

42 MeV/u ^{12}C 与 ^{115}In 相互作用的靶余核*

尹新民 罗清政 李文新 赵莉莉 孙儒林 孙彤玉 吴定清

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

使用放射化学方法测定了 42 MeV/u ^{12}C 与 ^{115}In 相互作用靶余核的生成截面, 得到了质量分布及同位素分布. 实验得到的质量分布与使用级联的两体衰变模型 GEMINI 程序计算的结果很好地相符. 根据同位素分布的系统性, 对利用中能重离子反应生成新的远离 β 稳定线的缺中子核素进行了讨论.

一、引 言

近年来, 萨本豪等人将原来适用于高能反应的熔合碎裂统计模型进行拓广, 成功地用于重离子碰撞中形成热核的衰变研究. 这个熔合碎裂模型也很好地区分了 35 MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应的靶余核质量分布的实验结果^[1]. 最近我们用熔合碎裂模型成功地再现了 47 MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 和 ^{93}Nb 反应的质量分布^[2,3]. 另一方面, 作为低能反应机制合乎逻辑的演化, Moretto 等人从描述低能重离子反应的统计蒸发理论出发, 提出了统计的级联两体衰变理论. 该模型成功地解释了入射能为 10—100 MeV/u 的许多反应实验结果^[4—6]. 最近 D. R. Bowman 等人使用该模型的 GEMINI 程序很好地符合了 50—100 MeV/u $^{139}\text{La} + ^{12}\text{C}$ 反应中生成中质量碎片的生成截面^[7]. 但迄今尚未看到它与实验测定的靶余核质量分布相符合的成功先例^[8].

本工作使用放射化学分离和离线 γ 能谱法, 测定了 42 MeV/u $^{12}\text{C} + ^{115}\text{In}$ 反应靶余核的生成截面. 以便观察级联两体衰变模型是否能再现实验测定的靶余核的质量分布, 同时探索余核生成规律, 为用中能重离子反应合成远离 β 稳定线的新核素提供一些有关截面估计的资料.

二、实 验

靶组由三个铝衬钢靶组成, 每个钢的厚度约为 15—20 mg/cm² (含 95.3% 的 ^{115}In), 纯度为 99.99%. 照射是在中国科学院近代物理研究所的 HIRFL 上进行的. 由加速器引出的 47 MeV/u 的 ^{12}C 束流到达中间一个钢靶中心处的能量为 506 MeV ($\sim 42\text{MeV/u}$)^[9].

* 国家自然科学基金资助.

本文 1992 年 7 月 20 日收到.

照射持续 622 min, 典型束流强度为 5 enA. 总的积分束流为 183 μC 或 1.9×10^{14} 个离子.

照射结束后, 中间的靶用于直接 γ 能谱测量, 其余的两个靶分别使用硫化氢系统分析法和 AgCl 沉淀进行化学分离. 最后得到铜组、铟组、碱土金属组、碱金属组及银组 5 个样品. 样品的 γ 活性分别用 4 台效率已刻度过的 HPGE 探测器测量, 测量持续了 33d. 实验细节和数据处理已在文献[10]中详细描述, 产额计算所使用的核数据引自文献[11].

三、结 果

1. 截面

本次实验共测得了 65 个放射性核素的截面(见表 1), 表中给出的误差为标准偏差, 一般在 10%—15% 的范围内, 包括 γ 能谱的分析、衰变曲线的分解和 5% γ 探测效率的误差. 靶厚、束流测量和化学产额的误差均没有考虑.

表 1 实验中测得的截面(mb)

