

$^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应全熔合激发函数的类共振结构*

刘国兴 郑纪文 陈克良 王素芳 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 倪

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 本工作用位置灵敏的 $\Delta E-E$ 望远镜系统, 入射能量步长为 1.0 MeV, 测量了 55~90 MeV $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应全熔合激发函数。实验结果表明, 这个反应的全熔合激发函数不是平滑的, 存在着宽结构。峰位在 $E_{\text{CM}} = 34.2, 37.8, 40.6, 43.8$ 和 46.6 MeV。当 $E_{\text{CM}} > 48$ MeV 时, 激发函数的结构消失了。

关键词 全熔合, 类共振结构。

1 引言

重离子全熔合反应的实验研究中, 在某些轻体系全熔合激发函数中观测到有与能量相关的类共振结构。一方面在 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 等反应体系中观测到宽度为几个 MeV 的宽结构^[1]。另一方面在 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 、 ^{28}Si 和 ^{32}S 、 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 等体系的全熔合激发函数中观测到宽度为几百 keV 的中间结构^[2]。实验结果表明, 由 α 结构核形成的反应体系, 全熔合激发函数呈现的结构最为明显。全熔合激发函数的宽结构与背角弹性散射激发函数的宽结构是反向关联的。全熔合激发函数的中间结构与准弹性转移及非弹性散射道特定角度激发函数的结构是密切相关的。

全熔合激发函数中间结构的特征, 表明它们产生于双核准分子态。按照核分子图像, 在重离子核反应中, 具有单一轨道角动量的转动双核态和集体运动模式发生作用时, 可能分裂为几个具有相同角动量的共振态, 可以设想这些共振态就是中间结构。Orbiting Cluster Model 预言^[3], 当参与核为 α 结构核时, 最有可能出现小宽度的共振, 而且共振宽度与激发能无关, 仅仅依赖于核质量数。

值得注意的是, 凡有 ^{12}C 核参与的反应体系, 例如 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 、 ^{16}O 、 ^{20}Ne 、 ^{24}Mg 、 ^{28}Si 和 ^{32}S ,

全熔合激发函数都出现明显的振荡。这样, 我们自然对于 ^{16}O 核参与的反应体系的全熔合激发函数是否存在振荡结构感兴趣。因为实验结果对于更深入了解振荡的起源, 推动有关理论模型的发展有重要意义。 ^{16}O 引起的反应体系中, $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{20}\text{Ne}$ 的全熔合激发函数中已经观测到中间结构^[4]。对于 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 、 $^{16}\text{O} + ^{28}\text{Si}$ 、 $^{16}\text{O} + ^{32}\text{S}$ 三个反应体系, 或因入射能量步长过大, 或因实验能区有限, 迄今还没有系统的激发函数振荡结构的实验数据。

本工作采用位置灵敏的 $\Delta E-E$ 望远镜系统, 入射能量步长为 1.0 MeV, 测量了 55~90 MeV $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应的全熔合激发函数。用某些熔合模型对激发函数进行分析, 提取了模型参数。实验结果表明, 这个反应的全熔合激发函数不是平滑的, 存在宽的振荡结构。

2 实验方法

我们曾经详细地描述过采用位置灵敏的 $\Delta E-E$ 望远镜系统测量轻体系全熔合激发函数实验方法^[5]。实验是在北京中国原子能研究院 13MV 串列加速器上进行的。靶室直径是 38cm, 它可以绕中心在反应平面内转动土 10°。靶子置于靶室中心。 ^{24}Mg 同位素靶的丰

* 中国科学院七五重大课题所属题目和中国科学院科学基金资助课题
本文 1993 年 11 月 9 日收到。

度为 99.78%，厚度为 $99.98\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。 $\Delta E-E$ 望远镜系统的入射窗距靶中心是 30cm，可测量的角度范围是 $5^\circ \sim 22^\circ$ 。 ΔE 探测器是气流式电离室，有效气柱长度为 6.0cm，工作气体为 90%Ar+10%CH₄，气压为 2660Pa，充气气压的长期稳定性好于 3%。 E 探测器用了 10 个有效直径为 8mm 的半导体探测器，每个对应一个电离的入射窗孔。这样就构成了有 10 个不同角度的位置灵敏的 $\Delta E-E$ 望远镜系统。在 Mg 靶后 9.5cm 处放置一块厚 $100\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的金靶，测量金靶的库仑散射以检验束流强度。用多参数数据获取系统获取数据。 $\Delta E-E$ 双维谱记录在磁带上。

