

$^{16}\text{O} + \text{nat}\text{S}$ 全熔合激发函数*

王素芳 郑纪文 刘国兴

陈克良 白兴平 郑平子

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

张焕乔 许谨诚 刘祖华

阮明 吕俊 徐侃

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1992年7月3日收到

摘 要

在入射能量为 55—75 MeV 的范围内,借助于位置灵敏的 $\Delta E-E$ 望远镜系统测量了 $^{16}\text{O} + \text{nat}\text{S}$ 反应的全熔合激发函数并做了讨论分析,提取了模型参数。激发函数存在着粗结构,其峰位分别为 $E_{\text{CM}} = 38、43、48\text{MeV}$ 。

关键词 重离子全熔合,激发函数,振荡结构。

1 前 言

在低能重离子引起的完全熔合反应中,随着入射能的增加,不同反应系统的全熔合截面大都是比较光滑地变化的。但是,当人们对一些较轻的反应系统的全熔合截面进行测量研究时,则发现它们的全熔合截面并不是光滑平缓地随着入射能变化,而是出现一些共振结构。而且,与测得的同一系统的大角度弹性散射截面相比,这些共振结构与弹散数据有相关联现象。这些共振现象多出现在那些弹核和靶核是 α 结构的反应系统中,例如 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C} + ^{24}\text{Mg}$ 及 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 等反应系统的全熔合激发函数上都有共振结构^[1,2]。这些结构的宽度有的为几个 MeV,称为粗结构,有的仅为几百 keV,称之为中间结构。

到目前为止,实验测量证明了用 ^{12}C 核轰击一系列具有 α 结构的靶核,如 ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si 等,以及用 ^{16}O 核轰击像 ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne 和 ^{28}Si 靶核时,其全熔合激发函数上都具有明显的共振现象。而利用 ^{16}O 核轰击更重的具有 α 结构的核时,是否也能在其全熔合激发函数上观测到共振结构,一直是人们感兴趣的研究课题。对这些反应系统的全熔合激发函数上的共振现象进行观测,可以为深入认识共振现象的起因和发生规律提供

* 中国科学院七五重大课题所属题目和中国科学基金项目。

更多的依据,进一步揭示全熔合反应机制与反应核结构等方面的关系,对熔合本身的变化过程也会给出更多的信息。

在这之前, $^{16}\text{O} + ^{32}\text{S}$ 反应系统还没有实验数据。为此,选择了该系统,在 $E_L = 55\text{—}75\text{MeV}$ 范围内测量了全熔合激发函数。同时在这个能量范围内测量了 $\theta_L = 60.3^\circ$ 的弹性散射激发函数。实验发现,不仅反应系统的全熔合激发函数上存在粗共振结构,而且 $\theta_L = 60.3^\circ$ 的弹性散射激发函数上也存在着相关的共振现象。

2 实 验

实验是在北京原子能科学研究所的 HI-13MV 串列加速器上完成的。 ^{16}O 束流的能量范围是 $55\text{—}75\text{MeV}$, 变化步长为 1MeV 。实验装置已在文献 [3] 中详细描述过。

本次实验所使用的硫靶是夹心式的,即在碳膜上(约 $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 真空蒸镀厚度为 $140\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的天然硫,然后再蒸镀一层厚度约为 $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳膜。这样可以防止硫靶在常温下的升华以及在束流轰击时的升华。

熔合蒸发余核是利用由气体电离室构成的 ΔE 探测器及由 7 个 Si(Au) 半导体探测器组成的 7 套探测望远镜测量的。两相邻探测器之间的角度差为 2.4° , 共对 $5^\circ\text{—}22^\circ$

