

294MeV²⁰Ne + ¹⁵⁹Tb 反应中出射 α 粒子的研究

谢元祥 胡晓庆

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

B. KOTLINSKI H. W. WILSCHUT P. C. N. CROUZEN H. KAPER

E. E. KOLDENHOF H. K. W. LEEGTE R. H. SIEMSEN

(K. V. I., 9747AA, Groningen, the Netherlands)

摘 要

在 294MeV Ne 束轰击 Tb 靶的反应中,用 ΔE -E 望远镜测量了 10° — 150° 发射的 α 粒子能谱,并用运动源模型拟合了所得的实验能谱,得到与前角度源、中等速度源、熔合蒸发源的有关参数. 计算谱很好地复现了实验能谱的形状、峰位及数值,角分布也得到极好的模拟. 实验所得的发射 α 粒子截面为 3300mb, 运动源模型计算值为 3700mb.

一、引 言

在重离子引起的反应中,测量出射轻粒子的问题是令人特别感兴趣的. 在这方面实验和理论都做了大量的工作,这是因为轻粒子截面比其他产物的截面大得多,测量值较精确,而更重要的是通过对这些发射粒子的研究,可以得到有关反应机制方面的信息.

在入射能量较低时(库仑位垒以上, $E/A \leq 5\text{MeV/u}$),这些轻粒子来源于复合核的热发射. 当入射能量升高时,非平衡发射的粒子出现了,这一点通常用热斑模型、激子模型来解释. 而当入射能量进一步升高时 ($E/A \geq 10\text{MeV}$),炮弹在通过靶核的瞬间裂开了,炮弹的大部分质量被靶核吸收,形成了非完全熔合;余下的激发的类炮弹又可以相继发射轻粒子,使情况变得更加复杂. 炮弹的能量达到中能区 ($E/A \geq 20\text{MeV}$) 时,一些实验观测到的某些轻粒子来源于具有中等速度(介于炮弹速度和复合系统速度中间)的热源.

为了从理论上解释这些现象, T. C. Awes 等人^[1]曾用运动源模型拟合了 ¹⁶O 轰击 ²⁷Al, ⁹⁰Zr, ¹⁹⁷Au 所发射的 p, d, t, α 能谱,质子谱拟合较好, α 谱在很前角度和很后角度拟合差一些. Louis C. Vaz 等人^[2]测量了 215MeV¹⁶O 轰击 Tb, Pb, U 所发射的 α 粒子,在速度平面可以清楚看到有两个源,速度较高的一个(相当于炮弹速度的 59%)对应于前角

度($\leq 37^\circ$)发射的 α 粒子,速度较低的一个相应于类靶蒸发的 α 粒子,因而对反应机制有了更进一步的认识. 炮弹能量升至中能时($E/A = 40, 50 \text{ MeV}$), D. Fox 用三源模型拟合了出射的轻粒子^[3],由于探测器阈值高,大角度实验能谱峰值未能给出,这部分的拟合就带有任意性.

本文报告了 $294 \text{ MeV } ^{20}\text{Ne} + ^{159}\text{Tb}$ 反应中产生的 α 粒子,测量了 $10^\circ - 150^\circ$ 的各个角度能谱,并用运动源模型拟合了所得的结果,无论是能谱形状,或是大小,都得到满意结果,同时给出有关的参数. 结果证明在较低的能区 (15 MeV/u),中等速度源也是存在的.

二、实 验

实验是在荷兰 KVI 完成的,来自于 AVF 回旋加速器的 294 MeV 氖束轰击了靶子. 自支撑碾压制备的 Tb 靶厚度为 3.9 mg/cm^2 . 为了防止轻元素的沾污,靶子在惰性气体中制作和传输到靶室. 探测器为两套金硅面垒型 ΔE -E 望远镜,前角为 $10^\circ - 80^\circ$, ΔE 探测器厚 $40 \mu\text{m}$, E 探测器厚 5 mm . 光栏的尺寸是 $\phi 8$,与靶距离 13.5 cm ;后角为 $80^\circ - 150^\circ$,在束的另一边, ΔE 探测器厚 $19.5 \mu\text{m}$, E 探测器厚为 2 mm ,光栏尺寸为 $\phi 7$,距靶 7.5 cm . 两

套探测器分别装在不同的活动臂上,在 $10^\circ - 150^\circ$ 角度范围内测量了 12 个数据点;电流积分器测量了束流强度,精密脉冲产生器 (ORTEC 448) 测量了电子学系统的线性,用弹性散射的峰值刻度了能量. 事件被逐一记录在磁带中,离线用 VAX 8300 处理了数据,截面误差估计小于 20%.

