

97MeV¹⁶O + ⁵¹V 反应中 α 粒子 与类弹产物的关联测量

王琦 王高升 诸永泰 李松林 王晓明
吴钟立 胡晓庆 殷旭 徐珊珊 范国英
冯恩普 宋世战 尹淑芝 张震

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

摘 要

测量了 α 粒子与类弹产物的关联,得到的 α 粒子符合能谱呈现出类弹、类靶相继发射的特征; α 粒子与类弹产物¹²C的关联表明了弹核破裂(break-up)机制的存在。在类弹产物探测方向附近,观察到核的阴影效应。

一、引 言

六十年代以来,人们对重离子碰撞过程中产生轻粒子发射这一普遍现象进行了广泛深入的研究,积累了大量的实验结果。基于这些实验事实, J.P.Wurm^[1]提出了描写轻粒子发射各个可能过程的物理图象,概括起来可以分为两类:

一类是到达双核系统(DNS)之前的发射(双核系统近乎于 A/Z ,角动量和能量 E 的平衡);另一类则是伴随双核系统进一步向复合核(形状平衡)发展过程中的发射和向类弹、类靶过渡过程中的发射。第一类发射过程包括弹核破裂、瞬发粒子发射(或者叫做费米喷射)和局部热区域发射;第二类发射过程则包括预平衡发射、断点 α 粒子发射以及碎片蒸发粒子过程。到目前为止,第二类过程虽有较多的实验证明,但在近期的实验中,发现了一些新的实验现象,在关联能谱和角分布函数中观察到核的末态间的相互作用——相干效应^[2]和阴影效应^[3,4]。有关阴影效应的实验数据很少,要确定这个现象的存在,还需要对不同的弹、靶组合系统进行实验测量。至于第一类发射过程,仅有少量的实验数据,要证明其存在还需要大量的实验工作。目前人们正在采用符合测量技术对上述现象进行研究。

由于有关阴影效应的实验数据不多,已有的数据也只局限于有限的弹、靶组合系统,为此,我们选用了不同于文献[3,4]的弹、靶系统进行实验。在实验安排上,我们也强调了对前角区非平衡、快的 α 粒子发射的测量,试图得到有关第一类发射过程的信息。

二、实验及数据处理

实验是在中科院近代物理研究所 1.7 m 回旋加速器上完成的。出射能量为 97 MeV 的 ^{16}O 束流经过隔油镍箔和准直光栏后打到靶子上,加速器的平均束流强度为 50 nA,所用的靶子为 $1.6\text{mg}/\text{cm}^2$ 的无衬 ^{51}V 靶,纯度为 99.9%。类弹探测器放在 40° 角处, α 粒子探测器分别放置在束流两侧,通过电子学线路可实现 α 粒子与类弹碎片的关联测量,探测器布局及所采用电子学线路的详细情况在文献[5]中有详细报道,这里不再重复。实验中所有的探测器讯号经过电子学线路和本所的 MOLDASI 数据获取系统以事件方式记录在磁带上。实验数据在 VAX/780 计算机上进行离线分析,分析过程中包括对 ΔE 探测器造的能量损失修正,半靶厚修正及探测器前面所挡铝箔等的修正均按事件方式进行。所采用的各探测器的能量刻度标准是 $\text{ThC}-\alpha$ 源刻度、弹性散射法刻度和精密脉冲产生器方法刻度结果的综合。用弹性散射计数对所得能谱进行相对归一。