核素	类型	截面	核素	类型	截面
^{48}V	C+	0.24 ± 0.04	^{100}Ag	C+	4.50 ± 0.13
^{57}Co	C+	0.49 ± 0.20	$^{101}\text{Rh}^m$	C+	48.0 ± 5.3
^{67}Ga	C+	1.06 ± 0.34	$^{101}\text{Rh}^g$	I	20.2 ± 3.0
^{72}As	PC+	1.03 ± 0.20	^{101}Pd	C+	75.4 ± 12.9
^{73}Se	PC+	0.83 ± 0.13	$^{101}\text{Ag}^g$	C+	14.1 ± 5.6
^{75}Se	C+	1.87 ± 0.30	$^{102}\text{Ag}^g$	PC+	37.9 ± 5.2
^{76}Br	PC+	2.07 ± 0.33	$^{103}\text{Ag}^g$	C+	74.4 ± 7.0
$^{81}\text{Rb}^g$	PC+	4.01 ± 0.46	^{103}Ru	C-	0.64 ± 0.12
$^{82}\text{Rb}^m$	I	2.98 ± 0.66	$^{104}\text{Ag}^g$	PC+	67.9 ± 3.8
^{83}Rb	C+	7.61 ± 0.12	^{104}Cd	C+	47.3 ± 6.4
^{83}Sr	C+	6.35 ± 1.37	^{105}Rh	C-	0.88 ± 0.25
^{84}Rb	I	0.94 ± 0.20	^{105}Ag	C+	109.2 ± 5.8
^{84}Y	C+	3.55 ± 0.52	$^{106}\text{Rh}^m$	I	3.68 ± 1.24
^{85}Sr	C+	10.7 ± 1.5	$^{106}\text{Ag}^m$	I	34.9 ± 2.2
^{86}Y	PC+	14.4 ± 2.9	$^{108}\text{In}^m$	I	38.8 ± 2.8
$^{89}\text{Zr}^g$	C+	24.6 ± 2.9	$^{108}\text{In}^g$	PC+	91.8 ± 18.8
^{90}Nb	PC+	30.3 ± 5.4	$^{109}\text{In}^g$	C+	77.1 ± 5.8
^{90}Mo	C+	5.37 ± 0.43	$^{110}\text{Ag}^m$	I	4.05 ± 0.46
$^{92}\text{Nb}^m$	I	0.48 ± 0.12	^{110}In	I*	56.3 ± 2.3
$^{92}\text{Nb}^g$	I	16.0 ± 3.86	^{111}Ag	C-	0.41 ± 0.19
$^{93}\text{Tc}^g$	PC+	20.9 ± 1.7	$^{111}\text{Cd}^m$	PC+	35.5 ± 4.5
$^{93}\text{Mo}^m$	I	17.9 ± 1.2	$^{111}\text{In}^g$	C+	124.0 ± 13.6
$^{94}\text{Tc}^g$	I	32.6 ± 2.5	^{112}In	I	67.6 ± 10.8
^{94}Ru	C+	5.99 ± 1.03	$^{113}\text{In}^m$	PC+	7.93 ± 0.92
$^{95}\text{Tc}^g$	PC+	57.0 ± 8.0	$^{113}\text{Sn}^g$	C+	95.8 ± 10.9
^{95}Ru	C+	21.8 ± 3.0	$^{114}\text{In}^m$	I	153.4 ± 13.4
^{96}Tc	I	23.4 ± 1.6	^{115}Cd	C-	0.39 ± 0.07
^{97}Ru	C+	73.7 ± 6.0	^{115}Sb	C+	7.43 ± 1.20
$^{97}\text{Rh}^g$	PC+	18.8 ± 2.5	$^{116}\text{In}^m$	I	14.8 ± 1.5
$^{99}\text{Rh}^m$	C+	81.2 ± 6.8	$^{116}\text{Sb}^m$	I	2.85 ± 0.23
$^{99}\text{Rh}^g$	I	7.04 ± 0.65	$^{117}\text{Sn}^m$	C-	6.73 ± 1.39
$^{100}\text{Rh}^g$	PC+	34.4 ± 2.1	^{117}Sb	PC+	1.57 ± 0.37
^{100}Pd	C+	46.3 ± 2.4			

C+: 累积产额, 包括大部分缺中子子体的截面; PC+: 部分累积产额;

C-: 累积产额, 包括大部分丰中子子体的截面; I: 独立产额;

* 4.9h 的同质异能态.