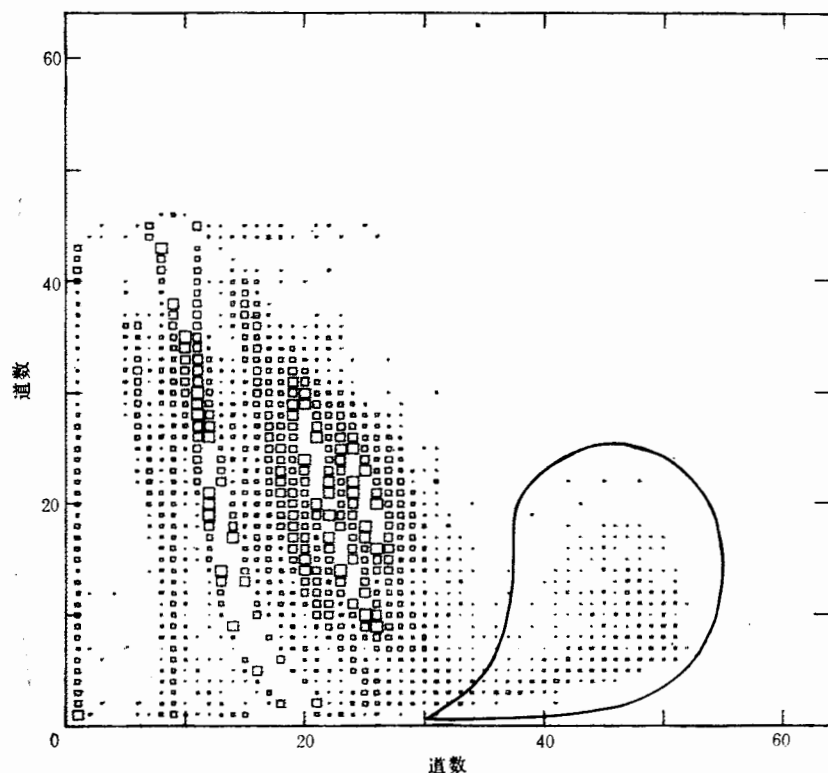


图 1 $E_L = 75\text{MeV}$ 时的 $\Delta E\text{—}E$ 双维谱
 $\theta_L = 7.5^\circ$, 曲线内为 $^{16}\text{O} + ^{32}\text{S}$ 的全熔合反应产物。

之间的7个角度的余核截面及弹性散射截面进行了测量。在VAX-11/780八参数数据获

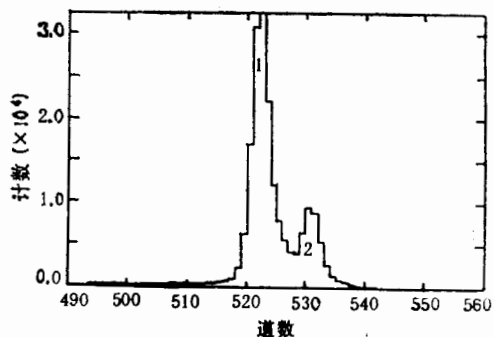


图2 弹性散射能谱

$E_L = 56\text{MeV}$, $\theta_L = 7.5^\circ$.

1. ^{12}C 核散射的 ^{16}O 峰, 2. ^{34}S 散射的 ^{16}O 峰.

^{12}C 反应的余核间有明显的界限。且在单维能谱(图2)上可以清楚地看到 ^{16}O 的两个弹性散射峰。

为了研究弹性散射激发函数与全熔合激发函数的结构间是否有某种关联, 在实验室坐标系 $\theta_L = 60.3^\circ$ ($\theta_{\text{CM}} = 86.4^\circ$), 距离靶子 8.83cm 的位置安放了四个半导体探测器, 测量弹性散射粒子, 探测器的方位角 ϕ_L 分别为 $\pm 60^\circ$, $\pm 120^\circ$, 对靶的总张角为 0.0435sr.