三、实验结果及其分析

图 1 给出了与类弹产物 B、C、N、O、F 关联的 α 粒子符合速度谱。由于探测器的阈

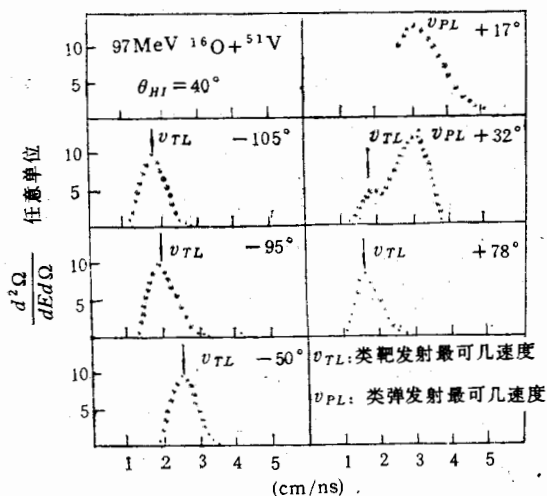


图 1 与类弹产物(B、N、C、O、F)关联的 α 粒子符合速度谱

值较高,造成了 $+17^\circ$ 角速度谱低能部分有较大切断。图中箭头标出的速度是基于类弹、类靶相继发射机制所计算的 α 粒子最可几能量。由图看出 -50° 、 -105° 、 -95° 和 $+78^\circ$ 这四个角度的能谱明显地表现为单峰,而 32° 角的能谱则表现为两个能量峰。这些能谱特征与类弹、类靶相继发射的运动学假设是一致的。以碳元素与 α 粒子符合为例,其类弹、类靶相继发射的反应式分别为:

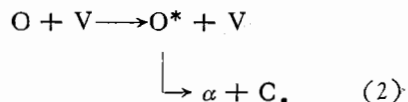
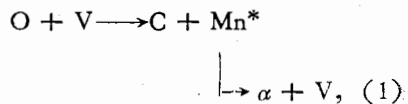


图 2 是反应运动学矢量图。图中假设级 α 粒子是来源于深部非弹性碰撞过程中反应产物的相继发射,在相对静止的坐标系中, α 粒子发射是各向同性的,并且只考虑 α 粒子与出射剩余核的库仑排斥作用。图中虚线椭圆代表类弹碎片跟随发射 α 粒子最可几速度矢量的终点,实线圆是类靶碎片相继发射 α 粒子最可几速度矢量的终点。从运动学速度矢量图可见,在靠近类弹产物探测角度的区域,应该看到两组速度分量,一组来源于类

弹发射,另一组来源于类靶发射.而在远离类弹探测角 ($\theta_{HI} = 40^\circ$) 的角度,则只有一组来源于类靶发射的 α 粒子. 将我们得到的实验结果与运动学矢量图比较发现, -50° , -105° , -95° 和 $+78^\circ$ 角的 α 粒子最可几速度正好落在类靶相继发射的速度矢量圆上, $+32^\circ$ 角的 α 粒子速度谱的两组分量也正好对应于类弹、类靶的发射. 它们之间的峰位移动也正好反映了运动学效应. 所有这些特点证明了类弹、类靶相继发射机制的存在.