2. 电荷分布和质量分布

假定同量异位素的独立产额 $\sigma(Z, A)$ 可用高斯函数描述:

$$\sigma(Z, A) = \sigma(A) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2(A)}} \exp\left\{-\frac{[Z - Z_P(A)]^2}{2\sigma_z^2(A)}\right\}, \quad (1)$$

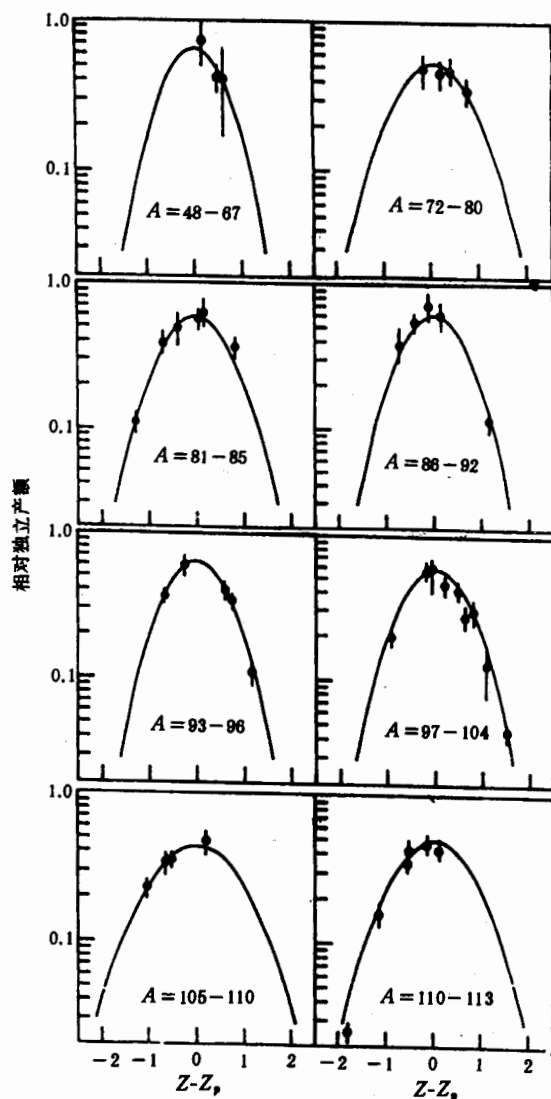


图 1 各质量区间的电荷分布

这里 $\sigma(A)$ 为质量产额, σ_z 为高斯分布的宽度参数, $Z_P(A)$ 为该质量链的最可几电荷, 并用下式

$$Z_P(A) = K_0 + K_1 A + K_2 A^2 \quad (2)$$

计算, 其中 K_0, K_1, K_2 为可调系数, A 为质量数. 将实验测定的核素按质量数分为八个质

量区间. 在每个小质量区按文献[12]叙述的方法计算. 图1给出了8个质量区电荷分布的计算结果. 表明上述的电荷分布假设和计算结果是合理的.

将高斯电荷分布函数积分, 得到了各质量链的质量产额.

四、讨 论

1. 同位素分布

在电荷分布计算中, 得到了一些元素的独立产额给出在图2中. 同位素的独立产额可用同位素的高斯函数来描述.

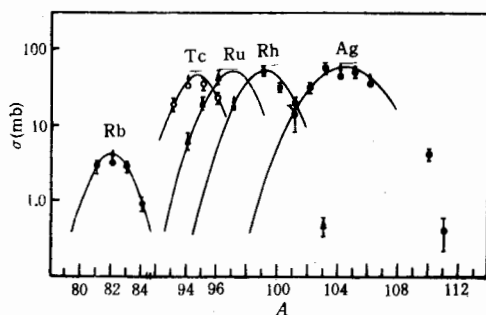


图2 实验得到的靶余核的同位素分布

拟合结果(见图2)指出, 同位素分布的宽度参数随着原子序数的增加而增加. 如Rb、Tc、Ru、Rh和Ag同位素分布的宽度参数分别为1.17、1.20、1.36、1.49和2.0. 用最小二乘法拟合同位素分布的最可几质量数 A_p 与原子序数 Z 的关系为:

$$A_p = 0.569 + 2.19 \times Z \quad (3)$$

用该式计算低靶同位素分布的最可几质量数 A_p 与用文献[13]的经验公式的计算结果很接近. 值得注意的是比靶核原子序数低两个

质量单位的银同位素有相当高的生成截面和较大的分布宽度, 因此, 利用中能重离子和缺中子同位素靶相互作用, 有可能为合成某些远离 β 稳定线的新的缺中子核提供一个新的途径.

