

# $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$ , $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$ 熔合截面的测量

王素芳 蔡薇 郑继文

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

## 摘 要

我们测量了库仑位垒附近  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$ 、 $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  反应的熔合截面。实验中用 Si(Li) X 射线谱仪离线测量了蒸发余核的特征 K-X 射线能谱, 从而得到了蒸发余核的半寿命及其蒸发余核生成分支比。最后获得了熔合截面, 并与理论计算值进行了比较。

## 一、引 言

由理论预言可知, 在低能重离子反应中, 全熔合反应是一个很重要的反应道。因此许多核物理实验工作者都集中了自己的大部分精力致力于重离子引起的反应的全熔合截面的测量, 并对影响全熔合截面的各种因素进行了仔细的研究, 给复合核理论的发展提供了可靠的基础, 特别是当入射能量很高于入射道的库仑位垒时, 已有很多实验的数据支持了已有的全熔合理论<sup>[1,2]</sup>。但对于  $^{12}\text{C}$ 、 $^{14}\text{N}$ 、 $^{16}\text{O}$  等离子轰击中重靶核而言, 特别是入射能在库仑位垒附近, 其实验数据就显得比较缺乏, 其原因就是测量复合核的余核的方法有局限性。但是测量这个核区的全熔合截面, 特别是在库仑位垒附近的全熔合截面对研究核势的形状及靶核的中质比等因素对全熔合的影响都是很重要的。因此, 最近对亚库仑位垒附近的全熔合的研究成了一个较为流行的课题。而且相应的探测复合核的新方法也发展起来了, 例如 X 射线测量技术的应用<sup>[3]</sup>。我们的实验就是测量入射能在库仑位垒附近的碳离子轰击  $^{159}\text{Tb}$ 、 $^{165}\text{Ho}$  核的熔合截面。低能碳离子轰击中重核所产生的复合核的裂变几率很小, 特别是靶核的质量数在 150 以下时, 就可以完全忽略裂变反应。因此蒸发余核的截面基本上就等于全部的全熔合截面。所以测量这些反应的全熔合截面就要直接测量质量数大约为 150 的核。由于入射能量较低, 余核的反冲能量也就很小, 因此, 通常使用  $\Delta E-E$  加飞行时间测量余核的质量和电荷的办法以及固体径迹探测器的方法都有很大的困难, 所以我们采取用 Si(Li) X 射线谱仪作离线测量蒸发余核的特征 X 射线的方法测量了复合核反应的余核的截面。这种方法避免了在束情况下靶核库仑激发和杂质产物对截面的影响。

## 二、实 验

实验是在我所 1.5 米迴旋加速器上进行的,碳离子的最高能量为 72.7MeV,用铝箔逐步降低到了 57MeV.

实验所用的靶材料为单同位素  $^{159}\text{Tb}$  及  $^{165}\text{Ho}$  的氧化物. 从收集和探测蒸发余核的 K-X 射线这一要求出发,初步估算了靶的厚度和收集箔的厚度,以致于蒸发余核全部穿出靶子而被收集箔全吸收,而使得碳离子与一些轻元素的产物尽可能全部穿出收集箔.  $^{159}\text{Tb}$  是用真空蒸发制备的自支撑靶,  $^{165}\text{Ho}$  靶是用电沉积法制备的有衬靶,靶衬是  $524\mu\text{g}/\text{cm}^2$  厚的铝箔. 两种靶的厚度分别为  $450\mu\text{g}/\text{cm}^2$  和  $375\mu\text{g}/\text{cm}^2$ . 收集箔厚度约为  $600\mu\text{g}/\text{cm}^2$ .

为了提高实验效率和减少实验误差,在靶子前面 1mm 处装了一个  $\phi 6$  的光栏以限定有效束流的通量和收集样品的有效收集面积. 收集箔放在靶后约 2mm 处. 束流被收集箔后的法拉第筒接收了.