为了减少熔合截面相对误差，在整个实验中尽量保持各种测量条件不变。对于每个入射能量，在 $5^\circ \sim 22^\circ$ 范围获取数据。它基本上覆盖了蒸发余核角分布的高截面区。为了得到完整的角分布，对于 55、70 和 85MeV，测量角度的范围是 $5^\circ \sim 40^\circ$ 。

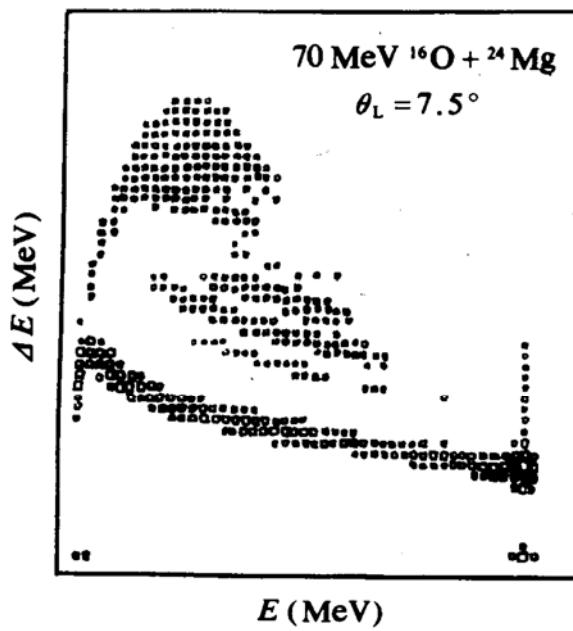


图 1 70MeV $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应 $\theta_L = 7.5^\circ$ $\Delta E-E$ 双维谱

实验数据分析是在中国科学院近代物理研究所 VAX-8350 计算机上进行的。对于 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应，由于熔合蒸发余核反冲能量比较低，所以 $\Delta E-E$ 分辨技术不能把不同 Z 产

物分开，只能把熔合产物集团与其它反应产物分开。图 1 给出了 70MeV $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应 $\theta_L = 7.5^\circ$ $\Delta E-E$ 双维谱。熔合反应产物集团(图 1 中 A 区)很清楚地与其它反应产物分开了。

3 实验结果与讨论

3.1 蒸发余核角分布

对于 55、70 和 85MeV，我们测量了 $\theta_L = 5^\circ \sim 40^\circ$ 范围内蒸发余核角分布。若假设复合核蒸发粒子在质心系是各向同性的，根据复合核统计蒸发理论，实验室系余核角分布可以写成

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = N \cos^2 \theta_L \exp(-V_c^2 \sin^2 \theta_L / 2\sigma_\theta^2) \quad (1)$$

其中， V_c 是复合核反冲速度， σ_θ 是分布宽度， N 是归一常数。对于较轻复合核体系， α 粒子蒸发占有相当大的比例， α 粒子蒸发使余核有较大的反冲与无 α 粒子蒸发的余核混合在一起，使用方程(1)不能复现实验的余核角分布。所以利用方程(1)只能在有限角度范围($\theta_L < 15^\circ$)拟合实验的余核角分布。在 $\theta_L > 15^\circ$ 时，按方程(1)计算的微分截面比测量值小得多，这表明在该角区 α 粒子蒸发成分有较多的贡献。由于实验几何条件的限制，在 $\theta_L < 5^\circ$ 时没有实验点，这部分截面可以采用方程(1)计算的拟合曲线的截面值。对于 55、70 和 85MeV，这部分截面对熔合总截面的贡献分别为 31.8%、28% 和 25.8%。 $\theta_L > 22^\circ$ 区域的截面对熔合总截面的贡献分别为 6.0%、7.7% 和 8.9%。我们利用实验点的内插和外推计算出其它轰击能量这部分角区截面对熔合总截面的贡献。

3.2 全熔合激发函数及其理论模型

图 2 给出了 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应的全熔合激发函数。全熔合截面实验点的误差为 $\pm (5 \sim 7)\%$ 。为了比较，图 2 也给出了我们以前采用在束 γ 谱学技术在 $E_{\text{CM}} = 25 \sim 30\text{MeV}$ 能区得到的结果^[6]，以及 Tabor 等人^[7]入射能量步长为 4.0MeV 的结果。三个实验结果覆盖了 $E_{\text{CM}} = 20 \sim 54\text{MeV}$ 能区。从图 2 可以看出，在

$E_{CM} = 20 \sim 34 \text{ MeV}$ 能区, 全熔合截面随轰击能量增加很快地增加, 在 $E_{CM} = 34 \sim 48 \text{ MeV}$ 能量范围内, 随轰击能量增加熔合截面无明

显的变化. 当 $E_{CM} > 48 \text{ MeV}$ 时, 熔合截面随轰击能量增加而减少.