2. 质量分布的理论计算

质量分布的理论计算使用的是Monte Carlo GEMINI程序^[14]. 该程序假设复合核的衰变是通过一系列的两体衰变, 在每一步的衰变中, 都考虑了从蒸发轻粒子、复杂碎片发射到对称裂变的所有可能的两体衰变. 每次衰变, 重的次级碎片($Z > 2$)只要有足够的激发能允许, 两体衰变继续进行. 碎片发射之后剩余的激发能按照两碎片具有相同温度的假设重新分配. 程序中使用的参数和公式在文献[14]中被详细描述了.

放射化学方法测定的质量产额分布包括了各种反应机制的贡献, 不能挑选来自某一特定反应道的核产物. 用全熔合作初始参数计算得到的质量分布见图3(a)实线所示, 虚线是仅考虑轻粒子蒸发退激所期望的余核分布, 实点为实验值. 复合核的最大角动量和最大激发能根据BASS模型估计分别为 $58\hbar$ 和453 MeV^[15]. 由图可见: $A < 90$ 的区域用全熔合的两体发射退激计算得到了很好的解释. 这是由于在此区域里正好是中等质量碎片(IMF), 它与弹、靶都没有明显的关系, 因而几乎没有来自准弹或深部非弹等直接相互作用的贡献. 中等质量碎片区, 理论与实验的完美符合使我们进一步认识到: 中能区高激发能、高角动量的复合核的形成及其两体级联发射退激是复杂粒子发射的可能机制, 全熔合占有重要地位.

众所周知, 随着入射能量的增加, 全熔合逐渐为非完全熔合所代替. $A > 90$ 的质量分

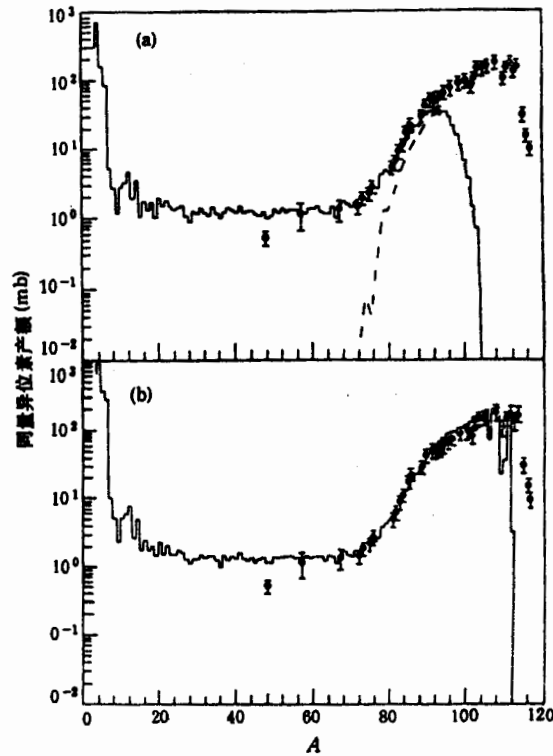


图 3

- (a) 实线为只考虑全熔合; 虚线为轻粒子蒸发的计算结果.
 (b) 实点为测得的质量分布; 实线为级联两体衰变模型比较

布区域主要来自于非完全熔合和直接相互作用的贡献, 我们根据大质量转移模型和求和规则思想考虑了非完全熔合对质量分布的贡献. 这样得到的理论值与实验点的拟合结果如图 3(b) 所示. 参数 $\langle \text{lmt} \rangle_i$ (第 i 个入射道的线性动量转移几率) 的选取参考了 Viola 等人的线性动量转移系统学研究理论^[16-18], 调节给出的从全熔合到转移 ^{10}B 、 ^8Be 、 ^6Li 、 ^4He 、 ^2H 的线性动量转移几率 $\langle \text{lmt} \rangle_i$ 分别为: 0.14、0.14、0.11、0.205、0.33、0.075.