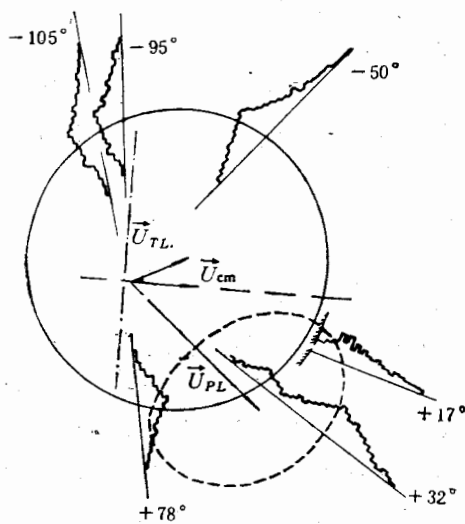


图 2 核反应运动学速度矢量图

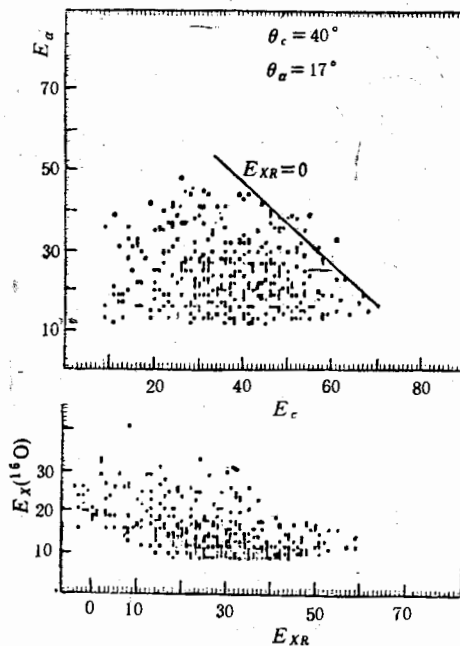


图 3 ^{12}C - α 关联的两维能量关联图

仔细分析 $+17^\circ$ 角的速度谱可见, α 粒子的最可几速度与所计算的类弹产物相继发射的最可几速度相一致, 但谱的高能端似乎还有其它成份存在. 这说明除了类弹相继发射机制对这个角度的谱有贡献外, 还有其它机制的贡献. 图 3 是 $+17^\circ$ 角的 α 粒子与类弹产物 ^{12}C 符合的两维能量关联图. 为讨论方便, 我们对所测的符合结果根据三体运动学进行了转换^[6]. 考虑下列反应

$$a + A = b^* + B = b_1 + b_2 + B,$$

经计算 b^* 粒子的激发能为

$$E^* = \varepsilon - Q_{b,u}, \quad (3)$$

其中 $Q_{b,u} = (m_b - m_1 - m_2)c^2$ 是 b^* 破裂为 b_1, b_2 的 Q 值, ε 为 b^* 的质心系中 b_1, b_2 粒子的相对动能. E_{XR} 定义为反应产物的激发能, 它可由下列公式求出

$$E_{XR} = |Q - Q_{zz}|, \quad (4)$$

这里 Q_{zz} 是基态 Q 值. Q 值可由实验测量的量通过下式求出

$$Q = \frac{1}{m_3} [E_1^2(m_1 + m_3) + E_2^2(m_2 + m_3) - 2(m_p m_1 E_p^1 E_1^1)^{\frac{1}{2}} \cos \theta_{11}^1 - 2(m_p m_2 E_p^1 E_2^1)^{\frac{1}{2}} \cos \theta_{12}^1 + 2(m_1 m_2 E_1^1 E_2^1)^{\frac{1}{2}} \cos \theta_{12}^1]$$

$$- E_p^l \left(1 - \frac{m_p}{m_3} \right)$$

其中 $\cos\theta_{12}^l = \cos\theta_1^l + \cos\theta_2^l + \sin\theta_1^l \sin\theta_2^l \cos(\varphi_1^l - \varphi_2^l)$, 角标 l 代表实验室系. m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_p 分别为 b_1 粒子、 b_2 粒子、靶核和入射弹核的质量; θ_1^l 、 θ_2^l 为实验室系 b_1 、 b_2 粒子的出射角; E_1^l 和 E_2^l 分别是 b_1 、 b_2 粒子的实验室系能量; E_p^l 为入射弹核的能量. 利用公式(3)和(4)可把所得的 $E_x - E_c$ 两维能量关联图转到 $E_x(^{16}\text{O}) - E_{XR}$ 平面内, 转换后的关联图也列在图3中. 由图不难看出, 大多数符合事件集中于 $E_c \sim 40\text{MeV}$ 、 $E_a \sim 20\text{MeV}$ 附近, 它们对应于类弹产物的相继发射, 这个结论在 $E_x(^{16}\text{O}) - E_{XR}$ 的两维图上更加明确. 在这种图上, 大部分事件集中在 $E_x(^{16}\text{O}) \sim 10\text{MeV}$ 的区域, 而这个能量值与将复合核的激发能按类弹、类靶的核子数平均分配所计算的类弹(^{16}O 碎片)的激发能接近. 除了类弹相继发射的事件外, 还有一些事件集中在 $E_{XR} = 0$ 的线上. 如前所述, E_{XR} 坐标代表的是反应产物(包括靶、 ^{12}C 和 α 粒子)的激发能, $E_{XR} = 0$ 表示着反应产物都处于基态, 因此, 处于 $E_{XR} = 0$ 线上的事件来源于下列反应



即属于弹核的破裂 (break-up) 过程.

