

$^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$ 反应中余核的激发函数*

孙彤玉 李文新 吴定清 王素芳
徐树威 赵莉莉 郭应祥 孙秀荣

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

摘 要

在能量为 51—97 MeV 的 ^{16}O 离子轰击 ^{115}In 的反应中, 采用核化学技术测定了 21 个反应产物的激发函数, 实验结果与复合核统计蒸发模型的 Alice 程序以及描述复合核统计蜕变过程的 Monte-Carlo 模拟计算值进行了比较。

一、引 言

多年来对重离子反应的研究证明, 当入射重离子的能量低于每核子 10 MeV 时, 预平衡发射对重离子反应的贡献不大, 质量略轻于复合系统的反应产物主要来自全熔合反应道, 复合核统计蒸发模型常用来预期复合核蒸发残余核的生成截面。在用复合核蒸发反应合成远离 β 稳定线缺中子新核素时, 它实际上已成为估算新核素生成截面的主要手段。但是实践表明, 这种估算并不都是成功的, 特别是对离 β 稳定线很远的核素, 更是如此。其原因除了统计模型用于有限核子系统时的局限外, 还在于核反应机制的复杂性。例如近年来发现, 即使在每核子能量为 5 MeV 的重离子引起的反应中, 也存在大质量转移或非完全熔合过程, 特别在具有 α 集团的较轻重离子引起的反应中, 这类过程的截面也较大^[1-4]。在这样的情况下, 如何利用已有的理论模型再现核反应余核的生成截面是一个感兴趣的问题。

Misaelides 曾在能量范围为 4—9 MeV/u 的 ^{12}C 轰击 ^{93}Nb 产生的反应中, 测定了 19 个产物的激发函数。实验结果与 Alice 程序的计算值进行了比较, 发现必须利用一组新参数才能使两者的符合比较好^[5]。本工作用 51—97 MeV 的 ^{16}O 轰击天然铟靶, 通过离线 γ 能谱测量, 获得了 21 个反应余核的激发函数, 实验结果同时与 Alice 程序以及描述复合核蜕变的 Monte-Carlo 模拟计算值相比较, 以便观察理论模型适用程度, 同时试图得到有关核反应机制的部份资料。

二、实 验

实验在近代物理研究所 1.7 米重离子回旋加速器 SFC 上进行, ^{16}O 离子最高能量为

* 国家自然科学基金资助课题。
本文于 88 年 12 月 21 日收到。

97 MeV, 靶子由 8 片用真空喷镀法沉积在高纯铝箔上的天然铟箔 (^{115}In 同位素丰度为 95.7%) 组成, 每片铟靶厚为 0.3 mg/cm^2 左右, 束流通过铟箔和铝吸收箔后的能量由 Northcliffe 和 Schilling 的能程表计算^[6]。束流用法拉第筒接受, 并以时间函数被记录, 典型束流强度为 $40-100 \text{ nA}$ 。两次实验的照射时间分别为 1.7 和 4.2 小时, 积分束流分别为 260 和 $1520 \mu\text{C}$, 照射结束 26 分钟后开始测量铟靶和 Al 吸收箔的 γ 活性。

γ 能谱测量使用 4 台 Ge(Li) 或 HPGe 探测器与 Plurimat-N 组成的多道获取系统进行, 谱仪对 ^{60}Co 1332keV γ 线的能量分辨 (FWHM) 为 2.5 keV。探测效率用原子能研究院提供的一套 γ 标准源进行了刻度。为了覆盖尽可能长的半寿命, 测量持续了两周, 一共获取了 100 个 γ 能谱。 γ 能谱用 GAMAPU 程序分析, 挑选感兴趣的核素的特征 γ 射线, 得到放射性蜕变曲线, 使用 TAU 88 程序在 TEKRONIX-4111 图示终端上进行蜕变曲线分解, 通过计算得到照射结束时的活性强度。考虑了各项修正因素后, 计算该核素生成截面, 数据处理的详细过程在另外文章中报道^[7]。计算截面所使用的有关核数据引自文献[8](列在表 1 中), 数据处理以及理论模型计算在 VAX-11/750 和 VAX-8350 上进行。

