

15.

^{16}O 轰击 ^{27}Al α 粒子发射的研究

詹文龙 沈文庆 诸永泰 乔卫民
尹淑芝 范国英 靳根明 李松林

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

用 ΔE - E 半导体望远镜测量了 84.5 MeV 及 62.0 MeV ^{16}O 轰击 ^{27}Al 产生的 α 粒子, 得到了 α 粒子的发射能谱、角分布、 E - θ 平面上 $\frac{d^2\sigma}{dE \cdot d\Omega}$ 等高图及核温度随发射角的变化。对产生 α 粒子的直接机制作了讨论。

重离子轰击各种靶核时, 通常除了复合核蒸发 α 粒子外, 还有各种直接机制产生的 α 粒子^[1-3]。从复合核蒸发的 α 粒子能谱和角分布, 可导出复合核的核温度及能级密度参数等。对产生 α 粒子的直接机制有各种不同的解释, 例如准弹性转移、深部非弹、裂开熔合、非全熔合、热斑发射和预平衡发射等。在重离子反应中可能存在几种机制, 而且随着炮弹、靶核和轰击能的变化可能发生几种机制的竞争。搞清这些问题对于搞清重离子核反应机制是很有意义的。中国科学院近代物理研究所曾用 4 MeV/A—6 MeV/A 的 ^{12}C 作炮弹轰击从轻到重的各种靶核, 研究了发射 α 粒子的特征。我们选用 3.9 MeV/A 及 5.3 MeV/A 的 ^{16}O 作炮弹轰击 ^{27}Al 靶, 测量了发射 α 粒子的能谱和角分布。 ^{16}O 的 4α 结构可能使发射 α 粒子的直接机制更为复杂。由于靶核较轻, 角动量对蒸发 α 粒子有较大的影响。本文中我们将对产生 α 粒子的直接机制及其随轰击能的变化规律进行一些探讨。

实验是在近物所 1.5 米回旋加速器上进行的。从加速器引出的氧离子束经过隔油 Ni 窗、光栏系统, 在靶上得到直径为 3—4 毫米, 流强约为 50 nA 的束流。靶子为 0.42 mg/cm² 厚的无衬 ^{27}Al 靶。用 ΔE - E 半导体望远镜测量 α 粒子, 用电子学线路实现粒子鉴别, 测量了 84.5 MeV 及 62.0 MeV (铝箔降能) $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 发射 α 粒子的能谱和角分布。从实验室坐标 5° 开始, 以 5° 为间隔测到 165° 。在小角度处, 望远镜前加了厚度为 17.5 mg/cm² 的铝箔以阻挡弹散的 ^{16}O 粒子。实验数据在 TRS-80 微处理机上处理, 对半靶厚、 ΔE 探测器和小角度时铝箔进行能损修正。假定反应是二体过程, 进行实验室系与质心系的坐标转换, 再通过插值程序得到给定质心系角度的质心系能谱。数据用检验器计数作了相对归一, 用法拉第筒测到的束流电荷量作了绝对归一。角分布测量中的统计误差为 6%, 包括了束流及靶厚绝对归一误差后的截面值的误差为 15%。 ΔE 探测器厚度为 9 μm , 用 Thc-c' α 源测得的能量分辨为 12%。 ΔE , E 探测器的有限分辨和 ΔE 探测器中的能损修

正及电子学等造成的总的能量测量误差为 $\pm 500\text{keV}$ 。由于 ΔE 探测器对低能 α 粒子的阻止, 能谱在低能端被截断。84.5MeV 轰击能时从实验室系 125° 起, 62.0MeV 轰击能时从实验室系 135° 开始, 能谱峰位以下部份被截断。在求角分布时需对能谱进行积分, 因此对能谱形状进行了外推, 外推部份截面约占总截面的 8%。

在图 1 中显示了质心系 $E-\theta$ 平面上 α 粒子的 $\frac{d^2\sigma}{dE \cdot d\Omega}$ 等高图, 其中 E 为包括了反冲核动能的发射 α 粒子的总动能。轰击能为 84.5MeV 时, 总动能峰位从小角度处的 10.5MeV, 随角度增大而下降到 8.5MeV 的平衡值; 轰击能为 62.0MeV 时, 则从 9.5MeV 下降到 8.5MeV。总动能峰位的平衡值与用 $r_0 = 1.4\text{fm}$ 计算的库仑能相近。图中也可以看出大角度处的产额比 90° 处高, 在高轰击能时更为显著, 这是角动量对蒸发 α 粒子的效应造成的。

