

46MeV/A ^{12}C 离子与 ^{93}Nb 相互作用中 靶余核的质量和电荷分布研究*

孙彤玉 李文新 吴定清 孙儒林 赵莉莉

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

戚大海 郑玉明 萨本豪

(中国原子能科学研究院, 北京)

利用核化学技术中的离线 γ 能谱法测定了46MeV/A ^{12}C 离子与 ^{93}Nb 相互作用中50个靶余核的生成截面, 通过高斯函数拟合得到了电荷分布及质量分布。平衡统计碎裂模型的计算成功地再现了实验结果。

关键词 中能重离子反应, 核反应产物, 统计模型, γ 能谱。

一、前言

近年来中能重离子加速器的相继建立, 使人们可以研究作为从低能到高能过渡的中能区的重离子核反应中各种反应机制间的相互竞争, 以及有关的新相变现象。研究重离子核反应的靶余核可以获得靶核碎裂及反应动力学演化的重要信息。

靶余核的质量分布是描述核反应过程最重要的特征之一, 利用放射化学方法可以精确地测定核反应产物的电荷数 Z 和质量数 A , 从而得到中能重离子反应产物的质量分布及电荷分布。两者不仅可用来研究中等质量碎块的生成机制, 而且可以检验描述反应中形成的热核碎裂的平衡统计模型^[1]的适用性。

我们的研究结果^[2]已表明, 对于轻系统 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$, 其质量分布的平衡统计模型理论计算与实验结果符合相当好。为了进一步检验该模型对于不同质量系统的适用性, 本文研究了46MeV/A ^{12}C 与中重靶核 ^{93}Nb 相互作用中的产物分布。平衡统计碎裂模型又一次成功地再现了实验结果, 给出了与实验相符的产物质量分布。这表明, 该模型对于一定质量范围内热核破碎问题的描述是成功的。

*中国科学院七五重大课题和国家自然科学基金资助项目
1990年4月6日收到, 1990年9月3日收到修改稿。

二、实 验

本工作是在兰州重离子研究装置出束后进行的第一批实验。靶组件由 $41.6\text{mg}/\text{cm}^2$ 金属 ^{93}Nb 以及覆盖在其前后作为收集箔的 $10.5\text{mg}/\text{cm}^2$ Mylar膜组成,在靶组前后又各放 $10.5\text{mg}/\text{cm}^2$ Mylar膜,作为空白箔。由加速器引出的 $47\text{MeV}/A$ ^{12}C 离子经过Mylar膜后在 ^{93}Nb 靶中心的能量约为 $46\text{MeV}/A$ ^[3]。照射持续39h,束流强度为5-10nA,用法拉第筒周期性记录。总的积分束流达 $746\mu\text{C}$,相当于 7.8×10^{14} 个 ^{12}C 离子。

照射结束后,覆盖在靶前后的反冲收集箔和 ^{93}Nb 靶上的放射性分别用已知效率的HPGe γ 能谱仪测量。测量在停照后33min开始,持续了2个月。获取的 γ 谱用SAMPO程序^[4]分析,衰变曲线用TAU-88程序^[5]分解。根据 γ 射线能量,相对强度和半衰期指定放射性核素^[6],计算生成截面和总质量产额的核数据引自文献[7]。从靶子和收集箔计算得到的产额可导出余核的反冲性质,用于研究 $^{12}\text{C}+^{93}\text{Nb}$ 反应中线性动量研究,其结果在文献[8]中已报道,所得产额相加就得到反应产物的生成截面。

三、结 果

1. 生成截面

离线 γ 能谱法鉴定了由 $^{12}\text{C}+^{93}\text{Nb}$ 反应产生的从 ^{22}Na 到 $^{93\text{m}}\text{Mo}$ 共50个反应产物,得到的生成截面列入表1。表1中给出的误差为标准偏差,它由 γ 谱分析、最小二乘法分解衰变曲线以及5%的 γ 探测效率误差合成,靶厚测定时靶物质定量的误差可以忽略,但束流测量误差未计在内。作为空白的Mylar膜本身和 ^{12}C 作用生成 ^7Be 和 ^{24}Na 外,未检出明显的其它活性。表1中 ^{24}Na 的生成截面已扣除了 ^{12}C 与Mylar膜直接作用约为5%的贡献。

2. 电荷分布和质量分布

尽管实验上测定了大量核素的截面,但它们只是总反应截面的一部分,为获得反应产物的质量产额分布,必须引入电荷分布函数来估计未测定核素的生成截面。

对一给定质量数为 A 的产物,各同量异位素的独立产额 $\sigma(Z, A)$ 可以用高斯函数描述:

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

其中 $\sigma(A)$ 为质量产额,即质量数为 A 的各同量异位素独立产额之和; σ_z 为电荷分布宽度参数; $Z_p(A)$ 为该质量数 A 的最可几电荷,它由下式计算:

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

这里 K_0, K_1, K_2 为常数, A 为质量数。 K_1, K_2 分别取值为0.479, -0.000215。 K_0 的取值方法是:划分若干质量区间,按质量区分别调节 K_0 值和分布宽度参数 σ_z ,使得实验测定的产额经过对母体 β 衰变贡献做出校正后得到的分数独立产额 $\sigma(Z, A)/\sigma(A)$ 能最好拟合以上高斯函数,由此获得的各质量区采用的 K_0 值列入表2。图1绘出了宽度参数 $\sigma_z=0.60$ 的高斯电荷分布曲线,实验获得的分数独立产额值与曲线很好符合。还可看出, σ_z 和质量数 A