表 1 截面计算采用的核数据

核素	半寿命	能量 (keV)	分支比 (%)	核素	半寿命	能量 (keV)	分支比 (%)
^{116}Ba	1.67 小时	233.6	20.4	^{127g}Xe	36.41 天	172.1	25.5
		241.0	6.22			202.9	68.3
		388.6	42.3			375.0	17.2
				925.2	4.99	^{120g}I	1.35 小时
^{127}Ba	12.7 分	180.8	12.4	^{121}I	2.12 小时	212.2	85.0
^{128}Ba	2.43 天	273.4	14.5	^{123}I	13.2 小时	159.0	83.3
		442.9	25.8	^{119g}Te	16.05 小时	644.0	84.5
^{129}Cs	45 分	526.0	24.0	^{119m}Te	4.69 天	153.6	66.7
^{127}Cs	6.25 小时	411.9	58.4	^{121g}Te	16.8 天	573.1	80.3
		462.3	4.2	^{116m}Sb	60.3 分	542.9	52.0
		587.2	3.5			972.6	72.0
^{129}Cs	32.1 小时	371.9	31.1	^{127}Sb	2.8 小时	158.6	86.1
		411.5	22.7	^{118m}Sb	5.0 小时	253.7	94.2
^{122}Xe	20.1 小时	564.1	17.7				
^{123}Xe	2.08 小时	148.9	48.6			1229.6	100.0
		178.1	14.8	^{117m}Sn	13.61 天	158.6	86.4
^{127g}Xe	16.9 小时	188.4	54.9	^{115m}In	4.49 小时	336.2	45.8

三、结果和讨论

本实验共鉴定了从 $A = 115$ (^{115}In) 到 $A = 129$ (^{129}Cs) 的 21 个反应余核, 得到了这些核素的激发函数。实验误差包括 γ 探测效率 (5%)、束流测定 (10%)、靶厚 (5%) 以及光电峰面积计算, 还有计数的统计误差和蜕变曲线拟合引起的误差, 除了少数核素由于计数太低引起较大统计误差外, 大部份核素生成截面的统计误差约 15%。

余核生成截面的理论计算用统计模型 Alice 蒸发程序^[9] (经修改过的新版本^[10]) 在 VAX 计算机上运行。计算表明, 我们的计算结果受壳效应影响很小, 而对于能级密度参数 a 却很灵敏, 和 Misaelides 在 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应激发函数研究中一样^[9], 我们也采用 $A/15.0$ 代替常用的 $A/8.0$, 在 Monte-Carlo 模拟计算中^[11], 使用的核质量引自文献^[12, 13], 对每个入射能量, 模拟有关的相继蒸发过程 10000 次。由于实验测定的生成截面除 $^{118\text{m}}\text{Sb}$ 外, 都为累积产额, 因此理论计算值按该质量链上有关产物的独立产额相加后与实验值进行比较。

根据实验测定的激发函数与理论计算值的符合程度, 可将这些产物分为三类:

(1) ^{129}Cs 、 ^{128}Ba 、 ^{127}Ba 、 ^{127}Cs 、 ^{127}Xe 和 ^{126}Ba :

这些余核的质量数非常接近复合核的质量数, 它们的激发曲线基本上具有复合核蒸发中子的典型形状。相邻质量核素的激发曲线的极大值相差约 10—15 MeV, 与预期再蒸发一个额外中子所需能量大致相符, 可见这些余核主要通过复合核蒸发中子, 接着发生相继 β^+ 蜕变而生成, 但也存在复合核直接蒸发 pxn 或 α 过程的贡献。典型的 ^{128}Ba , ^{127}Cs 和 ^{126}Ba 激发函数见图 1。统计模型的 Alice 蒸发程序基本上能再现实验激发曲线的形状, 除了 ^{126}Ba 外, 对所有 $A = 127$ 的同量异位素以及 ^{128}Ba 实验激发曲线的峰值与理论值之间相当接近, 但是计算的激发函数峰位均比实验值低大约 10 MeV, 如果引进复合核有效激发能概念^[5] 或者对入射系统的库仑位垒进行修正, 那么计算的激发曲线会略向高能边平移, 可望改善理论与实验的符合程度。特别感兴趣的是 Monte-Carlo 模拟计算值对 ^{127}Cs 和 ^{128}Ba 均相当满意地符合实验结果, 即使在符合最坏的 ^{126}Ba 情况下, 大部份入射能量的实验值与计算值的分歧也只有 3—4 倍。