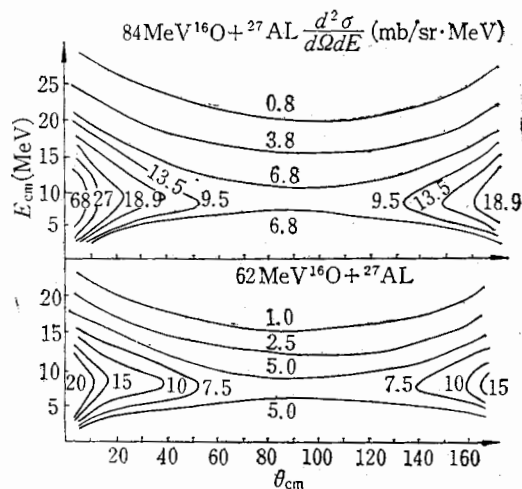


图 1 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 发射 α 粒子在 $E-\theta$ 平面上

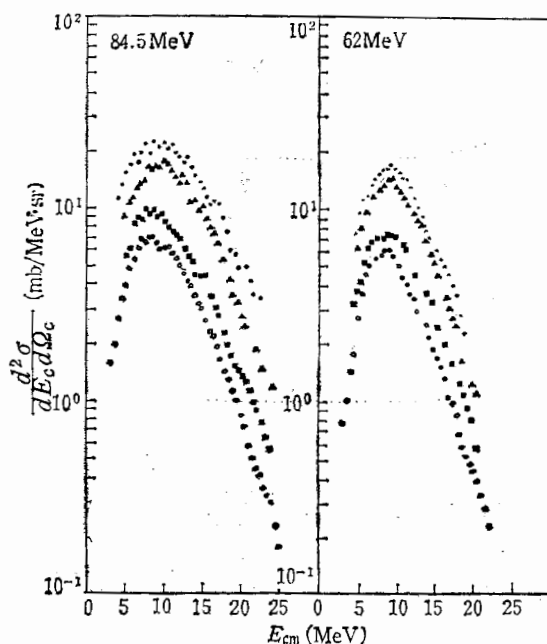
$$\frac{d^2\sigma}{dE \cdot d\Omega} \text{ 等高图}$$

产额分布也不是 90° 对称的, 而是小角度处高。高轰击能时这种增强更显著。这在角分布 (图 3) 上可看得更清楚, 这是直接机制发射的 α 粒子造成的。如果我们仔细分析几个典型的质心系角度的能谱 (图 2) 就会发现, 在 84.5MeV 轰击能时, 小角度的能谱有高能尾巴的迹象, 它随角度增加和随轰击能降低而减小。角分布和能谱的特性表明, 测到的 α 粒子大部分来自复合核蒸发, 在小角度区有直接机制发射的 α 粒子贡献。复合核蒸发 α 粒子角分布 90° 对称, 由于角动量效应显示出有较强的各向异性, 在高轰击能时各向异性更大, 已接近 $1/\sin\theta$ 。为了区分蒸发 α 粒子和直接机制发射的 α 粒子, 利用蒸发 α 粒子角分布

90° 对称的特性, 并认为 $\theta_{\text{cm}} > 90^\circ$ 时测得的 α 粒子主要是复合核蒸发的 α 粒子。从总的角分布曲线上减去复合核蒸发的 α 粒子成份, 得到了直接机制发射 α 粒子角分布 (图 3)。对角分布积分并外推到 0° 和 180° 得出 84.5MeV 时蒸发 α 粒子截面为 1460mb, 直接机制发射的 α 粒子截面为 140mb; 62.0MeV 时分别为 980mb 和 67.6mb。

减掉复合核蒸发 α 粒子后的直接机制发射的 α 粒子角分布在轰击能为 62.0MeV 时似乎还有二个组份, 一个是角分布前峰的组份, 一个是角分布在擦边角附近或峰的组份, 说明低轰击能时还可能有不同的直接机制发射的 α 粒子。例如前者是热斑发射、预平衡发射或 ^{16}O 碎裂, 后者是准弹转移。也说明随轰击能下降, 预平衡发射 (或热斑发射、 ^{16}O 碎裂) 的 α 粒子减少, 准弹转移产生的 α 粒子在增加。扣除复合核蒸发 α 粒子后的直接机制发射的 α 粒子角分布误差太大, 不可能再定量地对这些机制进行进一步的区分。同时仅有角分布这一论据, 显然是不够的, 还要由更复杂的实验来验证。