3 数据处理与实验结果

3.1 靶厚的处理

为了克服硫靶的真空升华, 在硫靶的两面都覆盖有碳膜。但是在处理实验数据时发现, 硫的升华仍很严重, 靶厚随照射时间延长而变小, 必须对靶厚进行修正。

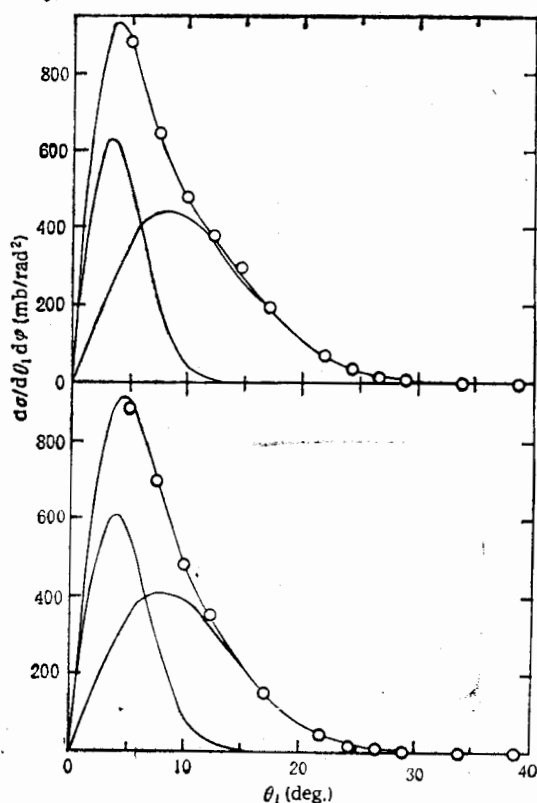
首先从实验测到的 ^{16}O 在靶子上的弹性散射能谱中, 将 ^{34}S 核的散射与从 ^{12}C 核的散射成分仔细地分开。为了避免弹性散射截面与卢瑟福散射截面的偏离, 取 7.5° 角的散射粒子能谱为基础数据, 见图2。把分离的纯粹从 ^{34}S 靶核束的 ^{16}O 弹性散射计数与计算的卢瑟福散射截面相比较, 得出实际的靶厚。对各个轰击能量点的靶子厚度都做了这样的处理。用这一靶厚来计算同时测量的 22° 以前各角度的全熔合微分截面; 在 22° 以后的各角度上, 全熔合截面相对于小角度外的值可以忽略不计 ($< 2\%$), 因此没有进行靶厚修正。

3.2 余核角分布

在轰击能量为 55MeV 和 70MeV 时测量了 $\theta_L = 5^\circ - 39^\circ$ 角度范围的 $^{16}\text{O} + ^{34}\text{S}$ 反应的余核角分布, 其结果给在图3中。从图中可以看出, 当 $\theta_L > 22^\circ$ 时, 其余核截面与小角度的截面值相比可以忽略不计。因此, 在别的能量下, 只测量了 $\theta_L = 5^\circ - 22^\circ$ 的余核产物截面。

如果假定在质心系中复合核蒸发粒子是各向同性的, 那么, 在实验室系中, 其余核角分布可以写作:

取系统上获取记录实验数据。从测得的 $\Delta E-E$ 双维图中(图1), 可以看出产物集中为两大团, 质量数较低的一团有较高的产额, 这一团中的各元素(除氧之外)大都来自 ^{16}O 轰击硫靶两面的 ^{12}C 覆盖膜产生的全熔合反应产物。而质量数较大的一团则是本工作研究的 ^{16}O 轰击 S 的熔合产物。由于熔合产物的反冲能量很低, 以及 ΔE 探测器的分辨有限, 使得熔合余核的 Z 不能逐一分开, 但是 $^{16}\text{O} + ^{34}\text{S}$ 全熔合反应的余核与 $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ 反应的余核间有明显的界限。且在

图 3 $^{16}\text{O} + ^{235}\text{S}$ 反应余核角分布

实线 1 为只发射多个单核子, 实线 2 为发射数个单核子及 α 粒子。

$$\frac{d\sigma}{d\theta_L d\varphi} = N \cos^2 \theta_L \exp[-v_c^2 \sin^2 \theta_L / 2\sigma_c^2] \sin \theta_L, \quad (1)$$