三、实验结果和分析

图 1 中的直方图给出了 $10^\circ - 150^\circ$ 角度范围内实验室系单举 α 粒子能谱. 这些能谱的形状及其随角度的变化是类似于轰击能量为 290 MeV 时 $^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$ 的数据^[4]. 在大角度 ($> 90^\circ$) 时,能谱具有一个指数下降的高能尾巴,其斜率不随角度变化. 能谱的峰值变化不大,峰值接近于出射道的 α 粒子与余核的库仑能. 这部分 α 粒子来源于完全或非完全熔合机制,属于复合核蒸发. 前角度的 α 能谱成分比较复杂

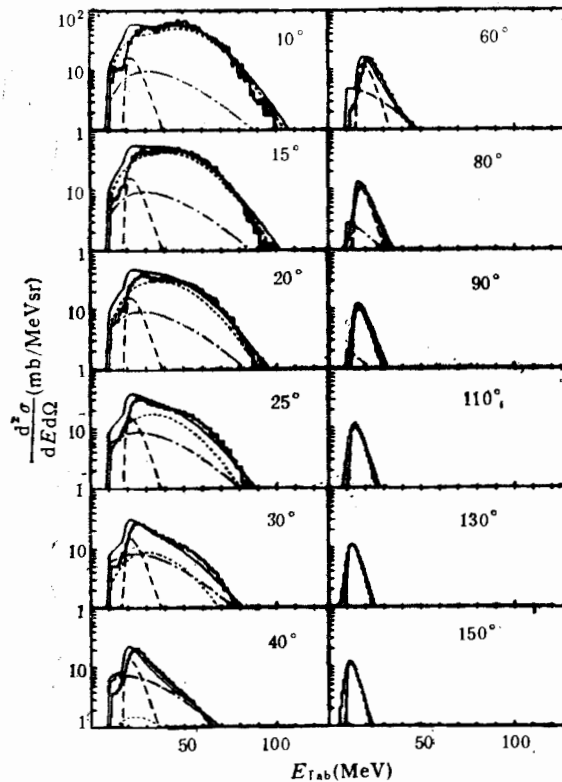


图 1 $294 \text{ MeV Ne} + \text{Tb}$ 出射 α 粒子的能谱
直方图为实验室系能谱,——三源相加的能谱
..... 快源 ———— 中等速度源 --- 慢源

杂,粗看起来,起码有两种成分。除了复合核蒸发成分外,快 α 粒子占了主要成分,其峰值小于炮弹的速度,大于复合核蒸发 α 粒子的速度。这部分 α 粒子来源于多种途径,可能是炮弹裂开的 α 粒子及前平衡发射、类炮弹的相继发射等。仅仅依靠单举 α 粒子数据,难以区分出这些成分所占的比例。文献[5]已通过 K_X -ray 与 α 粒子符合实验对 α 粒子来源进行了分析。

为了更加直观地观测这些 α 粒子的能谱随观测角度的变化,在速度平面画出罗仑兹协变截面。我们知道当双微分截面 $d^2\sigma/dEd\Omega$ 由实验室系转换到质心系时,需要乘一个与实验角和质心角有关的因子,经过简单的变换,得到如下关系:

$$\frac{d^2\sigma_{lab}}{p_{lab}dE_{lab}d\Omega_{lab}} = \frac{d^2\sigma_{CM}}{p_{CM}dE_{CM}d\Omega_{CM}}, \quad (1)$$

角标 lab 为实验室系, CM 为质心系, p 代表动量。上式这个量是与坐标系的选择无关的,称为罗仑兹协变截面。如果 v_{\parallel} 代表平行于炮弹速度的粒子速度分量, v_{\perp} 代表垂直于炮弹速度的粒子速度分量,那么就可以在速度平面上画出不同测量角度的罗仑兹协变截面,并把相等值联成曲线。从这个图可以定性浏览一下数据的整个趋势,并且可以很容易地决定是否存在这样的静止系,在这个静止系中粒子发射是各向同性的。如果存在着这个系,这些等高图将是一些同心圆。图 2 给出了 $294\text{MeV}^{20}\text{Ne} + ^{159}\text{Tb}$ 发射 α 粒子的罗仑兹协变截面的等高图。从图 2 可以看到起码有两个静止系,在后角度这些等值的圆曲线的圆心集中在接近于复合核运动的速度 (0.6cm/ns),粒子是在非完全熔合系统蒸发出来的,在前角度也有一些同心圆,圆心的速度比炮弹的速度 (5.3cm/ns) 要小,在中间有两个源的叠加区。

