

$^{12}\text{C} + ^{115}\text{In}$ 反应中余核 I 和 Sb 的反冲研究

孙彤玉 李文新 董天荣 靳根明

傅民 孙秀华 孙锡军

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

摘 要

在能量高达 72MeV 的 ^{12}C 轰击 ^{115}In ($Z = 49$) 的反应中, 使用核化学技术测量了 ^8Be 和 α 转移的余核碘 ($Z = 53$) 和铈 ($Z = 51$) 同位素的激发函数和角分布. 用简单的运动学方法分析了余核角分布后指出, 碘同位素来自三种不同的反应机制, 即复合核蒸发 α , 强阻尼的非完全熔合以及不完全动量转移的裂开-熔合过程. 在入射能量约 70MeV 时, 后两个过程 (或统称为 ^8Be 转移) 的截面为 100 多毫巴, 显著大于根据铈同位素截面导出的大约 17 毫巴的 α 转移反应截面. 实验结果和类似反应中测量出射 α 粒子得到的结论很好相符.

引 言

在较轻的重离子特别是 ^{12}C 引起的核反应中, α 粒子出射是一个主要反应道. 实验测到的 α 截面比预言的蒸发 α 截面大得多的现象引起了人们广泛的兴趣^[1-7]. 根据实验测定的 α 粒子角分布和能谱可以看到出射的 α 起源于若干不同的反应机制: 大角度微分截面趋于常数, 这是复合核蒸发 α 机制, 其角分布为各向同性或 90° 对称; 角分布在擦边角附近成峰, 这是转移反应的特征; 当入射能量较高时, α 粒子在前角成峰, 其能量和它原来入射速度相当. 非蒸发的后两种 α 粒子的来源可以用非完全熔合反应机制来解释^[4,6].

基于 ^{12}C 具有 3 个 α 集团结构的特殊性, 在 ^{12}C 引起的重离子反应中, 存在着两种转移反应导致出射 α 的可能性: 即 ^8Be 转移出射 α 和 α 转移出射 ^8Be , 后者立即分裂成两个 α . 为了区别这两种过程, 在实验中需要用 $\Delta E-E$ 中孔探测器进行 α - α 符合测量, 结果表明, ^8Be 转移截面显著大于 α 转移截面^[2-4]. 专门研究反应余核的核化学技术提供了另一种区别手段, 因为这两种转移过程产生的余核是完全不同的两个元素.

核化学技术的最大特点是它能毫不含糊地鉴定反应产物的核电荷 Z 和质量数 A , 并能得到这些产物的生成截面数据. 当使用反冲方法时, 还可以测定反冲余核的角分布和射程(能量)分布, 从而可以补充和完善根据测量出射粒子获得的关于反应机制的资料. 由于这些原因, 核化学技术在重离子反应机制研究中得到广泛应用^[6-8]. 本工作用核化学方

法测定了 ^{12}C 和 ^{115}In 相互作用中 ^8Be 和 α 转移余核碘和铟同位素的激发函数以及它们反冲的角分布。并将实验结果和测量出射 α 粒子的研究结果进行了比较, 以便进一步了解 ^{12}C 离子引起核反应的机制。

实 验

用真空喷涂法将天然金属铟(含 ^{115}In 95.72%) 制成无衬和 Al 衬两种靶子。Al 衬厚度为 $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$, 靶厚用称重法确定。在激发函数的测定中, 使用水冷却的多层靶子和 Al 收集箔叠在一起的靶组, 每片靶厚约 $2.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 。在测量角分布的实验中, 使用了直径为 4mm 的束流准直光栏, 靶厚约 $800\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。从靶中反冲出来的产物被离靶 15cm 处的同心环状 Al 箔所收集。每个 Al 环对靶子的张角为 5° , 角分布测量范围从 5° 到 55° 。

实验在近代物理研究所 1.5m 重离子回旋加速器上进行。 ^{12}C 离子最高能量为 72MeV, 低能 ^{12}C 用一定厚度的 Al 降能箔获得, 有效 ^{12}C 离子能量根据已知的射程能量关系计算^[11]。束流强度用法拉第筒并通过多定标方式记录。典型束流强度为 $0.2-0.5\mu\text{A}$ 。照射时间为 20 分钟到 4 小时不等。