在实验前估算了反应中形成的复合核蒸发中子数,从而根据蒸发余核的半衰期对所

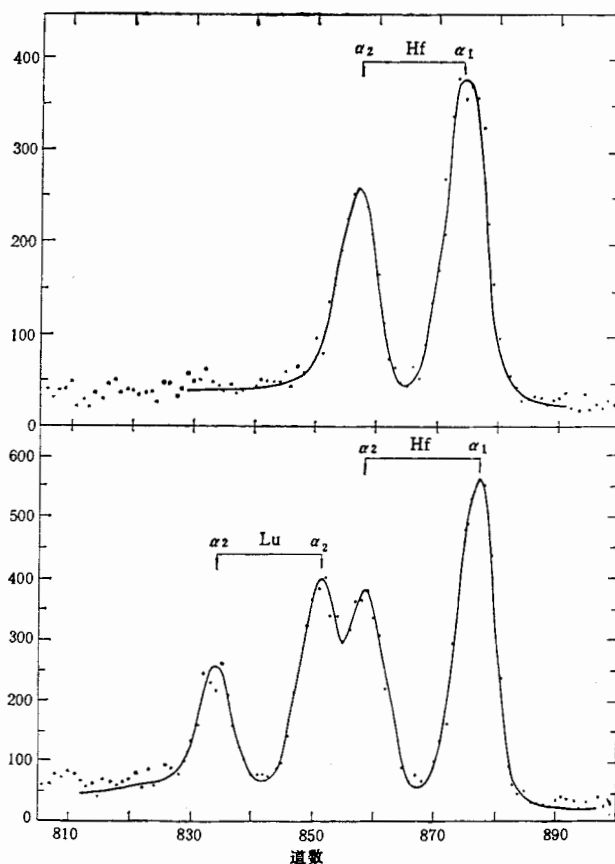


图 1 在能量为 71.5MeV 时,  $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  反应蒸发余核的 K-X 射线能谱. 上图为束流停照后 10 分钟时测得的能谱, 下图为在 378.3 分钟时测得的能谱.

需束流照射时间做了一个估计以确保活性测量的统计性。在束流能量从 72.7 MeV—57 MeV 变化的过程中,束流对 Tb 靶的照射时间从 10—40 分钟,对 Ho 靶的照射时间从 1—4 小时.束流强度作为对时间的函数用 BM96 记录了.束流停照后尽可能地打开靶室将收集样品移到 Si(Li) X 射线谱仪(在 2—5 分钟之中)进行测量,在 M-20 多道分析器上周期性地记录了蒸发余核衰变子核的 K-X 射线能谱.此处仅将  $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  的反应产物一个样品的能谱给在图 1 中.

实验中使用的 X 射线谱仪用已知强度的  $\text{Ba}^{133}$ 、 $\text{Am}^{241}$  源对谱仪的探测效率进行了校准.在 56 keV 附近其探测效率为  $3.4 \times 10^{-4}$ .

### 三、数据处理

图 1 给出了  $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  的同位素 Hf、Lu 的特征 K-X 射线的能谱.我们仅对子核的能谱进行了处理,即就是说对  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$  反应,仅处理了子核 Yb 的能谱,对  $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  反应,仅处理了子核 Hf 的能谱.最后得到了子核 Yb、Hf 在不同能量下的一系列衰变曲线.由于 K-X 射线是核的标识射线,仅与核素的原子序数  $Z$  有关,故所得衰变曲线是具有不同半衰期的蒸发余核同位素的共同贡献.对衰变曲线在半对数坐标中进行拟合分解,就可得到蒸发余核的半衰期及  $t_0$  时刻(即束流停止照射时刻)时应该探测到的衰变数  $N(0)$ .图 2 给出了衰变曲线及分解的一个例子.从已知的半衰期可以确定出蒸发余核是哪几种同位素.图中  $2n, 3n, \dots$  表示从复合核  $^{171}\text{Lu}$  发射的中子数.

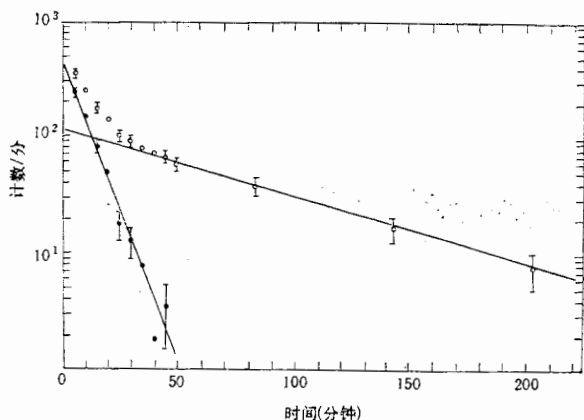


图 2 在束流能量为 59.4 MeV 时,  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$  反应的生成物 Lu 同位素的衰变曲线的分解.蒸发  $4n$  的余核的半衰期  $T_{1/2} = 52.80$  分钟,蒸发  $3n$  的余核的半衰期  $T_{1/2} = 5.97$  分钟.

在衰变曲线的分解中,不但可以得到各同位素的半寿命,同时可以求得同位素在  $t = 0$  时刻(即束流停止瞬时)应测量到的同位素的核数目  $N(0)$ .