在前面的计算中, $\langle \text{lmt} \rangle_i$ 可能有高达 25% 的不确定性. 按照上面给出的熔合过程所占的几率计算, 平均转移 6.6 个质量单位, 平均线性动量转移为 0.55. 如果考虑了靶质量与线性动量转移之间的依赖关系^[19], 则本工作得到的平均线性动量转移与文献[20]中平均线性动量转移的系统性相符. 这表明, 我们用 GEMINI 计算时选用的参数是合理的. 由于理论上无法定量计算准弹与深部非弹过程的贡献, 因而对 $A > 110$ 的质量区没有进行拟合.

实验结果与理论计算很好地拟合, 表明反应是经过完全熔合和非完全熔合形成复合核后的级联两体衰变过程, 对于该工作, 理论得到的全熔合约占 14%, 表明在该能量下全熔合仍有很大的贡献.

HIRFL 运行人员为本实验的照射提供了良好的条件. 在理论计算中得到了戴光曦研究员的帮助和鼓励. 近代物理所的赵之正、靳根明及北京原子能研究院的李泽、敬克兴和李新华参加了部分实验, 在此表示由衷的感谢.

参 考 文 献

- [1] 萨本豪, 郑玉明, 张孝泽, 高能物理与核物理, **13**(1989), 1117.
- [2] 李文新, 孙彤玉, 戚大海等, 高能物理与核物理, **14**(1990), 745.
- [3] 孙彤玉, 李文新, 吴定清等, 核化学与放射化学, **13**(1991), 208.
- [4] R. J. Charity, et al, *Nucl. Phys.*, **A476**(1988), 516.
- [5] H. Y. Han, et al, *Nucl. Phys.*, **A492**(1989), 138.
- [6] R. J. Charity, K. X. Jing, D. R. Bowman, et al., *Nucl. Phys.*, **A511**(1990), 59.
- [7] D. R. Bowman, G. F. Peaslee, N. C. Lonna, *Nucl. Phys.*, **A523**(1991), 386.
- [8] L. Pienkowski, J. Jastrzebski, W. Kurcewicz, et al., *Phys. Rev.*, **C43**(1991), 1331.
- [9] F. Hubert, A. Fleury, R. Bimbot, D. Gardes, *Ann. Phys. (paris)*, **5**(1980), 1.
- [10] 李文新, 孙彤玉, 原子能科学技术, **24**(1990), 60.
- [11] U. Reus, W. Westemeier. *At Data Nucl. Data Tables*, **29**(1983), No. 2
- [12] 孙彤玉, 李文新等, 20—46MeV/A ^{12}C 离子与铜相互作用中余核的产额及其分布, 核化学与放射化学, 待发表.
- [13] K. Summerer, W. Bruchle, D. J. Morrissey et al., *Phys. Rev.*, **C42**(1990), 2546.
- [14] R. J. Charity, M. A. McMahan, G. J. Wozniak, *Nucl. Phys.*, **A483**(1988), 371.
- [15] R. Bass et al., *Rev. Lett.*, **39**(1977), 317.
- [16] V. E. Viola et al., *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 1550.
- [17] E. Duek et al., *Z. Phys.*, **A307**(1982), 221.
- [18] E. Duek et al., *Z. Phys.*, **A307**(1982), 237.
- [19] T. Batsch et al., *Phys. Lett.*, **B189**(1987), 287.
- [20] S. Y. Cho, N. T. Porile, D. J. Morrissey, *Phys. Rev.*, **C39**(1989), 227.

Target Residues from the Interaction of Indium with 42 MeV/nucleon ^{12}C Ions

YIN XINMIN LUO QINGZHENG LI WENXIN ZHAO LILI

SUN RULIN SUN TONGYU WU DINGQING

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

ABSTRACT

The cross section is measured for 65 target residues produced from the interaction of indium with 42 MeV/nucleon ^{12}C ions using nuclear chemistry techniques. The experimental mass yield distribution gives a satisfactory agreement with that calculated from Monte Carlo code GEMINI based on the statistical binary decay model. According to the systematics of isotope distributions, the possibility of the production of new neutron-deficient nuclides far from β stability is discussed in the intermediate energy heavy ion reaction.