

# $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$ 反应的全熔合与非完全熔合

李文新 孙彤玉 吴定清 赵莉莉 靳根明

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1993年1月7日收到

## 摘 要

在 92 和 71 MeV  $^{16}\text{O}$  离子与  $^{115}\text{In}$  的相互作用中, 用核化学技术测量了 20 个反应余核的角分布和微分射程分布. 分析了这些余核的生成特征, 指出随着碰撞参数的增加, 反应机制从全熔合经过质量和动量转移逐渐减小的非完全熔合向直接反应连续演变. 与  $^{16}\text{O} + ^{65}\text{Cu}$  反应相比,  $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$  反应中非完全熔合的贡献显著增加.

**关键词**  $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$ , 全熔合与非完全熔合, 离线  $\gamma$  能谱法, 微分射程分布, 角分布.

## 1 引 言

在较轻的重离子引起的反应中, 根据在初始碰撞中弹核转移给类靶产物的动量情况可以把反应分为三类: (i) 全部动量转移的全熔合; (ii) 部分动量转移的非完全熔合; (iii) 擦边碰撞中只有很少一点动量转移的直接反应. 在入射能量低于 10 MeV/u 时, 全熔合占绝对优势, 随着入射能的增加, 非完全熔合逐渐取代全熔合, 并成为中能区 (20—100 MeV/u) 的主要反应机制. 研究非完全熔合反应有助于了解反应机制的演变, 因此引起人们极大的兴趣.

早在 1961 年 Alexander 和 Winsberg 使用放射化学方法测量了  $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$  反应中余核 At 和 Po 的反冲射程, 看到了部分动量转移的现象<sup>[1]</sup>. 同年 Britt 和 Quinton 在  $^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}$  和  $^{209}\text{Bi}$  反应中发现了核反应早期阶段发射各向异性的快  $\alpha$  粒子<sup>[2]</sup>. 此后, 大量实验和理论工作都致力于研究与上述现象有关的反应机制. 1977 年 Inamura 等人在粒子- $\gamma$  关联测量的研究工作中第一次使用非完全熔合的术语描述这类反应过程<sup>[3]</sup>. 简单地说, 该过程就是入射弹核在碰撞时发生碎裂, 一部分炮弹核子或结团以近似束流的速度向前飞去, 剩余的那部分弹核与靶核熔合. 显然, 非完全熔合反应余核的反冲动量低于全熔合反应余核的动量, 并且大致正比于与靶核熔合的那部分弹核的质量. 因此使用核化学方法测量反冲余核在阻止介质(如 Al 箔)中的射程就能区分全熔合与不同的非完全熔合反应. 近年来 Parker 等人在研究重离子和  $^{51}\text{V}$ 、 $^{93}\text{Nb}$  的相互作用时, 用全熔合和非

完全熔合过程很好地解释了测量到的余核的产额和微分反冲射程分布<sup>[4-6]</sup>。本工作测量了 92 和 71 MeV  $^{16}\text{O} + ^{113}\text{In}$  反应中余核的反冲角分布和微分射程分布, 试图通过和以前  $^{16}\text{O} + ^{65}\text{Cu}$  反应研究结果的比较<sup>[7]</sup>, 了解更多有关全熔合和非完全熔合的特征。

## 2 实 验

实验采用纯度为 99.99% 天然金属 In, 通过真空喷涂法制取铝衬 In 靶。 $^{113}\text{In}$  的天然丰度为 95.7%, 靶厚约  $200\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。在微分射程测量中, In 靶后面紧贴 8—9 片用离子溅射法制取的 Al 收集箔。收集箔厚度在  $110\text{--}180\mu\text{g}/\text{cm}^2$  范围内。角分布测量中使用了  $2\text{--}3\text{ mg}/\text{cm}^2$  厚的 Al 收集箔。除最后两个大角度外, 每个收集箔对靶心张角  $\Delta\theta = 5^\circ$ , 最大测量角度  $\theta = 78^\circ$ 。

照射是在近代物理研究所 1.7m 重离子回旋加速器 SFC 上进行的。准直光栏直径为 6mm, 束流强度为  $40\text{--}120\text{ enA}$ 。照射时间 4—8h。从 SFC 引出的 97MeV  $^{16}\text{O}$  离