其中 N 为归一常数, v_c 为复合核的反冲速度, 分布宽度 σ_c 与复合核发射的粒子的数量和类型有关。发射的粒子越重, 则余核的反冲越大, 使得 σ_c 越大。如果单核子发射对余核角分布的贡献与包括 α 粒子发射对余核角分布的贡献分别计算, 那么其核的角分布可以简化如下:

$$\frac{d\sigma}{d\theta_L d\varphi} = f_1(N_1, \sigma_{c1}) + f_2(N_2, \sigma_{c2}), \quad (2)$$

$f_1(N_1, \sigma_{c1})$ 表示那些只发射多个单核子而冷却的余核的角分布, 而 $f_2(N_2, \sigma_{c2})$ 则表示发射了几个单核子而且也发射了一个或几个 α 粒子的余核角分布。利用这个公式可以很好地符合实验数据(见图 3)。

对 55MeV 和 70MeV 两个轰击能量, 通过利用(2)式对实验数据的符合所得的曲线, 分别计算了 $\theta_L < 5^\circ$ 及 $\theta_L > 22^\circ$ 时的余核截面。在 $\theta_L < 5^\circ$ 的范围内, 其余核截面占全部余核截面的 28.9% 和 23.7%, 但在 $\theta_L > 22^\circ$ 的角度范围内, 其余核截面分别只占总的余核截面的 1.5% 和 2.3%。

从角分布的形状和分解的两部分之比可以看出, 随着入射能量的升高, 蒸发 α 粒子的

几率越来越大,使得 $E_L = 70\text{MeV}$ 时的角分布在 $\theta_L = 12^\circ$ 附近出现明显的抬高,这也是预料之中的事。

3.3 全熔合截面

积分各入射能量下测得的各角度的余核微分截面得到该入射能时的全熔合截面。图

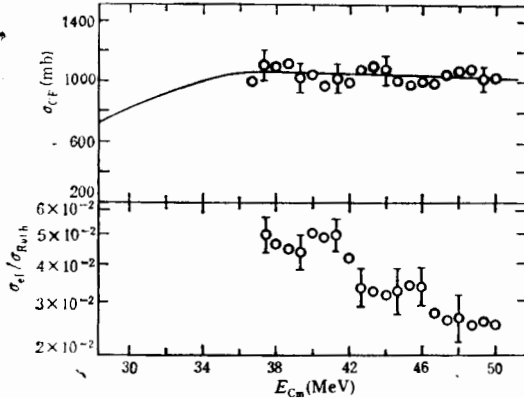


图 4

上部为熔合激发函数,实线是根据模型计算的。下部为弹性散射激发函数。测量角度 $\theta_{CM} = 86^\circ$ 。

仍用估计位垒附近的全熔合截面的公式来估计这个能区的全熔合截面,显然太高。但是这个能区的全熔合截面与 $1/E_{CM}$ 仍有线性关系,即可以用临界距离模型来描述^[4]。截面与轰击能量之间的关系可利用下面的公式进行符合:

$$\sigma_{CF} = \pi R_{cr}^2 \left(1 - \frac{V_{cr}}{E_{CM}}\right), \quad (3)$$

其中 R_{cr} 为临界距离, V_{cr} 是相应于 R_{cr} 处的相互作用势。根据我们的实验数据,可以提取出 $R_{cr} = 5.41\text{fm}$, $V_{cr} = -5.61\text{MeV}$ 。由

$$r_{cr} = \frac{R_{cr}}{A_p^{1/3} + A_T^{1/3}} \quad (4)$$

得出 $r_{cr} = 0.95\text{fm}$ 。两个模型参数 r_{cr} 和 V_{cr} 与系统性 ($r_{cr} \approx (1.0 \pm 0.07)\text{fm}$, $V_{cr} = -5.1\text{MeV}$) 没有很大的偏离。