核素的 K-X 射线有两个来源,即  $N(0) \sim f(\epsilon_k, \lambda_k)$ . 这里  $\epsilon_k$  为  $k$  层电子俘获几率,  $\lambda_k$  为  $k$  壳层的内转换几率.

由  $\beta$  衰变理论可以推得  $\epsilon_k^{[4]}$ . 由同位素表<sup>[5]</sup>的一些数据可以推得  $\lambda_k$ .

根据放射性衰变规律,可以得到  $t = 0$  时刻放射性核存在的数目:

$$N_0 = N(0)/\eta[1 - e^{-\lambda t}]$$

其中  $\eta = \gamma \cdot \omega_k \cdot (\epsilon_k + \lambda_k)$ ,  $\gamma$  为 X 射线谱仪的探测效率,  $\omega_k$  为发光效率.

$$\text{截面 } \sigma = N_0/N_A \cdot \phi_t$$

其中  $N_A$  为单位面积靶核数目,  $\phi_t$  为等效束流通量, 即考虑了照射期间束流随时间的变化对放射性生成物的影响.

于是由蒸发余核同位素的  $N_0$  可以求出相应的蒸发余核的生成截面  $\sigma(x, n)$ . 各蒸发余核的相对生成比例给在图 3 中.

在该反应中, 因为带电粒子的发射几率是小的, 所以可认为对各蒸发余核求和就得到  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$ 、 $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  的全熔合截面(图 4).

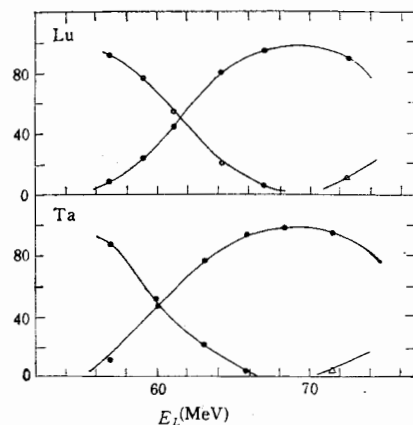


图 3  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$ 、 $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  的各蒸发余核同位素生成截面分支比.  $3n, 4n, 5n$  分别表示其复合核蒸发的中子数目

#### 四、结 果

本实验测量  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$  和  $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  的蒸发余核的 K-X 射线衰变能谱, 数据分析得到的产物半衰期值如下:

反 应	复 合 核	蒸 发 余 核	半 衰 期	文 献 所 给 值 <sup>[6]</sup>
$^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$	Lu <sup>171</sup>	Lu <sup>166</sup>	2.65 分	2.12, 1.4, 2.6 分
		Lu <sup>167</sup>	53 分	51.5 分
		Lu <sup>168</sup>	6 分	5.3 分, 6.7 分
$^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$	Ta <sup>177</sup>	Ta <sup>172</sup>	33 分	36.8 分
		Ta <sup>173</sup>	3.03 时	3.65 时
		Ta <sup>174</sup>	67 分	62.6 分

在位垒以上能区, 熔合截面可以用经典方程

$$\sigma_{CF} = \pi R^2 \left(1 - \frac{V_B}{E_{cm}}\right)$$

描写, 其中  $V_B$  为熔合位垒,  $R$  为熔合半径.  $\sigma_{CF}(E_{cm})$  与  $E_{cm}^{-1}$  呈线性关系, 见图 4. 这样由实验数据可以提取两个反应体系的位垒参数:

$$^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}: R = 10.74\text{fm}, r_B = 1.39\text{fm}$$

$$V_B = 48.31\text{MeV}$$

$$^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}: R = 11.31\text{fm}, r_B = 1.45\text{fm}$$

$$V_B = 50\text{MeV}$$

本实验结果与系统值<sup>[8]</sup>做了比较. 这两个体系的系统值为:

$$^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}: R = 10.91\text{fm}, r_B = 1.42\text{fm}$$

$$V_B = 47.67\text{MeV}.$$

$$^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}: R = 10.96\text{fm}, r_B = 1.41\text{fm}$$

在  
几

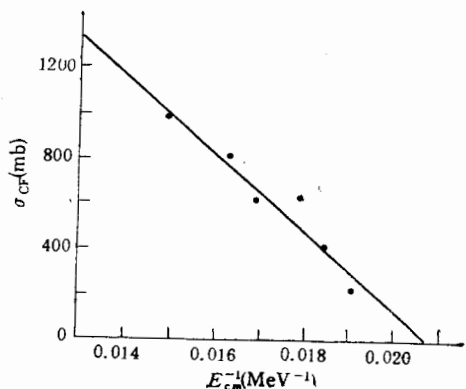


图4 反应  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$  的全熔合截面  $\sigma_{CF}$  与  $E_{cm}^{-1}$  的关系