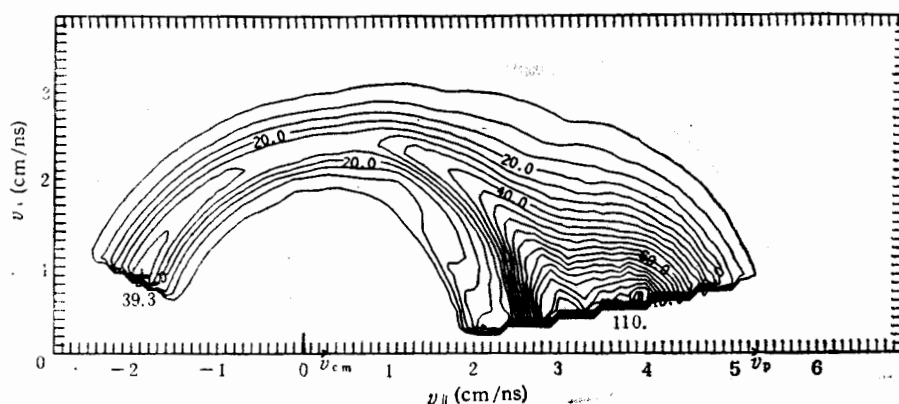


图 2 $294\text{MeV Ne} + \text{Tb}$ 出射 α 粒子在速度平面上的罗仑兹协变截面
 $[d^2\sigma/PCdEd\Omega(\mu\text{b}/\text{MeV}^2\text{Sr})]$ 等高图

下面用运动源模型来拟合所得能谱,对于前角度源,假定在源的静止系内, α 粒子是各向同性发射的,能谱具有麦克斯韦分布的形式:

$$\frac{d^2\sigma}{dEd\Omega} \propto Ee^{-E/T}. \quad (2)$$

转换到实验室系,并对 α 粒子受到余核的库仑排斥做修正:

$$\frac{d^2\sigma_{lab}}{dE_{lab}d\Omega_{lab}} \propto E_{lab}^{1/2} E_1^{1/2} e^{-E/T}, \quad (3)$$

$$E = E_{lab} - ZE_C + E_1 - 2(E_{lab} - ZE_C)^{1/2} E_1^{1/2} \cos\theta_{lab}, \quad (4)$$

其中 E_{lab} 和 θ_{lab} 为 α 粒子在实验室系的能量及出射角度, E_C 为单位电荷的库仑能, Z 为 α 粒子的电荷数, $E_1 = mv^2/2$ 为 α 粒子在源系内处于静止时在实验室的动能。 v 为源速度。

在分析慢源能谱时,仍采用与上面相同的公式,但考虑到在源系蒸发的 α 粒子并非各向同性,角分布为对 90° 对称的形状,具有形式为

$$W(\theta) = 1 + B\cos^2\theta, \quad (5)$$

B 为各向异性因子, θ 为出射角度。

采用上面两个源拟合,前角度、后角度能谱拟合较好,但 30° 以后的中角度能谱符合不好,因此添加了中等速度运动源,其速度介于上述两个源的中值,同时还要考虑到各个源贡献比份不同。调整参数,使三源拟合得到极好的结果,无论是形状还是数值,计算谱始终能重现实验的 α 能谱。结果见图1。表1给出了从三源计算所用的参数: N_f 为不同源的归一化常数, T 为提取的表观温度, v 为运动源的速度, ZE_C 为 α 粒子受到蒸发余核排斥的库仑能。

表 1

运动源	N_f	$T(\text{MeV})$	$v(\text{cm/ns})$	$ZE_C(\text{MeV})$	B
快源	9.5	3.2	4.2	0	0
慢源	9.0	3.3	0.48	14	0.3
中等源	1.4	9.0	2.2	0	0

对于后角度源(慢源);速度为 0.48cm/ns ,相当于全熔合速度(0.6cm/ns)的 79% 。利用动量守恒,可以计算究竟有多少质量的炮弹未参与熔合。假定炮弹中的一部分核子与靶熔合,剩余的核子接近于 0° 方向发射且具有束速度,按照动量守恒

$$(m_t + m_p - m)v_t = (m_p - m)v_p, \quad (6)$$

m_t :靶子质量, m_p :炮弹质量, m :炮弹中未参与熔合的质量, v_t :慢源的速度, v_p :炮弹速度。

计算值 m 略大于4,相当于炮弹接近靶核时, α 粒子从炮弹跑出来,炮弹的其余部分与靶子发生了熔合。根据这一图象,可以计算出非完全熔合的激发能 E^* (约 191MeV)。从能谱分析中得到 $T = 3.3\text{MeV}$,利用公式 $T^2 = E^*/a$,算出 $a \sim A/10$,这与通常采用的能级密度参数 $a \sim A/8 - A/12$ 符合。表中所给出 α 粒子与余核排斥的库仑能 14MeV 比计算的值($r_0 = 1.4\text{fm}$) 19MeV 略小。