为了使激发函数的曲线完整化,根据系统化^[5]计算了入射能刚刚高于位垒附近区域的全熔合截面:

$$\sigma_{CF} = \pi R_B^2 \left(1 - \frac{V_B}{E_{CM}}\right). \quad (5)$$

根据公式(5)得到模型参数 $r_0 = 1.535\text{fm}$, $V_B = 19.78\text{MeV}$ 。

3.4 全熔合临界角动量

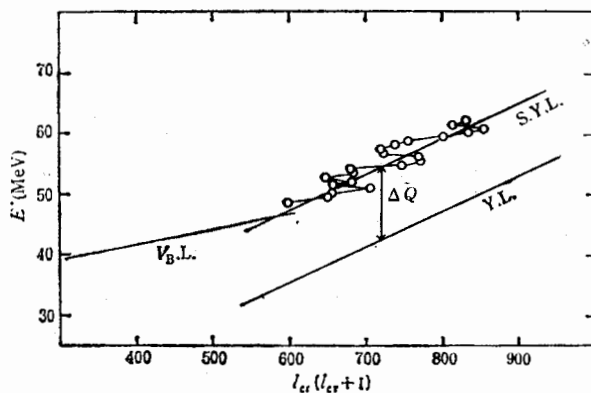
全熔合截面可以与临界角动量联系在一起:

$$\sigma_{CF} = \pi \lambda^2 (l_{cr} + 1)^2. \quad (6)$$

在图5中给出了 $l_{cr}(l_{cr} + 1)$ 与 E^* (激发能)的关系,图中标有 Y. L. 的直线是根据

4 上部给出了该反应在 $E_{CM} = 36.7-50\text{MeV}$ ($E_L = 55-75\text{MeV}$) 能区的全熔合激发函数。截面的总误差约为 8%,包括计数统计误差、在双维谱中分出反应余核时的人为误差、靶子厚度误差以及各种几何因素的误差。另一方面,本实验结果没有考虑探测器低能阈造成的反冲余核的损失,这可能使测量截面比真实值低 5%—10%。

从图中可以看出,在这个能区 $^{16}\text{O} + ^{32}\text{S}$ 的全熔合截面随入射能的变化趋势平缓并略有下降,但在该能区的低能端的数据没有下降趋势,这表明入射能量已经足够高,这时如果

图 5 激发能与 $l_{cr}(l_{cr} + 1)$ 的关系

实线 Y.L. 是 yrast 线, 实线 S.Y.L. 是统计 yrast 线, 实线 Vb.L. 是根据位垒模型计算的.

下面公式计算的复合核的 yrast 线:

$$E^* = E_{\text{CM}} + Q = \frac{l_{cr}(l_{cr} + 1)\hbar^2}{2\mathcal{I}_0}, \quad (7)$$

其中 Q 为反应的 Q 值, \mathcal{I}_0 是复合核的球形刚体转动惯量:

$$\mathcal{I}_0 = \frac{2}{5} M r_0^2 A^{2/3}, \quad (8)$$

其中, 半径参数 $r_0 = 1.18\text{fm}$. 在该能区统计 yrast 线模型^[6]也成功地解释了实验数据. yrast 线是全部激发能为转动能时激发能与角动量的关系线. 在这条线上核的内激发能为零, 真实的核只能在该线上方. 统计 yrast 线模型的基本思想认为, 内激发能为零的核是不能在熔合过程中形成的, 只有当终态有一定的态密度时, 组合体系才可能过渡到复合核, 具有这种态密度的复合核内激发能用 ΔQ 表示, 这就构成一条与 yrast 线平行且相距 ΔQ 的 $E^* \sim l_{cr}(l_{cr} + 1)$ 线, 称为统计 yrast 线,

$$E^* = \frac{l_{cr}(l_{cr} + 1)\hbar^2}{2\mathcal{I}_0} + \Delta Q, \quad (9)$$

这条线成为全熔合过程的限制线. 从图中可以看出, 由我们的实验数据得到的直线 S.Y.L. (统计 yrast 线) 与 yrast 线平行且相差一值, 即 $\Delta Q = 11.7\text{MeV}$, 我们得到的 r_0 与 ΔQ 值在系统值 ($r_0 = 1.2 \pm 0.05\text{fm}$, $\Delta Q = 10 \pm 2.5\text{MeV}$) 之内. 这表明在该激发能区, 复合核的性质决定复合核的形成截面.