假定能谱形状为 $E_\alpha \exp[-E_\alpha/T]$, 拟合不同质心角度的能谱, 导出了核温度 T 随角

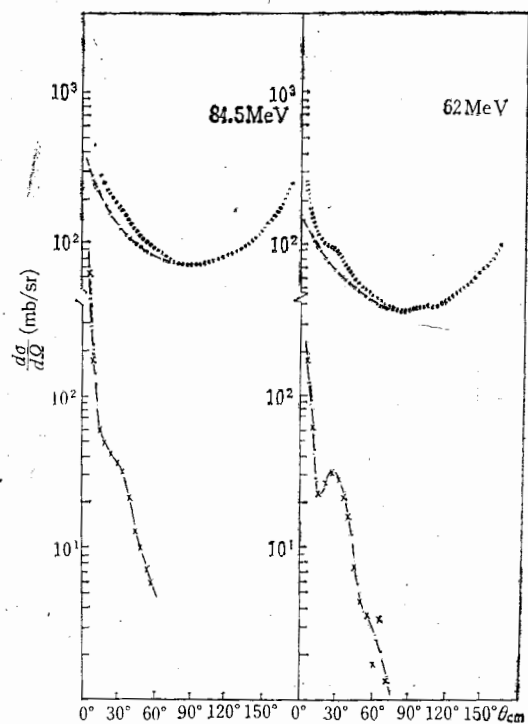
图 2 在几个角度上 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 发射 α 粒子的质心系能谱

●— $\theta = 15^\circ$ △— $\theta = 25^\circ$ □— $\theta = 50^\circ$ ○— $\theta = 90^\circ$

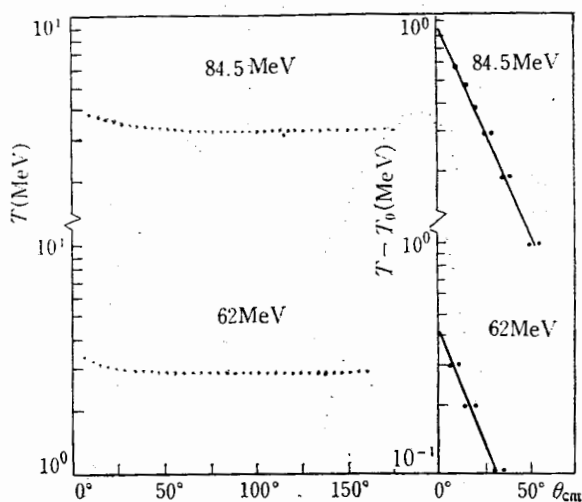
度的变化,结果表明小角度处 T 较大,然后随角度的增加逐渐下降到平衡值 T_0 ,显示出热斑发射的特征^[4]. 84.5 MeV 轰击能时核温度平衡值 T_0 为 3.1 MeV,对 62.0 MeV 为 2.8 MeV,提取核温度的误差为 ± 0.2 MeV. 假如认为平衡温度是复合核的核温度,根据

$$T = \frac{11}{12} \sqrt{\frac{E^*}{a}}$$

[其中 E^* 是复合核的激发能, a 是能级密度参数], 取 $a = A/8$ [A 是复合核质量数], 可以在误差范围内同时拟合 84.5 MeV 及 62.0 MeV 轰击能时的平衡核温度. 图 4 中显示了核温度 T 及 $T - T_0$ 随角度的变化. 由此导出对于 84.5 MeV 和 62.0 MeV 轰击能 $T - T_0$ 的衰变角度分别为 25° 和 21° . 根据粘住刚体转动惯量及擦边角动量计算, 这些角度对应的相互作用时间约为 2.2×10^{-22} 秒,比文献[4]中给出的 2.0×10^{-22}

图 3 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 发射 α 粒子对全能谱积分的质心系角分布

.....实验结果, ---蒸发 α 粒子,
-.-.-直接机制 α 粒子.