照射结束后, 将靶子和 Al 收集箔(在角分布实验中则仅仅是 Al 收集箔) 溶解于含有已知量 I 和 Sb 载体的 HCl 或 NaOH 中。I 的分离和纯化基于 CCl_4 萃取^[12]。在碱性溶液中用 NaOCl 将低价 I 全部氧化到 IO_4^- , 以达到同位素交换平衡。 HNO_3 酸化后, 用 $\text{NH}_2 \cdot \text{HCl}$ 还原 I 到元素态, 并萃取到 CCl_4 中。再用稀的 NaHSO_3 溶液反萃取, 最后在加热情况下用 AgNO_3 沉淀出 AgI 。Sb 在 4N 的 HCl 中用还原铁粉还原成金属铟^[13]。沉淀溶于王水, 经稀释后, 通以 H_2S 沉淀出 Sb_2S_3 。重复硫化铟的沉淀过程, 最后溶于 HCl, 在 3N 的 HCl 中加入新制备的 CrCl_2 溶液还原出金属铟。沉淀出的 AgI 和金属铟分别经过过滤、干燥和称重以确定化学产额。

分离得到的样品用 2—4 台 Ge (Li) 或高纯 Ge γ 探测器和 PLURIMAT-N 或 MULTI-8 组成的系统进行 γ 测量, 探测效率用原子能研究所提供的一套标准源刻度, 计算截面使用的核素的半寿命和 γ 射线绝对强度取自文献 [14], 列在表 1 中。

表 1 碘和铟一些同位素的蜕变特征

核 素	半 寿 命	γ 射线能量 (keV)	γ 射线强度
$^{116}\text{Sb}^m$	60.3 分	407.4	42
^{117}Sb	2.80 小时	158.6	86.3
$^{118}\text{Sb}^m$	5.00 小时	1050.7	96.5
		1229.6	100
^{119}I	18.0 分	257.5	94.0
$^{120}\text{I}^A$	1.35 小时	641.1	9.1
$^{120}\text{I}^B$	53 分	614.7	67
^{121}I	2.12 小时	212.5	84.3
		531.9	6.15

结果和讨论

本实验鉴定了 $^{116}\text{Sb}^m$, ^{117}Sb 和 $^{118}\text{Sb}^m$ 3 个锑同位素以及 ^{119}I , $^{120}\text{I}^A$, $^{120}\text{I}^B$ 和 ^{121}I 4 个碘同位素。在 39—72 MeV 轰击能量范围内的若干个能量下测定了它们的截面, 由此得到的激发函数见图 1。在 69.2 MeV 下 ^{117}Sb 和 $^{118}\text{Sb}^m$ 的角分布(实验室系, 下同)见图 2。在 66 MeV、69 MeV 和 72 MeV 3 个轰击能量下测定了 $^{120}\text{I}^A$, $^{120}\text{I}^B$ 和 ^{121}I 的角分布。3 个核素的角分布形状完全相似, 图 3 是 ^{121}I 在这 3 个轰击能量下的角分布。