对我们的实验数据, 临界距离及统计 yrast 线两种模型都能给出合理的描写. 这里不能判定哪种机制对它起了限制作用.

3.5 全熔合激发函数的结构

前面的讨论已经指出, 在我们的实验能区内, $^{16}\text{O} + ^{238}\text{S}$ 全熔合激发函数的平均行为可以用临界距离模型或统计 yrast 线模型来描写. 然而激发函数并不像是平滑的, 随能量的变化似乎呈周期性的起伏. 虽然这种起伏的数值仅为截面平均值的 $\pm 5\%$, 但不像是或然性的, 而是有规律的. 另一方面, 虽然前面对于全熔合截面给的误差为 $8-10\%$,

但其中贡献大的都是系统性误差,例如靶厚误差和低能余核的阈下损失。无规性的误差的贡献不超过 $\pm 4\%$ 。这样虽然这些规律性起伏在 $\pm 8\%$ 的总误差之内,但还是超出了 $\pm 4\%$ 的无规性误差的范围。因此,认为 $^{16}\text{O} + ^{nat}\text{S}$ 反应的全融合激发函数是存在粗结构的,宽度约为 5MeV (质心系统),振荡峰位分别在 $E_{\text{CM}} = 38, 43$ 和 48MeV 。为了检验全融合激发函数振荡结构与弹性散射的关系,在实验室系统 $\theta_{\text{L}} = 60.3^\circ$ ($\theta_{\text{CM}} = 86^\circ$)处测量了 $^{16}\text{O} + ^{nat}\text{S}$ 反应弹性散射截面,实验结果以与卢瑟福散射截面之比的形式在图4下部给出。可以看到, $\theta_{\text{CM}} = 86^\circ$ 的弹性散射截面随能量的增加而下降,但是实验截面并不是平滑下降的,而是存在振荡结构。对比全融合激发函数和 $\theta_{\text{CM}} = 86^\circ$ 的弹性散射激发函数,可以清楚地看到,两个激发函数的振荡成反向关联。这说明, $^{16}\text{O} + ^{nat}\text{S}$ 反应体系的全融合激发函数的振荡结构和弹性散射激发函数的振荡起源于相同机制,是由相同轨道角动量的核分子态造成的。

参 考 文 献

- [1] P. Sperr et al., *Phys. Rev. Lett.*, **36**(1976) 405; *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976)321.
- [2] M. Paul et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40** (1978)1310.
- [3] 王素芳等,高能物理与核物理, **16**(1992)453.
- [4] J. Galin et al., *Phys. Rev.*, **C9** (1974) 1018.
- [5] L.D. Vaz et al., *Phys. Rev.*, **69**(1981) 373.
- [6] S.M. Lee et al., *Phys. Rev. Lett.*, **45** (1980)165.

Complete Fusion Excitation Function for the $^{16}\text{O} + ^{nat}\text{S}$ Reaction

Wang Sufang Zheng Jiwen Liu Guoxing Chen Keliang Bai Xingping Zheng Pingzi
(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

Zhang Huanqiao Xu Jincheng Liu Zuhua Ruan Ming Lü Jun Xu Kan
(*Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

Received on July 3, 1992

Abstract

The complete fusion excitation function for the $^{16}\text{O} + ^{nat}\text{S}$ reaction has been measured in the range of $50\text{--}75\text{ MeV}$ with a step of 1.0MeV by using a position sensitive $\Delta E\text{-}E$ telescope system. The model parameters have been extracted from data analysis. The striking gross structure of the excitation function has been observed. The energies of peaks are at $E_{\text{CM}} = 38, 43$ and 48 MeV respectively.

Key Words Heavy-ion-induced complete fusion, Excitation function, Oscillation structure.