全熔合激发函数可用势模型描述. 势模型

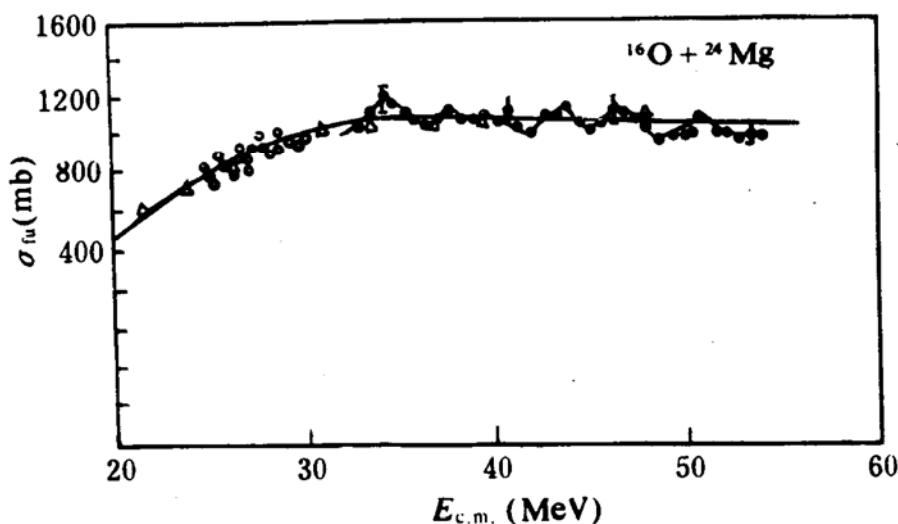


图 2 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应全熔合激发函数. ● 本工作, △ Tabor et al^[7], ○ 刘国兴等^[6]