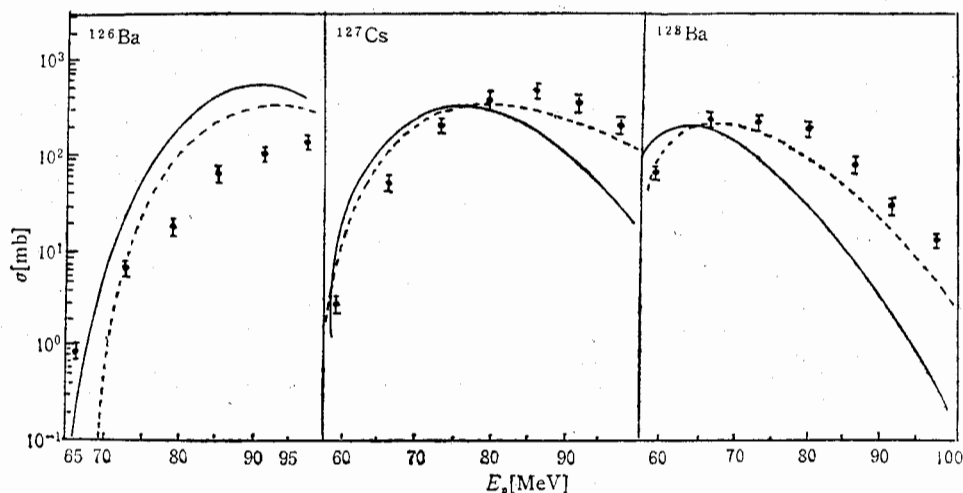


图 1 $^{16}\text{O} + ^{111}\text{In}$ 的反应中, Ba 和 Cs 同位素的实验截面值与统计模型计算值的比较

——用 Alice 程序计算的激发函数
 ----用 Monte-Carlo 模拟计算的激发函数

(2) ^{125}Cs 、 $^{125\text{g}+\text{m}}\text{Xe}$ 、 ^{123}Xe 、 ^{123}I 、 ^{122}Xe 、 ^{121}I 、 $^{121\text{g}}\text{Te}$ 、 $^{120\text{g}}\text{I}$ 和 $^{119\text{m,g}}\text{Te}$:

这些产物质量数处于靠近复合核及靶核质量数中间的过渡区。在所研究的能区, 这

在
参
用
2,
面
可

些核素的生成截面,随着入射能量增加而增加.图 2 给出 $^{125m+g}\text{Xe}$, ^{123}Xe , ^{123}I 和 ^{121}I 四个有代表性的激发函数.在大部份情况下,无论是 Alice 程序还是 Monte-Carlo 计算,都能较好地符合实验测定结果,而且从 Monte-Carlo 计算看来,还更优于 Alice 计算结果.