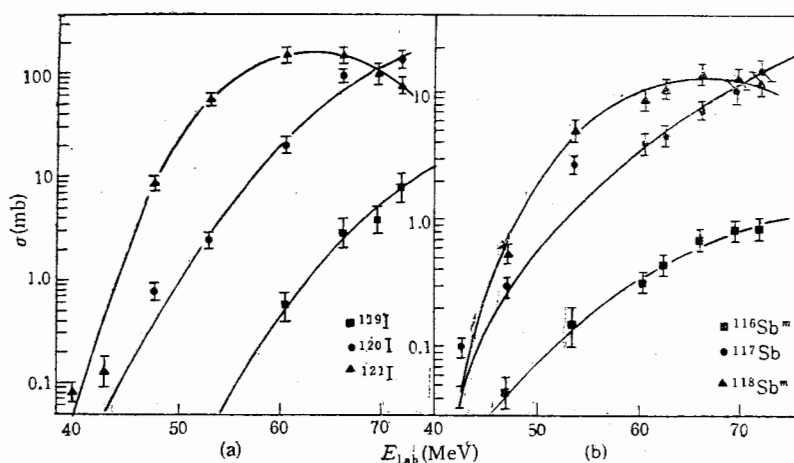


图 1 ^{12}C 和 ^{115}In 相互作用中 I(a) 和 Sb(b) 同位素的激发函数

从图 1 的激发曲线看到, 截面基本上随入射能量增加而增加, 清楚表明这些余核的生成都存在着直接反应的贡献。Sb 同位素的生成有两种可能, 或者是 α 转移到靶子接着蒸发 1—2 个中子, 或者是复合核蒸发带电粒子和中子接着进行级联 β^+ 或电子俘获蜕变。图 2 中 $^{118}\text{Sb}^m$ 的角分布大约在 40° (实验室系) 成峰, 这显然是 α 转移特征。事实上, $^{118}\text{Sb}^m$ 是屏蔽核, 不可能由其他核素通过级联 β^+ 或电子俘获蜕变而生成。与 $^{118}\text{Sb}^m$ 不同, ^{117}Sb 角分布除了近似在 40° 成峰外, 微分截面随角度减小而增加并显示在 0° 成峰。后者是复合核形成机制的特征。因为 ^{117}Sb 的母体 ^{117}Te 以大约 60 分钟半寿命蜕变到 ^{117}Sb , 而 ^{117}Te 在相当程度上是通过复合核蒸发粒子和一系列蜕变而生成。由此可见, 本实验中 ^{117}Sb 大部分起源于和复合核有关的过程, 少部分是 α 转移反应生成的。这和 Strudler 等人在 $^{12}\text{C} + ^{115}\text{In}$ 反应中测定 ^{117}Sb 反冲射程的结果相吻合^[8]。

从图 2 可以大致估计在 69.2 MeV 轰击能量下, 大约 28% 的 ^{117}Sb 来自 α 转移反应。因此, 由实验测定的 Sb 同位素截面求和可以得到, 当入射 ^{12}C 能量为 69.2 MeV 时, α 转移截面为 $17 \pm 5 \text{ mb}$ 。这个值可能偏低一些, 因为它没有包括实验未测到的 $^{118}\text{Sb}^m$ (半寿命为 3.6 分钟) 的贡献。但是这个值和 $^{12}\text{C} + ^{124}\text{Sn}$ 反应测到的 ^8Be 出射(即 α 转移)截面 $22 \pm 4 \text{ mb}$ 大致相当。

在 $^{12}\text{C} + ^{115}\text{In}$ 反应中, 当入射 ^{12}C 最高能量为 72 MeV 时, 形成复合核 ^{127}Cs 的激发

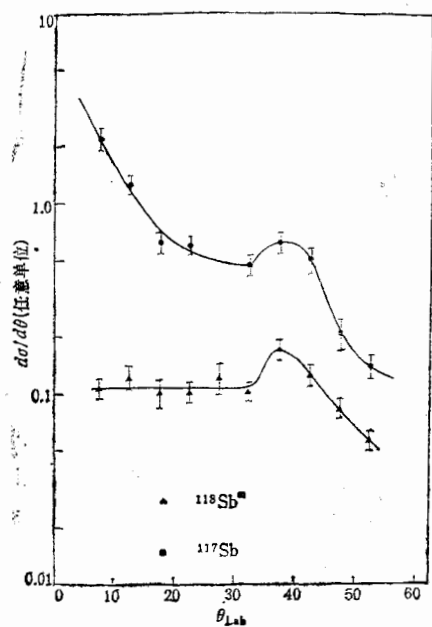


图 2 $69.2\text{MeV } ^{12}\text{C} + ^{115}\text{In}$ 反应中 ^{117}Sb 和 $^{118}\text{Sb}^m$ 的角分布