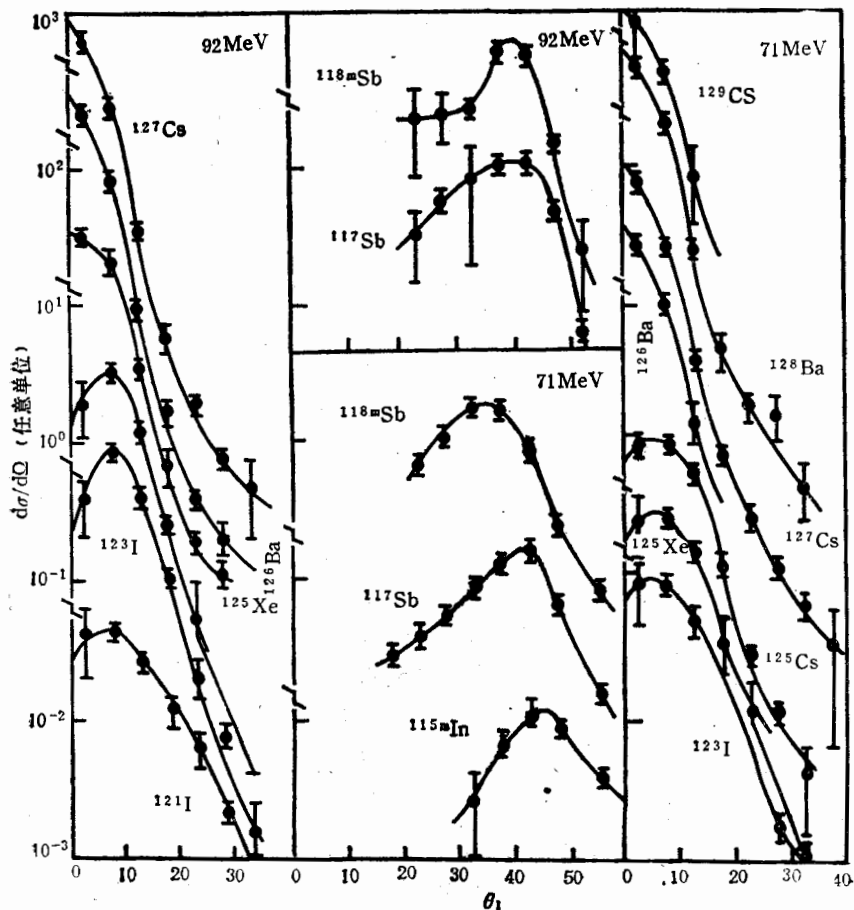


图 1 92 和 71 MeV  $^{16}\text{O} + ^{113}\text{In}$  反应中余核角分布  
实线是通过实验点的光滑连线。

子经靶衬或 Al 降能箔后到达 In 靶中心的能量可根据射程-能量表计算<sup>[8]</sup>。

照射结束后,收集在 Al 箔上余核的  $\gamma$  活性,用 4 台效率已刻度的 HPGe 和 Ge(Li) 探测器进行测量。测量在照射结束后约 30 分钟开始,并持续一个月。 $\gamma$  能谱分析,放射性核素鉴别以及截面计算,均按标准的核化学方法进行<sup>[9]</sup>。实验细节已在以前的工作<sup>[7,10]</sup> 中描述过。计算截面使用的核数据引自文献<sup>[11]</sup>。

### 3 结 果

#### 3.1 角分布

在 92 和 71 MeV 的  $^{16}\text{O}$  离子和  $^{115}\text{In}$  的相互作用中,分别测量了 8 和 10 个余核的反冲角分布(见图 1)。质量数接近复合核质量的重余核的角分布呈现强烈前冲,并在  $0^\circ$  (实验室系,下同)成峰。质量数较小的余核,如 92 MeV 时的  $^{123}\text{Xe}$ ,  $^{123}\text{I}$  和  $^{121}\text{I}$  的角分布在小角度  $\sim 7.5^\circ$  处成峰,而 71 MeV 时,  $^{125}\text{Cs}$ ,  $^{123}\text{I}$  等余核在  $\sim 5^\circ$  处成峰。质量数接近靶质量的余核,它们的角分布极大值在  $40^\circ - 45^\circ$ 。由此可见,不同质量数余核的生成机制