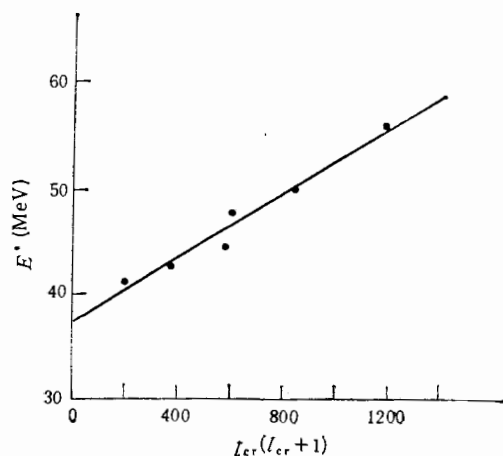


图5 反应  $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  的复合核激发能  $E^*$  与  $l_{cr}(l_{cr} + 1)$  的关系

$$V_B = 48.84 \text{ MeV.}$$

其理论值与核势的形式有关,对亲近势(见下文)

$$^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb} \quad R = 1.39 \text{ fm}, \quad V_B = 48.715 \text{ MeV}$$

$$^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho} \quad R = 1.39 \text{ fm}, \quad V_B = 49.88 \text{ MeV}$$

由熔合截面与其临界角动量的关系

$$\sigma_{CF} = \pi \lambda^2 (l_{cr} + 1)^2,$$

提取了临界角动量  $l_{cr}$ , 图5中给出了临界角动量  $l_{cr}$  与激发能  $E^*$  的关系。在位垒以上, 按锐截止模型,

$$\begin{aligned} \frac{l_{cr}(l_{cr} + 1)\hbar^2}{2\mu R^2} &= E_{cm} - V_B \\ &= E^* - V_B - Q. \end{aligned}$$

这样可以由  $l_{cr}(l_{cr} + 1)$  与  $E^*$  的关系提取出相对运动的惯性矩  $\mu R^2$ :

$$^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb} \quad \mu R^2 = 0.2296 \times 10^{-46} \text{ g} \cdot \text{cm}^2, \quad R = 11.13 \text{ fm}$$

$$^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho} \quad \mu R^2 = 0.2236 \times 10^{-46} \text{ g} \cdot \text{cm}^2, \quad R = 10.99 \text{ fm}$$

这样得到的  $R$  值与从  $\sigma_{CF} \sim E_{cm}^{-1}$  提取的  $R$  基本一致, 因为两者是根据相同的关系式得到的。

对这两个系统的实验全熔合截面与理论计算结果进行了比较。理论计算是根据经典方程进行的:

$$\sigma_{CF} = \pi R^2 \left( 1 - \frac{V}{E_{cm}} \right)$$

其中熔合位垒的高度  $V = V_N + V_C$ 。  $V_N$  是核势, 取以下两种形式的核势进行计算: 一种是亲近势, 另一种是均匀势<sup>[7]</sup>。

亲近势如下:

$$V_N = 4\pi r \bar{R} \cdot b \cdot \phi(\zeta_1),$$

一  
其  
b

φ

这  
算

深  
这  
对

此

r<sub>0</sub>

其中  $\gamma$  为表面能力系数,  $\gamma = (1 - KI^2)\text{fm}^{-2} \cdot \text{MeV}$ ,  $I = (N - Z)/A$ ,  $k = 1.7826$ ,  $b = 1\text{fm}$ ,  $\bar{R}$  为约化半径

$$\bar{R} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$$

$$C_i = R_i - b^2 / R_i$$

$$R_i = 1.28 A_i^{1/3} - 0.76 + 0.8 A_i^{-1/3} (\text{fm})$$

$\phi(\zeta)$  为亲近力,

$$\phi(\zeta) = \begin{cases} -\frac{1}{2} (\zeta - 2.45)^2 - 0.0852 (\zeta - 2.7885)^3 & \zeta < 1.2511 \\ -4.490 \exp(-\zeta/0.7755) & \zeta \geq 1.2511 \end{cases}$$

这里亲近力是根据许多数据的统计平均值得出的, 与原始的表达式中的系数不一样. 计算结果由图 6 中的实线表示.