图 4 核温度随发射 α 粒子质心系角度的变化

秒少一个量级。

文献[1]中给出了以 $V/c = \left[\frac{2(E_{cm} - V_c)}{\mu c} \right]^{1/2}$ 为能量标度的直接机制的 α 粒子发射

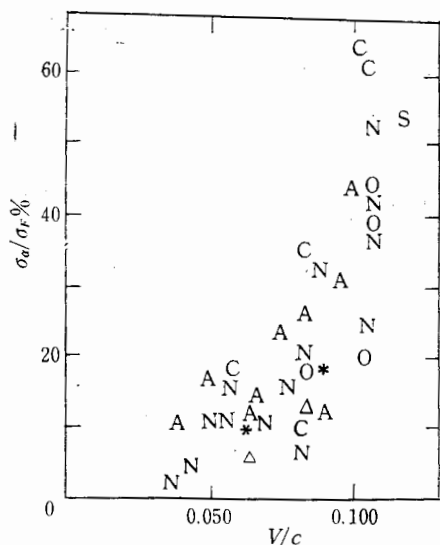


图 5 作为 V/c 函数的直接 α 截面的比较, 不同字母代表不同炮弹: C—— ^{12}C ; N—— ^{14}N ; O—— ^{16}O ; S—— ^{32}S ; A—— ^{40}Ar ; *—— ^{16}O , ^{19}F , ^{20}Ne 轰击 ^{124}Sn ; Δ 是本职工作结果。

截面 σ_α 与全熔合截面 σ_F 之比 σ_α/σ_F 的汇总图 (图 5)。计算 V/c 的公式中 E_{cm} 是质心系轰击能量, μ 是折合质量, V_c 是以

$$R = 1.36(A_p^{1/3} + A_T^{1/3}) + 0.5$$

计算的人射道库仑能。他们得出结论: 直接机制发射 α 粒子的产生阈是 $V/c > 0.035$, 上述汇总结果主要是对中重和重靶的结果。对于我们的很轻的 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 系统, 对 84.5 MeV 和 62.0 MeV 轰击能, V/c 分别为 0.085 和 0.065, 都超过了文献 [1] 给出的直接机制 α 粒子的产生阈。用文献 [6] 给出的全熔合截面的实验值, 导出 σ_α/σ_F 的值分别为 12.8% 和 5.9%, 符合上述系统性。在图 5 中用 Δ 标出了我们的结果。

综合所述, 3.9 MeV/A 和 5.3 MeV/A ^{16}O 轰击 ^{27}Al 发射的 α 粒子, 主要是复合核蒸发 α 粒子的贡献。由于角动量效应, 蒸发 α 粒子有强烈的各向异性, 且随轰击能增加而增强。角分

布扣除复合核蒸发 α 粒子后有前峰, 低轰击能量时在擦边角附近还有突起, 它们来自直接机制的发射。直接机制发射 α 粒子的截面符合中重及重靶上直接机制发射 α 粒子的系统

性. 它们可能来自不同的机制, 还需要进行更深入的实验和理论研究.

参 考 文 献

- [1] C. Gerschel, *Nucl. Phys.*, **A387**(1982), 297c.
- [2] Z. Sujkowski, XX International Winter Meeting on Nuclear Physics, Bormio, Italy, (1982), 737.
- [3] B. B. Волков, Изв АН СССР Сер. Физ., **T45** №10(1981), 1810.
- [4] T. Nomura et al., 私人通讯.
- [5] H. Ho et al., *Z. Phys.*, **A283**(1977), 235.
- [6] B. B. Back, *Nucl. Phys.*, **A285**(1977), 317.

THE STUDY OF α -EMISSION INDUCED BY ^{16}O ON ^{27}Al

ZHAN WEN-LONG SHEN WEN-QING ZHU YONG-TAI QIAO WEI-MIN YIN SHU-ZHI

FAN GUO-YING JIN GEN-MING LI SONG-LING

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

The α -particles induced by 84.5 MeV and 62 MeV ^{16}O on ^{27}Al are measured using ΔE - E semiconductor telescope. The energy spectra, the angular distributions, the contour plot of $d^2\sigma/d\Omega dE$ in the E - θ plane of the emitted α particles and the variation of the nuclear temperature with the emission angles are obtained. The mechanism of the direct α particles is discussed.

发射

角图

轰击

机制

述

我

和

5,

产

生,

符

结

轰

击

粒

子

发

射