前角度源(快源)速度相当于炮弹速度的 77% ,温度与慢源近似。中等速度源的特点:速度是等于慢源、快源速度的一半,温度(14MeV)比慢源与快源温度均高。文献[3]给出 $40\text{MeV/u C} + \text{Ag}$, $\text{C} + \text{Au}$ 的表观温度分别为 15.96MeV 和 18.40MeV ,考虑到 Ne 束能量较低,我们得到温度低于上述值是合理的。

中等速度源的引进,使得运动源模型很好地拟合了实验数据。但是对中等速度源的

了解却是不够的,尽管知道中等速度源所发射的粒子是在中等角度 ($>30^\circ$) 起主要作用,但由于快慢源的干扰,在实验上无法了解它独有的特点。我们知道在轰击能量较低时,中等速度源是不存在的,所以如果采用同一系统,只改变炮弹的轰击能来测量发射 α 粒子的能谱,并用运动源模型拟合,提取中等速度源的参数,了解这些参数随轰击能的变化,可以有利于对中等速度源的进一步认识。

对实验能谱积分得到 294MeV $\text{Ne} + \text{Tb}$ 发射 α 粒子的实验角分布,如图 3 所示。角分布在前角度下降很快,呈指数形式下降,这是与前角度运动源相关联,后角度角分布较平坦,是与融合蒸发 α 粒子的角分布有关的。对于三种运动源计算的能谱进行积分,得到三个源的角分布,在实验室系,快源主要在前角度起作用 ($<50^\circ$),

截面下降非常陡;中等速度源截面低于快源,截面下降平缓,一直延续到 130° 。从图中还可以看到中等速度源在 $30^\circ - 70^\circ$ 范围内起的作用大。在后角度融合蒸发占主要成分,由于蒸发粒子在质心系各向异性,所以角分布在前角度略有提高。

把三种角分布积分,得到这三种源的 α 粒子发射截面分别为:快源 1209mb ,中等速度源 1141mb ,融合蒸发 1351mb 。发射 α 粒子总截面为 3700mb 。实验测量值为 3300mb ,在 12% 之内符合。

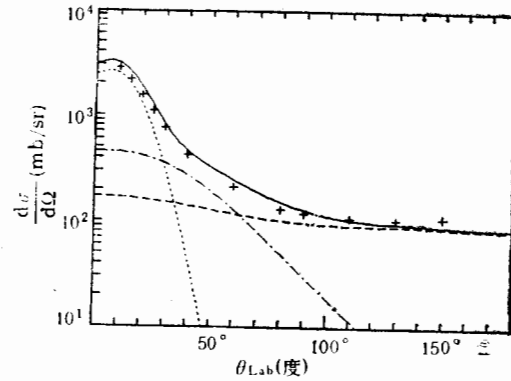


图 3 $294\text{MeV}\text{Ne} + \text{Tb}$ 出射 α 粒子的实验室角分布

+ 实验点 — 三源计算值 ··· 快源
- · - · - 中等速度源 - - - 慢源

参 考 文 献

- [1] T. C. Awes, et al., *Phys. Rev.*, **C25**(1982), 2361.
- [2] Louis C. Vaz, et al., *Z. Phys.*, **315**(1984), 169.
- [3] D. Fox, et al., *Phys. Rev.*, **C36**(1987), 640.
- [4] CH. Egelhaaf, et al., *Nucl. Phys.*, **A405**(1983), 397.
- [5] B. Kotlinski, et al., *Nucl. Phys.*, **A526**(1991), 303.

**Investigation of the α particles in the Reaction of
294 MeV $^{20}\text{Ne} + ^{159}\text{Tb}$**

XIE YUANXIANG HU XIAOQING

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

B. KOTLINSKI H. W. WILSCHUT P. C. N. CROUZEN H. KAPER

E. E. KOLDENHOF H. K. W. LEEGTE R. H. SIEMSEN

(K. V. L., 9747AA, Groningen, the Netherlands)

ABSTRACT

294 MeV Ne Beam has bombarded Tb target. The energy spectra of emitted α particles have been measured at the angles of 10° — 150° using ΔE -E telescopes and analyzed by means of three moving source models. The parameters associated with fast source, intermediate source and fusion evaporation source have been obtained. The shape, the peak value and the magnitude of the experimental spectrum have been reproduced by theoretical calculations. Moreover, the angular distribution of α particle has been also fitted very well. The experimental cross section of emitted α particles is 3300 mb and the correspondent theoretical value by moving source model is 3700 mb.