下面让我们对所得的 α 粒子符合速度谱做进一步分析. 仔细比较 $+32^\circ$ 和 -105° 两个角度速度谱发现: $+32^\circ$ 角的符合速度谱的低能峰位与 -105° α 粒子速度谱的峰位接近一致, 而 $+32^\circ$ 谱低能峰的高度明显低于 -105° 谱的峰高度. 从反应运动学考虑, 这两个角度近似对称于类靶出射方向, 如果假设在与类靶相对静止的坐标系中 α 粒子发射是各向同性的, 那么根据运动学转换, 在实验室系中这两个角度类靶发射 α 粒子应该具有对称性, 即它们有相同的最可几速度和截面值. 鉴于前面的分析, 我们认为 $+32^\circ$ 速度谱中的高能峰和低能峰对应于类弹和类靶的相继发射, 而低能峰的高度低于 -105° 速度谱高度的现象被认为是由“阴影效应”而引起的^[4].

“阴影效应”是由核的末态间的相互作用造成的. 由于深部非弹性散射产生的类弹、类靶碎片处于较高的激发能, 它们通过轻粒子发射过程退激, 其寿命大约为 10^{-20} 秒. 在这个时间内, 两个出射碎片仍处于核的库仑和核场作用范围, 那么由一个碎片发射的 α 粒子必然要受到另一碎片核场和库仑场的作用. 在类弹产物附近, 类靶发射的 α 粒子要么进入类弹的核场被吸收, 要么受到库仑场的作用而偏离原来的轨道, 这就造成了类弹附近类靶发射 α 粒子产额的减少. 目前, 我们正在考虑基于上面提到的有关阴影效应的物理图象对所得实验数据进行 Monte-Carlo 模拟计算, 力求证明阴影效应现象的存在.

小 结

在我们进行的 $97\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{51}\text{V}$ 反应中 α 粒子与类弹产物的关联测量中, 得到的与类弹产物符合的 α 粒子速度谱显示了类弹、类靶相继发射的特征, 通过分析证明了这种发射机制的存在; 由三体运动学对 $^{12}\text{C}-\alpha$ 关联的两维能量关联结果进行分析, 确认了弹核破裂 (break-up) 机制的存在. 实验结果还揭示了在该反应系统可能存在着阴影效应, 由于我们仅有 $+32^\circ$ 比较完整的速度谱, 要完全肯定阴影效应的存在, 还需要进一步的实验

来分析。

感谢中国科学院基金委对该研究工作的资助,感谢本所加速器室及电子学组为该实验提供了良好的实验条件。

参 考 文 献

- [1] J. P. Wurm, Symposium on Macroscopic Features of Heavy Ion Collision and the Pre-equilibrium Process, September 1—2, 1977, Hakone, Japan.
- [2] J. P. Wurm, MPI H-1980-V18.
- [3] Fan Guoying et al., *Z. Phys.*, **A310**, (1983), 269.
- [4] 范国英等,原子核物理,**8**(1986),102.
- [5] 王高等,高能物理与核物理,**14**(1990),253.
- [6] R. K. Bhowmik et al., *Nucl. Phys.*, **A390**(1982), 117—160.

THE CORRELATION BETWEEN ALPHA PARTICLES AND PROJECTILE-LIKE FRAGMENTS IN 97MeV $^{16}\text{O} + ^{51}\text{V}$ REACTION

WANG QI WANG GAOSHENG ZHU YONGTAI LI SONGLIN WANG XIAOMING WU ZHONGLI
HU XIAOQING YIN XU XU HUSHAN FAN GUOYING FENG ENPU SONG SHIZHAN
YIN SHUZHONG ZHANG ZHEN

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

Energy and angular correlation of α particles in coincidence with projectile-like fragments are measured. The coincident spectra of α particle indicate the sequential decay pattern of the projectile-like fragments and the target-like fragments. The energy correlation between projectile-like fragment ^{12}C and α particles gives a strong evidence of projectile break-up. Near the direction of detected PLFS, the shadow effect is observed.