通用势如下:

$$V_a = -D \left( F + \frac{S}{a} \right) \frac{R_{12}}{r} e^{-S/a}$$

$$\text{深度常数 } D = \frac{4a^3 g(R_1/a) g(R_2/a) e^{-R_{12}/a}}{r^2 R_{12}} C'_s$$

这里

$$g(x) = x \cosh(x) - \sinh(x),$$

$$R_i = r_0 A_i^{1/3} \quad R_{12} = R_1 + R_2$$

对两个分离核的情况,

$$C'_s = [C_s(1) \cdot C_s(2)]^{1/2}$$

$$C_s = a_s (1 - K_s I^2) \text{ 是有效表面能常数}$$

$$I = (N - Z)/A \quad \text{中子-质子剩余}$$

$$a_s = 21.7 \text{MeV} \quad \text{表面能常数}$$

$$K_s = 3 \quad \text{表面非对称常数}$$

$$F = 4 + \frac{R_{12}}{a} - \frac{f(R_1/a)}{g(R_1/a)} - \frac{f(R_2/a)}{g(R_2/a)}$$

此处,  $f(x) = x^2 \sinh(x)$

$a$  是 Yukawa 折叠函数的范围,  $a = 0.65\text{fm}$  计算结果, 当取液滴模型半径参数  $r_0 = 1.2\text{fm}$  时, 理论曲线与实验点较好地一致. 计算结果在图 6 中用虚线表示.

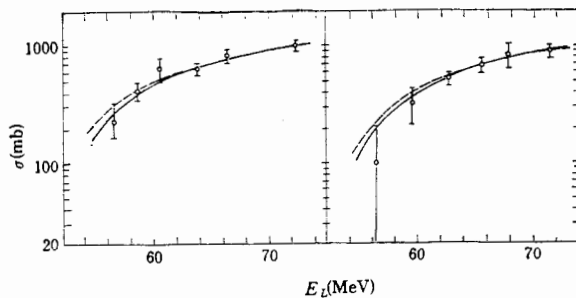


图 6 全熔合截面. 左边为  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$  反应, 右边为  $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  反应所得结果.

图中  $\circ$  表示实验点, —— 用亲近势计算的结果, --- 用通用势计算的结果.

图 6 中所标误差包括靶厚、照射束流积分强度、探测效率及其由于收集箔几何位置的偏离带来的误差、统计误差以及 K-X 射线产生几率的误差。除最低能量外,截面误差一般在  $\pm(10\% - 20\%)$ 。

## 五、结 论

本实验利用测量余核的 K-X 射线的方法测量了 56.4—72.25 MeV 的  $^{12}\text{C}$  离子轰击  $^{159}\text{Tb}$ 、 $^{165}\text{Ho}$  的复合核蒸发余核的截面,得出了这两个反应的全熔合截面,并利用现有的模型进行了符合。结果表明利用这种方法测得的全熔合截面是可信赖的,也就是说用测量 K-X 射线的方法来测定质量约为 150 的全熔合余核的生成截面,是一个可行的方法。为了进一步提高实验数据的可靠性,必须提高束流的强度和输运的稳定度,同时要减小实验中收集箔的位置偏差,特别是在低入射能量时,更应如此。

我们感谢靳根明同志在这个工作中与我们做的有益的讨论和启示。

## 参 考 文 献

- [1] J. R. Birkelund et al., *Physics Reports* (Review Section of Physics Letters), **56**(1979), 107—166.
- [2] P. Frobrich. *Physics Reports* (Review Section of Physics) **116**(1984), 337—400.
- [3] R. G. Stokstad et al., *Phys. Rev.*, Vol. **21**(1979), 2427.
- [4] G. J. Night et al., *Nuclear Spectroscopy Table* (North-Holland Amsterdam, 1959).
- [5] C. M. Lederer et al., *Table of Isotopes*, Seventh edition (1978).
- [6] 卢希庭等人, *核素数据手册*, 原子能出版社 (1981).
- [7] H. J. Krappe et al., *Phys. Rev.*, C Vol. **20**(1979), 992.
- [8] L. C. Vaz et al., *Phys. Reports*, **69**(1981), 374.

## MEASUREMENT OF COMPLETE FUSION CROSS SECTION OF $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$ , $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$

WANG SUFANG CAI WEI ZHENG JIWEN

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

### ABSTRACT

Complete fusion cross sections have been measured for  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$  and  $^{12}\text{C} + ^{165}\text{Ho}$  reactions by using K-X rays of evaporation residues with si(Li)spectrometer. The half-lives of evaporation residues and its yield distributions as a function of incident energy have also been obtained. The experimental values for the complete fusion cross section were compared with the theoretical ones.

的  
片  
成  
都  
述  
计  
验  
大  
计  
段  
都  
认  
绝  
的  
裂  
的