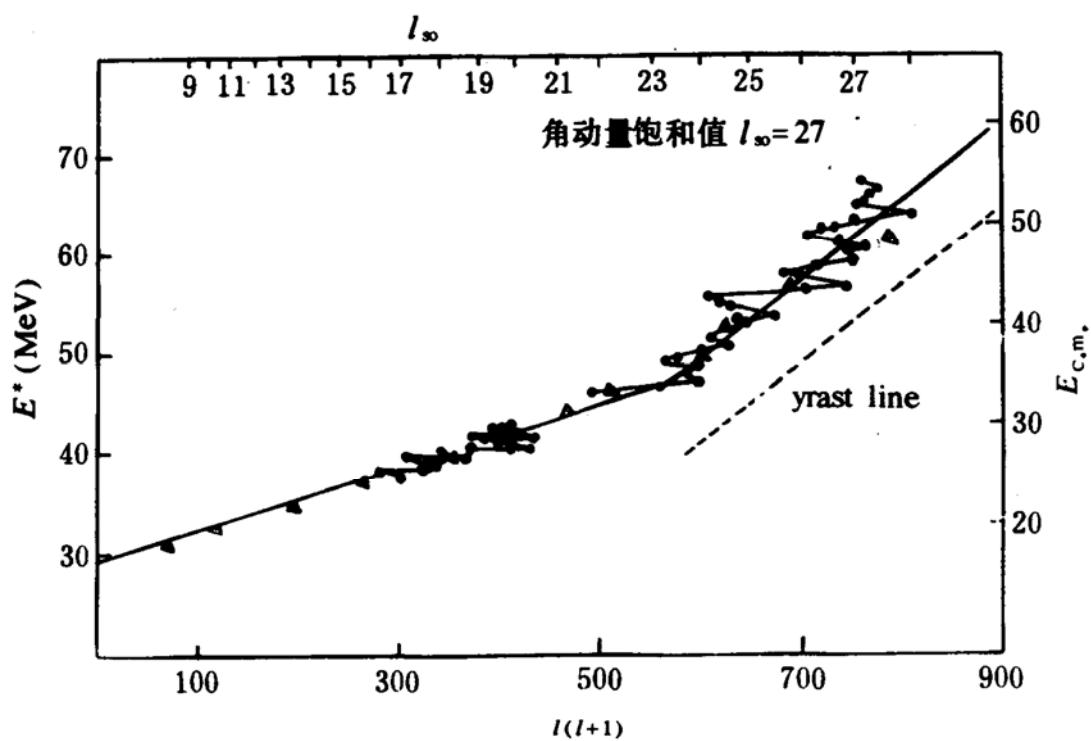


图 3 复合核激发能与临界角动量的关系

认为, 在低能区入射粒子穿过两个核的相互作用位垒是产生全熔合的条件. 熔合截面作为质心系能量的函数是,

$$\sigma_{fu} = \pi R_B^2 (1 - V_B/E_{CM}) \quad (2)$$

其中, V_B 和 R_B 分别是熔合位垒和位垒半径. 在较高能区, 两个碰撞核的最小靠近距离是

否等于临界距离 R_{cr} 是产生全熔合反应的条件。这时全熔合激发函数用临界距离模型描述, 全熔合截面由下式给出,

$$\sigma_{\text{fu}} = \pi R_{\text{cr}}^2 (1 - V_{\text{cr}}/E_{\text{CM}}) \quad (3)$$

其中, R_{cr} 是临界距离, V_{cr} 是在临界距离处的相互作用势。用上述两个模型拟合实验数据, 得到的模型参数是: $R_B = 8.084\text{fm}$ ($r_B = 1.496\text{fm}$), $V_B = 15.3\text{MeV}$, $R_{\text{cr}} = 5.139\text{fm}$ ($r_{\text{cr}} = 0.984\text{fm}$), $V_{\text{cr}} = -9.84\text{MeV}$ 。这些参数与系统学的结果是一致的。在较高能区, Lee 等人^[8]还提出统计 Yrast 线模型。该模型认为, 复合核的统计 Yrast 线限制了全熔合过程, 按照这个模型全熔合截面可以写成

$$\sigma_{\text{fu}} = \frac{\pi J_0}{\mu} \left(1 + \frac{Q - \Delta Q}{E_{\text{CM}}}\right) \quad (4)$$

其中, μ 是碰撞体系的约化质量, J_0 是复合核的惯性矩, 取刚体值 $J_0 = (2/5)mR^2$, m 和 R 分别是复合核的质量和半径。 Q 是全熔合反应的基态 Q 值, ΔQ 是在 (E^*, l) 相空间中统计 Yrast 线与相平行的 Yrast 线之间的距离。 ΔQ 的物理意义是复合体系具有的内激发能, 这样它就有相当高的能级密度, 足以导致在重离子碰撞中复合核的形成。在方程(4), 全熔合截面 σ_{fu} 仍然是 $1/E_{\text{CM}}$ 的线性函数。图 3 给出了从测量的全熔合截面提取的临界角动量和复合核激发能的关系, 同时也给出了用方程(4)符合实验数据的结果。图中虚线是 Yrast 线, 符合参数是 $r_0 = 1.23\text{fm}$, $\Delta Q = 9.0\text{MeV}$ 。这些参数与系统学分析结果相符。

3.3 全熔合激发函数的结构

从图 2 可以看出, 由于入射能量步长很大(4.0MeV), Tabor 等人测量的全熔合激发函数是平滑的, 没有显示出结构。本工作测量的激发函数的平均行为与 Tabor 等人的结果是一致的。但它不是平滑的, 熔合截面随能量的变化显示出较大的、有规律的起伏, 是熔合激发函数的宽结构。截面起伏的峰位在 $E_{\text{CM}} = 34.2, 37.8, 40.6, 43.8$ 和 46.6MeV , 当 $E_{\text{CM}} > 48.0\text{MeV}$, 截面实验点无明显的起伏, 不能确认结构存在。在 $E_{\text{CM}} = 25 \sim 30\text{MeV}$ 的能区,

我们以前的工作观测到中间结构。所以, $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应全熔合激发函数是中间结构和宽结构共存的结果。

一般说来, 全熔合激发函数的结构和转移反应在特定角度激发函数的结构可能产生于相同的机制, 两种结构存在着某种关联。图 4 给出了 Sanders 等人^[9]测量的 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{28}\text{Si}$ 反应在 $\theta_{\text{L}} = 0^\circ$ 角测量的激发函数。由图 4 看出, 尽管转移反应的截面随轰击能量增加很快地减少, 激发函数却表现出相当复杂的结构。在 $E_{\text{CM}} > 32\text{MeV}$ 能区, 振荡峰位在 $E_{\text{CM}} = 34.0, 37.0, 41.0, 44.2, 47.0$ 和 51.0MeV , 除了 $E_{\text{CM}} = 51.0\text{MeV}$ 一个峰以外, 与我们测量的全熔合激发函数宽结构的峰位大体上一致。这表明, 对于 $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ 反应体系全熔合激发函数的振荡结构与 α 转移反应激发函数的振荡结构是相关联的。