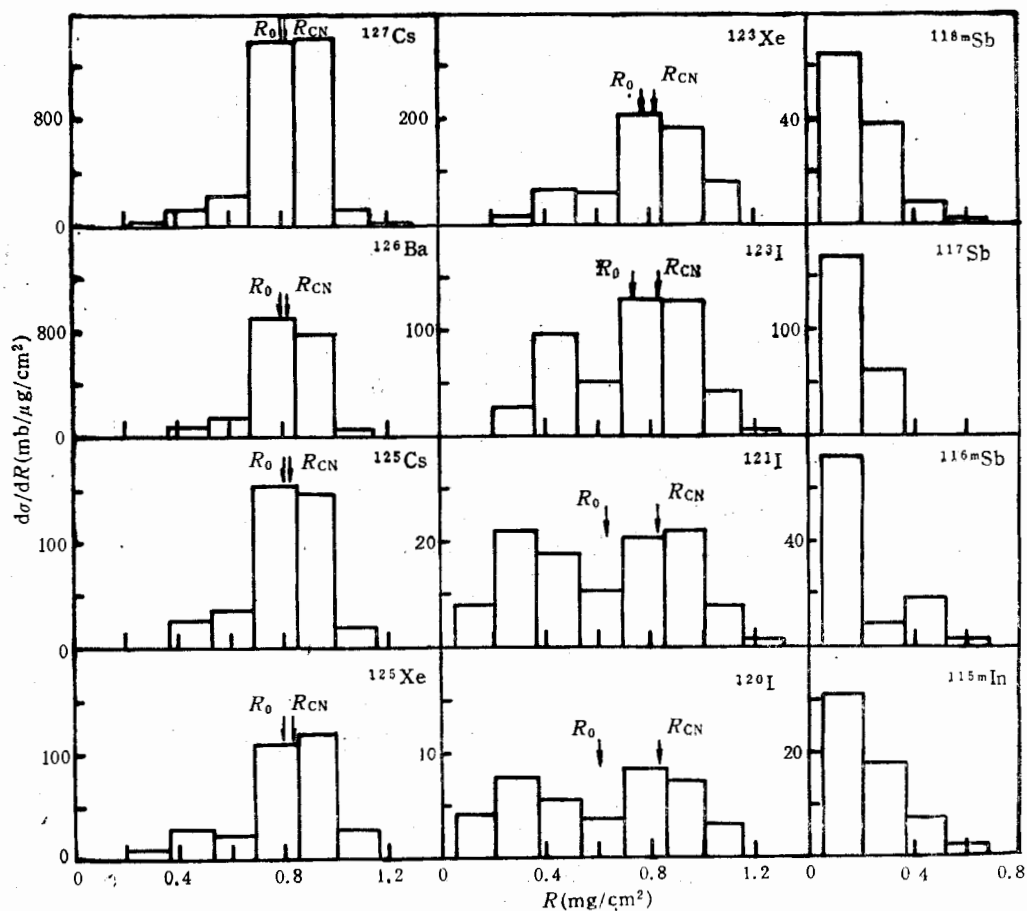


图 2  $92\text{MeV}^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$  反应中余核的微分射程分布

是有差别的。

### 3.2 微分射程分布

在 92 和 71MeV<sup>16</sup>O + <sup>115</sup>In 反应中分别测量了 16 和 17 个余核的微分射程分布。根据余核在 In 和 Al 中的能损比<sup>[8]</sup>, 计算了 In 靶阻滞反冲余核的等效 Al 收集箔厚度。图 3, 图 4 是一些余核的微分射程分布。

当弹核和靶核发生完全熔合而形成激发的复合核时, 复合核的反冲速度等于质心速度, 并且不随粒子蒸发而变化。这样, 最终产物的反冲能量  $E_R$  可写作

$$E_R = E_P A_P A_R / (A_P + A_T)^2, \quad (1)$$

这里  $E_P$  为弹核入射能量,  $A_P$ 、 $A_T$  和  $A_R$  分别为弹核, 靶核和反冲余核的质量。根据射程-能量表可以计算反冲动能为  $E_R$  的余核在 Al 收集箔中的反冲射程  $R_{CN}$ 。