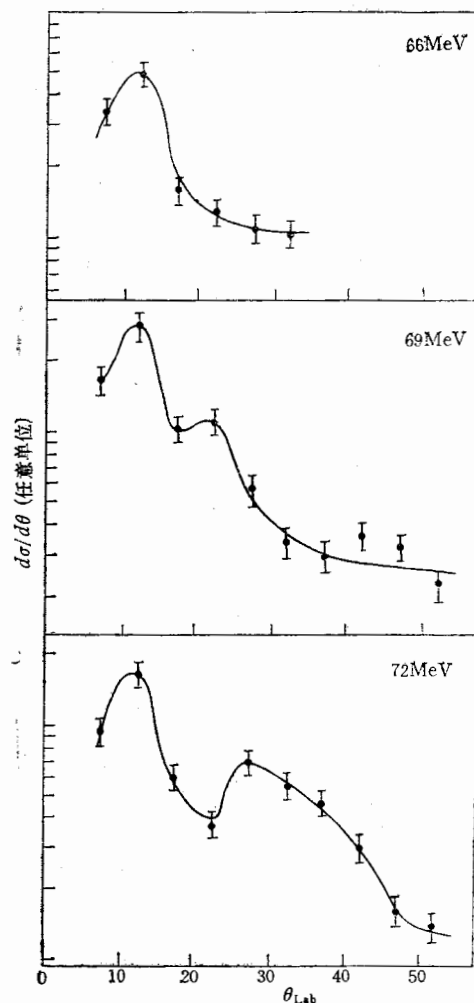


图 3 $^{12}\text{C} + ^{115}\text{In}$ 反应中 ^{121}I 的角分布

能为 62MeV 。根据能量平衡计算,最可几的中子蒸发数为 $4-5$ 。因此,实验测定的 ^{119}I , $^{120}\text{I}^A$, $^{120}\text{I}^B$ 和 ^{121}I 不可能是复合核蒸发 $6-8$ 个中子得到 $^{119-121}\text{Cs}$ 再经级联 β^+ 蜕变产生。用快速化学分离 $^{12}\text{C} + ^{115}\text{In}$ 反应生成的 Xe 同位素的 γ 谱也未能检测到 $^{119-121}\text{Cs}$ 蜕变到 $^{119-121}\text{I}$ 的中间产物 ^{120}Xe 和 ^{121}Xe 也证实了这一点^[15]。由于排除了这个反应道产生 $^{119-121}\text{I}$ 同位素的可能性,所以 I 同位素的角分布在 0° 不应该成峰,这和实验测量结果相一致(见图 3)。

碘同位素起源于几种不同的反应机制。首先是通过复合核形成,接着蒸发 1 个 α 粒子和几个中子。在蒸发 α 时给反冲的复合核一个动量,使余核有一个角度分布。和 Bimbot 在 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 工作中所作的分析一样^[9],这个分布的极大值 θ_{\max} 用 $\langle\theta^2\rangle = 2\langle V_\alpha\rangle^2/3V_{\text{CN}}^2$ 计算。这里 θ 是 α 蒸发后余核对束流方向的实验室系反冲角, $\langle\theta^2\rangle$ 是 θ^2 的平均值, V_{CN} 是蒸发 α 以前复合核的反冲速度, V_α 是由于 α 蒸发使余核产生的反冲速度。这里,

假定 α 蒸发在质心系各向同性, 并且余核反冲角不受随后中子蒸发的影响。蒸发的 α 粒子能量按它和余核的库仑位垒计算, 其中 r_0 取 1.4 费米。当入射 ^{12}C 为 66MeV 和 72MeV 时, 计算得到 θ_{\max} 分别为 14° 和 13° , 和实验测定的 I 同位素角分布主要峰位在 13° 附近相一致。

I 同位素生成的另一种方式是 ^{12}C 核中 ^8Be 集团转移给靶核, 结果得到的角分布可用简单的描述转移反应的两步模型预言。Hahn 等人曾用这个方法解释了 $^{12}\text{C} + ^{239}\text{Pu}$ 反应中生成的 ^{244}Cf 和 ^{245}Cf 的角分布^[10]。根据这个模型, 反应第一步, 入射 ^{12}C 和靶核作用, 把它的动量转移给合成系统, 形成一个速度为 V_{R1} 的余核(见图 4)。第二步, ^{12}C 中的 α 集团和留下的余核之间发生卢瑟福散射, α 以一定的出射速度沿质心角 ϕ 飞开, 余核