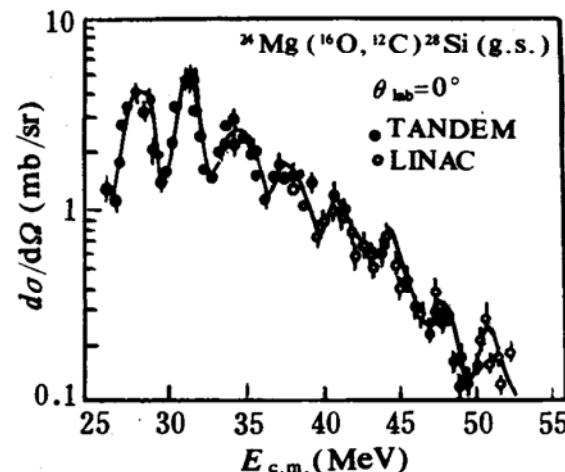


图 4 $^{24}\text{Mg}(^{16}\text{O}, ^{12}\text{C})^{28}\text{Si}$ 反应 $\theta_{\text{Lab}} = 0^\circ$
激发函数, 数据取自文献[9]

参 考 文 献

- 1 Sperr P, et al. Phys. Rev. Lett., 1976, 36: 405; Phys. Rev. Lett. 1976, 32: 37
- 2 Henning W. Resonance in Heavy Ion Reactions. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 1982
- 3 Cindro N, et al. J. Phys., 1980, G6: 359
- 4 Kapoos M, et al. Phys. Rev., 1982, C25: 2457
- 5 郑纪文等. 高能物理与核物理, 1992, 16: 640
- 6 刘国兴等. 高能物理与核物理, 1992, 16: 446

(下转 3 页)

处于1700.1keV处一个新的三(准)粒子态. 找到了 ^{153}Ho 基态形状是球形的证据. 从 ^{157}Yb 的衰变纲图中我们指认了属于 ^{157}Tm 的激发能为35.2keV的一个新的同质异能态和一条带头为 $1/2^+$ 的新的基态带. 找到了 ^{157}Tm 基态形状变形的证据. 低位能级系统分析表明: 在Ho和Tm这两条奇A核的同位素链中基态形状的转变区都在中子数86和88之间. 详细情况可参考下列三篇文献.

- (1) 徐树威、谢元祥、潘强岩等, "The (EC + β^+) decay of ^{153}Er ", Z. Phys., 1994, A350 : 187.
- (2) 徐树威、谢元祥、潘强岩等, " (EC + β^+) decay of ^{157}Yb ", Phys. Rev., 1994, C50 No. 6.
- (3) 徐树威、谢元祥、潘强岩等, "首次测定短寿命缺中子同位素 ^{153}Er 和 ^{157}Yb 的EC/ β^+ 衰变纲图", 高能物理与核物理, 1995, Vol. 19, No. 3.

Briefing of First Determination of EC/ β^+ Decay Schemes of Short Life Neutron Deficient Isotopes ^{153}Er and ^{157}Yb

Xu Shuwei

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract EC/ β^+ decay schemes of ^{153}Er and ^{157}Yb are proposed for the first time. The related technical difficulty, experimental process, main results and their physics are represented briefly.

Key Words neutron deficient isotope, EC/ β^+ decay, decay scheme.

(上接23页)

7 Tabor S L, et al. Phys. Rev., 1978, C17 : 2136

9 Sanders S J, et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1981, 28 : 2

8 Lee S M, et al. Phys. Rev. Lett., 1980, 45 : 165

Resonance-like Structure of Complete Fusion Excitation Function for $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ Reaction

Liu Guoxing Zheng Jiwen Chen Keliang Wang Sufang Bai Xingping Zheng Pingzi

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Zhang Huanqiao Xu Jincheng Liu Zuhua Ruan Ming Lu Jun Xu Kan

(Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The complete fusion excitation function for the $^{16}\text{O} + ^{24}\text{Mg}$ reaction has been measured in the energy range of 55~90MeV with the step of 1.0MeV using a position sensitive $\Delta E-E$ telescopic system. It shows that the fusion excitation function is not smooth and exhibits gross structure. Peaks are at $E_{\text{CM}} = 34.2, 37.8, 40.6, 43.8$ and 46.6MeV . The resonance structure of the excitation function vanishes when E_{CM} is $> 48.0\text{MeV}$.

Key Words complete fusion, resonance-like structure.