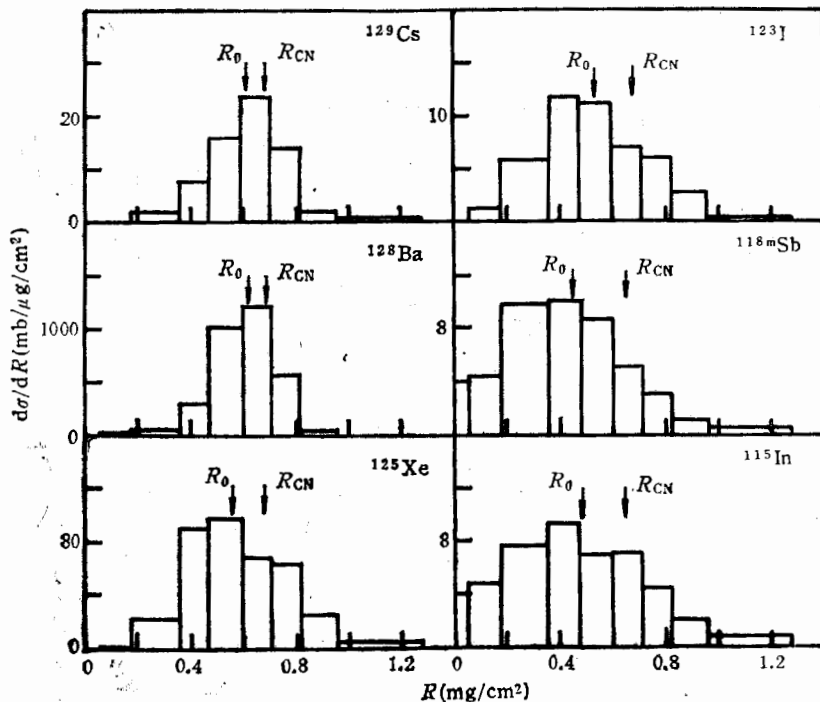


图 3 71MeV<sup>16</sup>O + <sup>115</sup>In 反应中余核的微分射程分布

根据实验测定的微分射程分布通过下式可计算出平均反冲射程  $R_0$ 。

$$R_0 = \Sigma \left( z + \frac{1}{2} z_i \right) f_i, \quad (2)$$

这里  $z_i$  为第  $i$  片收集箔的厚度,  $z$  为该收集箔之前全部收集箔的总厚度,  $f_i$  为该收集箔上某种核素活性占该核素总活性的百分数。各个反应余核的  $R_{CN}$  和  $R_0$  值均标注在图 2 和图 3 中。

## 4 讨 论

我们曾用核化学技术测量了 51—97MeV  $^{16}\text{O}$  和  $^{115}\text{In}$  相互作用中产生的 21 个反应余核的激发函数<sup>[10]</sup>。将实验数据和基于复合核蒸发的统计模型理论计算作了比较, 结果指出, 重余核来源于复合核衰变; 对于中质量余核, 除了复合核衰变外, 还存在其它反应机制的贡献; 近靶产物生成与复合核形成无关。本工作测量了这些余核的运动学性质, 因此, 可以更细致地了解这些余核生成的特征。

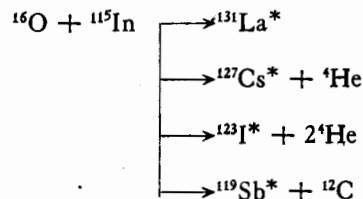
### 4.1 重余核的生成

从图 1—3 可以看到,  $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$  反应中生成的重余核, 如  $^{129}\text{Cs}$ ,  $^{128}\text{Ba}$ ,  $^{127}\text{Cs}$  和  $^{126}\text{Ba}$  等, 角分布呈强烈前冲, 峰位在  $0^\circ$ 。它们的微分射程分布近似呈高斯形。实验测定的射程平均值  $R_0$  与全熔合反应预期的射程  $R_{CN}$  非常接近。这些事实表明,  $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$  反应中重余核是弹核与靶核全熔合形成复合核的衰变产物。这个结论与这些余核生成的激发函数的研究结果相一致<sup>[10]</sup>。