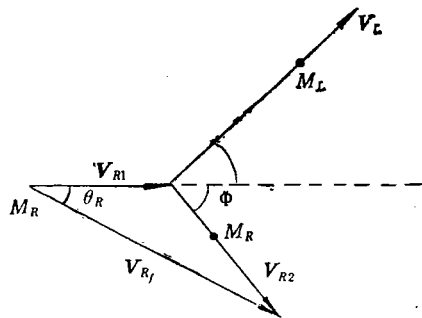


图 4 二步转移模型的速度矢量图示

得到又一次反冲速度 V_{R2} 。两个过程的结果使余核得到合成速度 V_{Rf} , 形成实验室反冲角 θ_R 。用二步模型计算反冲角时还依赖于更详细的反应机制的假设。已经知道, ^{12}C 和中重靶核相互作用时, 当入射能不很高时, 各向异性的出射 α 在接近擦边角成峰, 具有转移反应特征, 但 α 能谱又有蒸发特点, 即 α 最可几能量接近它和余核的库仑能^[4]。这些 α 粒子的来源可以用强阻尼粘合转动的非完全熔合反应来解释^[4]。根据这个模型, 入射 ^{12}C 离子受到全阻尼, 全部动量转移给复合体系, ^{12}C 和靶核的切向摩擦使复合体系转动到一定角度时, 由于强烈形变从 ^{12}C 分离出的 α 集团在库仑力和离心力作用下发射出去, 余下的 ^8Be 就和靶核结合在一起。根据这个熔合-裂开过程, 并由 $^{12}\text{C} + \text{Ag}$ 和 $^{12}\text{C} + ^{124}\text{Sn}$ 的测量出射 α 的实验结果, 取 α 出射角为 50° (质心系), α 的动能为 17MeV^[4,7]。当 ^{12}C 入射能量在 66—72MeV 时, 由两步模型计算得到余核成峰角为 15° — 16° , 与 I 同位素的实验角分布很接近。由此可见, 在 $^{12}\text{C} + ^{115}\text{In}$ 反应中余核 I 的角分布和测量出射 α 粒子的实验得出的如下结论相一致: 当入射 ^{12}C 能量超过库仑位垒不很多时, 出射的 α 来源于全熔合蒸发和强阻尼非完全熔合过程^[2-4]。但是在本实验中, 这两种反应机制无法进一步区分。

在较高入射能量下, I 同位素在大角度成峰是特别有趣的。正如从图 3 看到的, 在 66MeV 时, 余核 I 只有一个在 13° 附近的峰。轰击能量增加到 69MeV 时, 除了 13° 附近的峰外, 在 23° 附近显示一个肩。到 72MeV 时, 在 28° 附近存在一个明显的峰。在 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中, 反冲余核 ^{99}Rh 和 ^{100}Rh 也显示出相似的角分布^[16]。这表明随着入射能量增加出现了导致靶核增加 4 个核电荷的另一种反应机制。从出射 α 的实验研究结果

知道,当入射能量超过库仑位垒较多时,非蒸发成分的 α 粒子角分布从擦边角成峰变为前角成峰, α 粒子能量从接近库仑能变为具有入射炮弹原有的速度. 这些 α 粒子的形成可以用裂开-熔合过程解释^[6]. 即入射 ^{12}C 能量较高时, 由于和靶核强烈作用首先破裂成 ^8Be 和 α 两个结团, 其中 ^8Be 和靶核熔合, 余下的 α 继续以原有的入射速度向前运动, 在 $\frac{d\sigma}{d\Omega}-\theta$ 图上形成前峰角. 这部分 α 粒子传递结余核的横向动量比以擦边角出射的 α 给余核的少, 但是由于 α 粒子速度较大, 特别是因为只有部分入射动量转移给靶核, 使得合成系统速度 V_{R_1} 显著低于强阻尼碰撞后合成系统的速度, 还是可能导致余核在较大角度成峰. 根据最近发表的 $70\text{MeV } ^{12}\text{C} + ^{112,114}\text{Sn}$ 反应中出射 α 的实验数据^[7], 我们使用上述二步转移过程假设详细计算了每个角度出射的 α 粒子所对应余核的出射角. 当假定 2/3 的 ^{12}C 入射动能转移给合成系统时, 计算指出, 与裂开-熔合机制出射的 α 粒子相对应余核在 $\frac{d\sigma}{d\Omega}-\theta$ 的角分布图上约 25° 处成峰. 这和本实验测量结果基本相符. 如果考虑 α 粒子能量分布, 余核成峰角有向更大角度移动的趋势. 根据 ^{12}C 引起的反应中出射 α 粒子的系统研究^[17], 当入射能高于库仑位垒 10MeV 时, 裂开-熔合过程才开始出现. 本实验用 $66\text{MeV } ^{12}\text{C}$ 轰击 ^{115}In 时, 入射能高出库仑位垒约 17MeV , 这时非蒸发成分的 α 主要通过强阻尼过程发射, 裂开-熔合过程的贡献还比较小, 余核角分布也未能明显看到该过程的存在. 当入射能增加到约 70MeV 后, 裂开-熔合反应截面迅速增加, 使其成为一个主要的反应机制, 因而在 25° 附近出现明显的峰. 由此还可见, 裂开-熔合反应对入射能的变化是非常灵敏的.

