的
用代数方
生成
揭示 Elli
目的是双
SU(3) 模

Elliot

其中 \hat{A}_0 是

1) 国家
本文