### 4.2 中等质量余核的生成

与重余核不同, 中等质量余核, 如 92MeV  $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$  反应中生成的  $^{125}\text{Xe}$ ,  $^{123}\text{Xe}$ ,  $^{123}\text{I}$  和  $^{121}\text{I}$  以及 71MeV 时的  $^{125}\text{Cs}$ ,  $^{123}\text{Xe}$  和  $^{123}\text{I}$ , 角分布虽然也前冲, 但是在  $5^\circ$ — $10^\circ$  小角度处存在一个峰。类似的角分布在束物理测量实验<sup>[12]</sup>中也被观察到, 并把这些余核的生成全部归结于全熔合过程。仔细考察图 2 可以看到, 中等质量余核的微分射程分布, 除了一个与全熔合有关的长射程成份外, 与重余核射程分布的主要区别还在于它同时存在一个短射程成份。由于短射程成份的出现, 并且随着余核质量数的减小, 短射程成份变得越来越明显, 使得实验测定的平均反冲射程  $R_0$  越来越小于  $R_{CN}$  值。因此, 有理由认为短射程成份起源于某种非完全熔合过程, 正是这个非完全熔合导致余核反冲角分布偏离束流方向, 在  $5^\circ$ — $10^\circ$  处成峰。

$^{16}\text{O}$  离子是很强的  $\alpha$  结团的弹核,  $^{16}\text{O}$  和  $^{115}\text{In}$  碰撞时, 初始阶段的主要反应可描述如下:



当  $^{16}\text{O}$  破裂成  $^4\text{He}$  和  $^{12}\text{C}$  时, 后者和靶核熔合生成中间核  $^{127}\text{Cs}^*$ , 激发的  $^{127}\text{Cs}^*$  通过中子蒸发以及随后的  $\beta^+$  和电子俘获而发生衰变, 这很可能是生成中等质量余核 Cs 和 Xe 同位素短射程成份的主要反应机制。

与 Cs 和 Xe 相比, I 同位素的短射程成份变得更为明显, 它们的产额大致接近长射

程成份。相当部分的  $^{123}\text{I}$  来自其母体  $^{123}\text{Xe}$  ( $T_{1/2} = 2.1\text{h}$ ) 的电子俘获和  $\beta^+$  衰变。除了短射程成份的  $^{123}\text{Xe}$  衰变形成的短射程的  $^{123}\text{I}$  外, 额外增加的短射程  $^{123}\text{I}$  来自  $^{16}\text{O}$  破裂形成的  $^8\text{Be}$  和  $^{115}\text{In}$  的非完全熔合。短射程成份的最可几射程大约为  $R_{\text{CN}}$  值的一半也支持上述这个推测。 $^{123}\text{I}$  的角分布数据扣除来自  $^{123}\text{Xe}$  衰变的贡献就得到  $^8\text{Be}$  非完全熔合产物的角分布。尽管由于有关截面很小, 误差较大, 但依然能粗略估计  $^8\text{Be}$  转移余核的角分布极大值在  $20^\circ$  附近。 $^{121}\text{I}$  和  $^{120}\text{I}$  的反冲行为和  $^{123}\text{I}$  相似, 因而它们的短射程成份是由  $^8\text{Be}$  与靶核非完全熔合后蒸发 1—2 个中子而生成的。

在  $71\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$  反应中, 中等质量余核的角分布与  $92\text{MeV}$  情况相似, 微分射程分布中  $R_0$  和  $R_{\text{CN}}$  值的偏离也随着余核质量数减小而增加。但由于余核反冲射程较短以及实验上射程测量分辨的限制, 未能明显区分两种不同射程的组份。

### 4.3 近靶余核的生成

实验测到的近靶产物有  $^{118\text{m}}\text{Sb}$ 、 $^{117}\text{Sb}$ 、 $^{116\text{m}}\text{Sb}$  以及  $^{116\text{m}}\text{In}$ 、 $^{115\text{m}}\text{In}$  和  $^{113\text{m}}\text{In}$ 。在  $92\text{MeV } ^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$  反应中复合核  $^{131}\text{La}^*$  的激发能大约为  $70\text{MeV}$ 。它不可能蒸发 13 个以上核子而形成这些近靶余核。从图 1 和图 2 可以看到, 这些余核生成只伴随有很少的动量转移, 角分布在大约  $40^\circ$  处成峰, 因此, Sb 同位素看来是由  $^{16}\text{O}$  破裂后生成的  $^4\text{He}$  与  $^{115}\text{In}$  相熔合形成激发的中间体  $^{119}\text{Sb}^*$  再蒸发 1—3 个中子而生成的。In 的同位素则显然是中子的拾取或削裂以及准弹性散射而生成。Sb 和 In 同位素的反冲特性不存在明显的区别, 这表明随着和靶核相熔合的那部分弹核质量数的减小, 非完全熔合反应逐渐向直接反应演变。