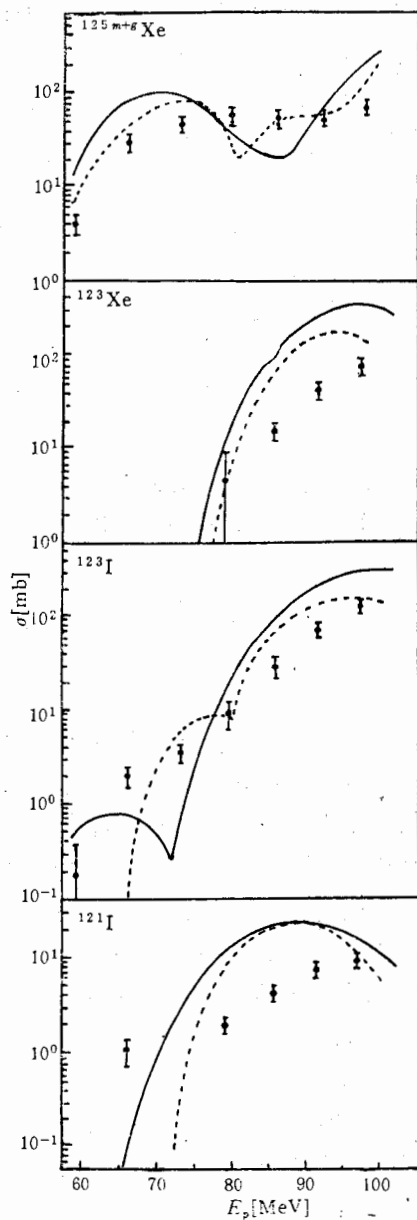


图 2 $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$ 反应中 Xe 和 I 同位素的实验截面值与统计模型计算值的比较

—用 Alice 程序计算的激发函数
---用 Monte-Carlo 模拟计算的激发函数

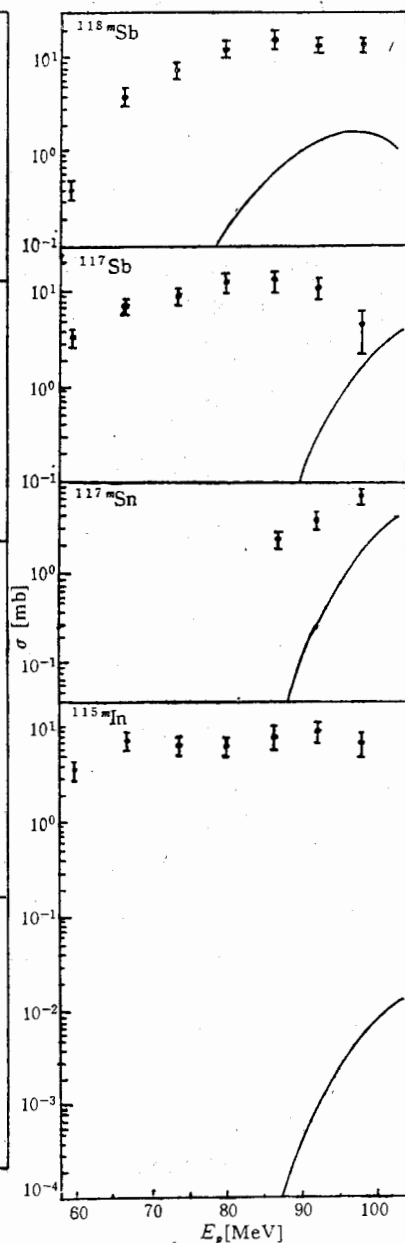


图 3 $^{16}\text{O} + ^{115}\text{In}$ 的反应中 Sb, Sn 和 In 同位素的实验截面值与统计模型计算值的比较

—用 Alice 程序计算的激发函数
---用 Monte-Carlo 模拟计算的激发函数

这表明复合核形成以及随后的 αxn 、 $2pxn$ 、 $2\alpha xn$ 蒸发(以及相继 β^+ 蜕变)是生成这些核素的主要机制,但是这中间几个较轻的核素 ^{121}Te 、 ^{121}I 和 ^{120}I 的激发函数与理论计算值偏离较远(见图2中的 ^{121}I 激发函数). 类似的现象 Misaelides 的工作中也存在^[5], 他把这些分歧归结于非完全熔合过程的存在. 我们认为,这并非是由于非完全熔合的结果,虽然非全熔合的产生会降低全熔合截面,但由于这种反应发生在周边范围,所以并不会只降低蒸发中子多的余核的截面,相反,可能会相对地增加这类余核的截面. 例如在本工作中,在最低入射能量时 ^{123}Xe 和 ^{121}I 的生成截面反而与理论值接近甚至高于理论值就说明了这一点. 仔细考察图1和图2,我们发现远离 β 稳定线的核素 ^{126}Ba 、 ^{123}Xe 和 ^{121}I 的激发函数与理论计算的符合都不如它们较重的同位素 ^{128}Ba 、 $^{125m+\varepsilon}\text{Xe}$ 和 ^{123}I 拟合得那样好,理论计算值要比实验值大5—6倍. 这说明统计蒸发模型计算过高地估计了轻同位素产物的截面,原因之一可能是在理论计算中没有考虑统计 γ 发射的缘故. 在用理论模型估计远离 β 稳定线新核素生成截面时,考虑这些特点是有用的.