综上所述, 在能量高达 72MeV 的 ^{12}C 和 ^{115}In 相互作用中, 碘同位素来自三种不同反应机制: 复合核蒸发 α , 强阻尼粘合转动的熔合-裂开过程以及不完全动量转移的裂开-熔合过程. 后两类过程可统称为 ^8Be 大质量转移. 根据碘同位素的激发函数, 大约 $70\text{MeV } ^{12}\text{C}$ 入射能量下, 碘同位素总生成截面为 240mb . 在这个靶质量区和入射能量下, 复合核蒸发 α 截面约为 100mb ^[4]. 因此, 扣除这个贡献后, 由 ^8Be 转移生成碘同位素的截面大约为 100 多 mb , 显著大于根据锑同位截面测定的 α 转移截面 (17mb). 这个结论和根据测量 α 出射实验得到的结论相一致^[2-4].

郑蔓苕参加早期部分实验, 葛素仙制备了靶, 谨表示深切谢意. 我们还感谢加速器运行组和多道组在工作中的支持和帮助, 以及梁国照和戴光曦对本工作的关心和有益的讨论.

参 考 文 献

- [1] H. C. Britt and A. R. Quitor, *Phys. Rev.*, **124**(1961), 877.
- [2] 沈文庆等, 高能物理与核物理, **1**(1977), 70.
- [3] 王大延等, 高能物理与核物理, **6**(1982), 609.
- [4] 戴光曦等, 高能物理与核物理, **7**(1983), 86.
- [5] 靳根明等, 高能物理与核物理, **9**(1985), 207.
- [6] 戴光曦等, Heavy Ion Fusion Reaction, in *Proceeding of the Tsukuba International Symposium* (1984), p. 218.
- [7] 王大延等, 高能物理与核物理, **10**(1986), 68.

- [8] P. M. Strudler, I. L. Preiss and R. Walfgang, *Phys. Rev.*, **154**(1966), 1129.
[9] R. Bimbot et al., *Nuclear Physics*, **A189**(1972), 193.
[10] R. L. Hahn et al., *Phys. Rev.*, **C10**(1974), 1889.
[11] L. C. Northcliffe and R. Schilling, *Nucl. Data Table*, **1**(1970), 233.
[12] L. E. Glendenin and R. P. Metcalf, NAS-NS-3005(1960).
[13] A. S. Newton and W. R. McDonell, NAS-NS-3033(1960).
[14] U. Reus et al., Gamma-Ray Catalog, GSI-Report, 79-2.
[15] 谢秀君等,核化学与放射化学, **5**(1983), 25.
[16] 孙锡军等,私人通讯.
[17] 靳根明,近代物理研究所1985年年报.

RECOIL STUDY OF RESIDUAL NUCLEI I AND Sb IN THE REACTION INDUCED BY ^{12}C ON ^{115}In

SUN TONG-YU LI WEN-XIN DONG TIAN-RONG JIN GEN-MING

FU MING SUN XIU-HUA SUN XI-JUN

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

ABSTRACT

Excitation functions and angular distributions of the residual nuclei I and Sb were measured in the reaction of ^{12}C on ^{115}In at energies up to 72 MeV using radiochemical techniques. A kinematic analysis of the angular distributions showed probable mechanisms leading to productions of I and Sb isotopes.

○
○
稱
一
和
成
模
果
有
的
核
能
组
中
形
子
子
(

这