值得注意的是在  $71\text{MeV}$  时,  $^{118\text{m}}\text{Sb}$ 、 $^{117}\text{Sb}$  和  $^{115\text{m}}\text{In}$  的反冲射程显著大于  $92\text{MeV}$  时的射程, 并且具有很宽的分布, 其前沿甚至超过了全熔合余核的反冲射程。类似的现象在  $^{14}\text{N}$  和  $^{12}\text{C} + ^{115}\text{In}$  以及  $^{14}\text{N} - ^{63}\text{Cu}$  等重离子与  $^{209}\text{Bi}$  的反应中也曾观察到<sup>[13,14]</sup>。Gardes 等人把这个现象归结于入射能量接近库仑位垒的重离子引起的一种转移反应<sup>[14]</sup>, 在这类反应中炮弹余核向后发射, 使得靶余核以超过入射总动量的速度向前反冲。

### 4.4 相对径向动量转移和反冲角与碰撞参数的依赖关系

不同质量数的余核有着不同的反冲性质, 观察弹核转移给复合系统的相对径向动量和余核反冲角随余核质量数的变化可以更系统地了解反应机制的不同特征及其变化。由于实验测定的重余核的  $R_0$  值随余核质量数减小而下降, 因此计算相对径向动量转移时, 把最重的余核 ( $92\text{MeV}$  的  $^{127}\text{Cs}$  和  $71\text{MeV}$  的  $^{129}\text{Cs}$ ) 的反冲速度看作为复合核速度, 而余核平均反冲速度与复合核速度之比  $v_R/v_{\text{CN}}$  即为相对径向动量转移  $P_{\text{trans}}/P_{\text{CN}}$ 。计算结果见图 4 和图 5。已经知道中心碰撞发生全熔合反应, 导致生成最重的余核; 擦边碰撞发生少数核子直接反应, 产生最轻的近靶余核。因此, 图 4 和图 5 实际上反映了径向动量转移和反冲角随碰撞参数的变化。

作为本工作的小结, 从图 4 和图 5 出发, 可以这样描述  $^{16}\text{O}$  离子和  $^{115}\text{In}$  的相互作用: 在  $^{16}\text{O}$  和  $^{115}\text{In}$  近中心碰撞时, 发生全部动量转移的全熔合, 生成质量数接近复合核质量的重余核沿束流方向出射, 形成了重质量区相当于全部动量转移和  $0^\circ$  反冲角的“坪” (见图 4 和图 5)。当碰撞参数逐渐增加时, 主要是  $^{12}\text{C}$  和  $^8\text{Be}$  的非完全熔合开始和全熔