(3) ^{118m}Sb 、 ^{117}Sb 、 ^{117m}Sn 、 ^{116m}Sb 和 ^{115m}In ;

质量数靠近靶核的这些核素,是由直接反应所生成的,而不是复合核蒸发机制生成的.

因此无论是 Alice 程序或是 Monte-Carlo 计算都不能反映这些产物的实验结果(见图3). 这个结论在我们早期工作中发现余核 ^{117}Sb 和 ^{118m}Sb 的角分布在 40° 成峰而得到证实^[4].

四、结 论

在能量范围为 51—97 MeV 的 ^{16}O 轰击天然铀的反应中,用核化学方法测定了 21 个反应余核的激发函数,基于复合核统计蜕变的 Monte-Carlo 模拟方法比基于统计蒸发模型的 Alice 程序更好地符合实验测定的结果. 这表明除了质量数接近靶核质量的余核外,所有产物都主要通过复合核蒸发机制而生成,对离 β 稳定线较远的缺中子同位素,实验和理论值之间偏离明显大于接近 β 稳定线的较重的同位素. 质量数接近靶核的反应余核,生成截面大大高于理论计算值,表明直接反应是这类产物的主要来源.

激发函数的测定,是反应机制研究的一个方面,但是要更详细了解生成所有这些余核的反应机制,还必须进一步进行余核的运动学测量.

葛素仙制备了靶,加速器运行组和多道组的胡松樵,董成富在工作中给予了的支持和帮助,靳根明阅读了本文初稿并作了有益的讨论,我们谨表示深切的谢意.

参 考 文 献

- [1] R. Bimbot et al., *Nuclear Physics*, **A189**(1972), 193.
- [2] D. J. Parker, J. Asher, T. W. Conlon and I. Nagib, *Phys. Rev.*, **C30**(1984), 143.
- [3] D. J. Parker, J. J. Hogan and J. Asher, *Phys. Rev.*, **C35**(1985), 161.
- [4] 孙彤玉等, *高能物理与核物理*, **11**(1987), 660.
- [5] P. Misaelides, *Radiochimica Acta*, **28**(1981), 1.

- [6] L. C. Northcliffe and R. F. Schilling, *Nucl. Data Tables*, 7A(1970).
 [7] 李文新, 孙彤玉, “核化学研究中 γ 能谱的测量和分析”, 原子能科学技术, (待发表).
 [8] U. Reus, W. Westmeier and I. Warnecke, *At. Data Nucl. Data Tables*, 29(1983), 1.
 [9] M. Blann and J. Bisplinghoff, Report COO-3494-27 (1975), University of Rochester, N. Y.
 [10] 徐树威, 张震, 近代物理研究所1986年年报, (1987), 169.
 [11] 王素芳等, 近代物理研究所1986年年报, (1987), 71.
 [12] A. H. Wapstra, K. Bos, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 19(1977), 185.
 [13] P. Möller and J. R. Nix, “Nuclear Masses from a Unified Macroscopic-Microscopic Model”, (1986, 未发表).

EXCITATION FUNCTIONS FOR ^{16}O -INDUCED REACTION ON $^{115}\text{In}^*$

SUN TONGYU LI WENXIN WU DINGQING WANG SUFANG

XU SHUWEI ZHAO LILI GUO YINGXIANG SUN XIURONG

(The Institute of Modern Physics Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

Excitation functions for the 21 products of the reaction induced by ^{16}O on ^{115}In have been determined in an energy region between 51 and 97 MeV with nuclear chemistry techniques. The experimental results were compared with those calculated using Alice code and Monte-Carlo analogue.