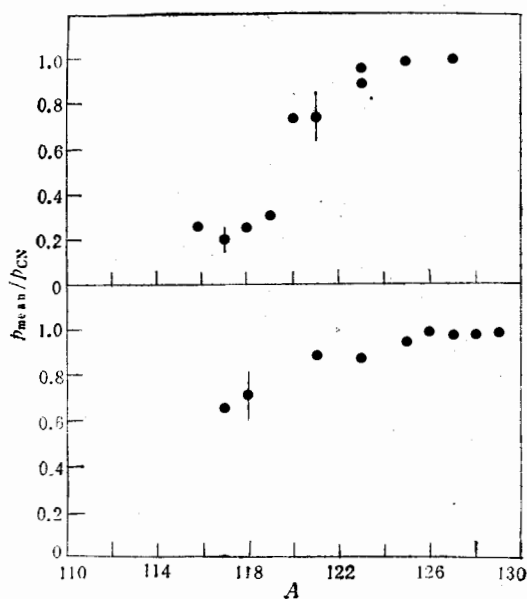


图 4 相对径向动量转移与余核质量数的依赖关系

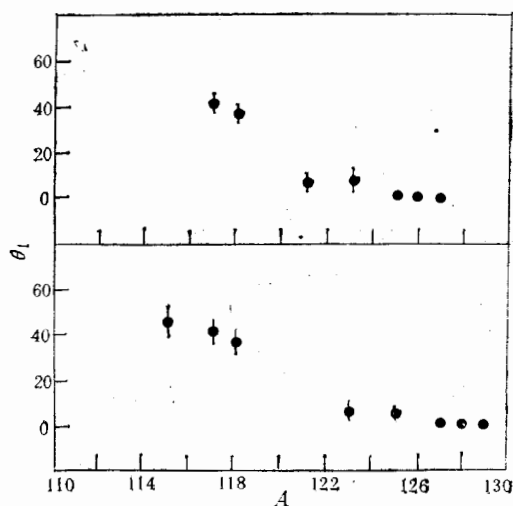


图 5 反冲角与余核质量数依赖关系

合竞争,产生的中等质量余核的微分射程谱,除了相当于全熔合的长射程成份外,还出现了短射程成份,使得平均径向动量转移逐渐下降。由于非对心碰撞,产生的横向动量使余核偏离束流方向以小角度出射。非完全熔合得到一定的中间态的核相继蒸发中子,形成实验观察到的具有接近反冲性质的同位素。随着碰撞参数进一步增加,全熔合完全消失,代之以  $^4\text{He}$  的非完全熔合,径向动量转移进一步下降。相反,横向动量的增加使余核出射角增大。最后,在远距离作用中通过直接反应交换少数核子形成近靶产物,同时径向动量转移降到最低,在  $92\text{MeV}$  时,仅为初始动量的 20% 左右。由此可见,随着碰撞参数增

大, 反应机制从全熔合经过质量和动量转移逐渐减小的非完全熔合反应向擦边碰撞中直接转移反应连续过渡。

本工作中来源于全熔合的余核截面仍占绝对优势。但是, 中等质量余核的微分射程分布出现明显的短射程成份, 它们的角分布在偏离  $0^\circ$  的小角度处成峰, 这些非完全熔合的迹象在我们前一个  $^{16}\text{O} + ^{63}\text{Cu}$  反应的实验中没有被如此明显地看到。可见与  $^{16}\text{O} + ^{65}\text{Cu}$  反应相比,  $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$  反应中非完全熔合反应的贡献明显增加。这显示了非完全熔合与靶质量, 或弹-靶系统不对称性的依赖关系。本工作得到的这些结果对进一步深入研究非完全熔合反应是很有意义的。

葛素仙和鲍丽为本实验制备了 In 靶和全部 Al 收集箔, 胡松樵和董成富在数据获取中给予了热心的帮助, SFC 全体运行人员为本实验照射提供很好条件, 谨表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- [1] J. M. Alexander and L. Winsberg, *Phys. Rev.*, **121**(1961)529.
- [2] H. Britt and A. Quinton, *Phys. Rev.*, **124**(1961) 877.
- [3] T. Inamura et al., *Phys. Lett.*, **68B**(1977)51.
- [4] D.J. Parker et al., *Phys. Rev.*, **C30**(1984) 143.
- [5] D.J. Parker et al., *Phys. Rev.*, **C35**(1987) 161.
- [6] D.J. Parker et al., *Phys. Rev.*, **C39**(1989) 2256.
- [7] 李文新等, 高能物理与核物理, **15**(1991)329.
- [8] L.C. Northcliffe and R.F. Schilling, *Nucl. Data Table*, **7A**(1970).
- [9] 李文新, 孙彤玉, 原子能科学技术, **24**(1990)60.
- [10] 孙彤玉等, 高能物理与核物理, **14**(1990)64.
- [11] U. Reus and W. Westmeier, *At. Data and Nucl. Data Table*, **29**(1983).
- [12] F. Porto and D. Sambataro, *Nucl. Phys.*, **A357**(1981) 237.
- [13] P.M. Strudler et al., *Phys. Rev.*, **154**(1967) 1126.
- [14] D. Gardes et al., *Phys. Rev.*, **C21**(1980) 2447.

## Complete and Incomplete Fusion in the Reaction of $^{115}\text{In}$ with $^{16}\text{O}$ Ions

Li Wenxin Sun Tongyu Wu Dingqing Zhao Lili Jin Genming

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

Received on January 7, 1993

### Abstract

Angular distributions and differential range distributions have been measured with nuclear chemistry techniques for 20 target residues from the reactions of  $^{115}\text{In}$  with 92 and 71 MeV  $^{16}\text{O}$  ions. In terms of the increase of impact parameter, the results indicate continuous evolution of the reaction mechanisms from complete fusion, incomplete fusion to direct reaction involving steadily decreasing transfer of mass and momentum. Contribution of incomplete fusion in  $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$  reaction is significantly larger than that in  $^{16}\text{O} + ^{65}\text{Cu}$  reaction.

**Key words**  $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$ , complete fusion and incomplete fusion, off-line  $\gamma$ -spectroscopy, differential range distribution, angular distribution.