无关, σ_c 取值 0.60 可以很好关联 $A=21-94$ 整个质量区的实验数据。根据拟合得到的电荷分布函数计算出 36 个总质量产额 (见表 1), 这些数据描绘的质量分布曲线示于图 2。

表1 46 MeV/A $^{12}\text{C} + ^{91}\text{Nb}$ 反应中产物的生成截面*

核素	产额类型	生成截面, mb	总质量产额, mb	核素	产额类型	生成截面, mb	总质量产额, mb
^{22}Na	C+	3.18 ± 1.20		^{77}Kr	C+	20.6 ± 10.1	62.7 ± 30.7
^{24}Na	C-	1.23 ± 0.12	1.80 ± 0.18	A=77			68.5 ± 19.1
^{46}Sc	I	0.78 ± 0.08	1.56 ± 0.16	^{79}Kr	C+	72.7 ± 4.38	77.2 ± 7.72
^{48}Sc	I	0.087 ± 0.04	1.83 ± 0.73	^{80}Sr	C+	4.45 ± 1.22	103.1 ± 28.3
^{48}V	C+	0.79 ± 0.07	1.88 ± 0.18	^{81}Rb	C+	79.1 ± 8.61	85.7 ± 9.32
A=48			1.86 ± 0.46	^{82}Br	I	9.53 ± 1.49	
^{51}Cr	C+	1.89 ± 0.24	2.61 ± 0.33	^{82}Rb	I	37.8 ± 2.42	$99.0 \pm 9.90^{**}$
^{53}Mn	C+	0.66 ± 0.07	2.41 ± 0.24	^{82}Sr	C+	78.7 ± 6.85	125.0 ± 12.5
^{55}Co	C+	5.92 ± 0.73		^{83}Rb	C+	152.9 ± 9.30	132.5 ± 13.3
^{56}Co	C+	0.80 ± 0.07	4.65 ± 0.47	^{84}Sr	C+	106.2 ± 5.14	116.0 ± 11.6
^{58}Co	I	4.76 ± 0.49	7.24 ± 0.75	A=83			124.3 ± 12.5
^{59}Fe	C-	0.34 ± 0.07	6.69 ± 1.31	^{84}Rb	I	8.79 ± 0.99	148.1 ± 16.8
^{62}Zn	C+	0.56 ± 0.27	11.3 ± 5.41	^{84}Y	C+	35.8 ± 6.89	$95.1 \pm 18.3^{**}$
^{65}Zn	C+	18.0 ± 2.28	20.5 ± 2.61	^{85}Sr	C+	166.4 ± 18.3	202.2 ± 22.2
^{66}Ga	C+	8.45 ± 1.20	17.6 ± 2.50	^{85}Y	C+	51.9 ± 5.32	$85.6 \pm 8.60^{**}$
^{67}Ga	C+	19.0 ± 1.67	20.1 ± 2.0	^{86}Zr	C+	41.0 ± 4.27	141.3 ± 14.1
^{68}Ge	C+	19.2 ± 4.93	32.9 ± 8.50	^{88}Zr	C+	136.7 ± 14.4	148.7 ± 15.7
^{69}Ge	C+	27.5 ± 2.02	30.7 ± 3.67	^{89}Zr	C+	156.1 ± 14.2	167.3 ± 16.7
^{70}As	C+	21.6 ± 4.92	43.2 ± 9.60	^{89}Nb	C+	84.6 ± 21.8	155.7 ± 40.1
^{71}As	C+	32.7 ± 2.28	46.5 ± 4.7	A=89			161.5 ± 28.4
^{72}Zr	C-	7.41 ± 1.91		^{90}Nb	C+	129.4 ± 7.55	142.6 ± 14.3
^{72}Se	C+	13.5 ± 1.44	50.2 ± 5.34	^{90}Mo	C+	14.8 ± 1.18	128.6 ± 12.8
^{73}Se	C+	25.4 ± 2.69	41.0 ± 4.34	A=90			135.6 ± 13.6
^{74}As	I	10.8 ± 0.72	79.6 ± 7.96	^{91}Sr	C-	13.4 ± 3.33	
^{75}Se	C+	87.8 ± 3.86	99.2 ± 9.92	^{92}Nb	I	62.5 ± 5.45	
^{76}As	C-	93.8 ± 8.36		^{93}Mo	C+	11.4 ± 1.64	18.0 ± 2.59
^{76}Kr	C+	8.33 ± 0.94	87.2 ± 9.85	^{94}Tc	C+	1.06 ± 0.19	1.94 ± 0.35
^{77}Br	C+	71.7 ± 2.90	74.3 ± 7.43				

• ——C+ 为缺中子核素的累积产额;

C- 为丰中子核素的累积产额;

I 为独立产额。

• • ——只测定了一个同质异能态截面, 质量产额分布曲线图中未列入。

表2 电荷分布拟合使用的 K_0 值

质量区 (A)	22—51	52—59	62—66	69—70	71—75	76—81	82—83	84—89	90—94
K_0	-0.12	-0.15	-0.24	0.00	-0.20	-0.35	-0.2	-0.4	-0.5

四、讨 论

1. 质量分布的特征和反应总截面

从图2可见, 质量分布有如下特征: 在略低于靶质量数附近呈一个较宽的峰, 峰位约在

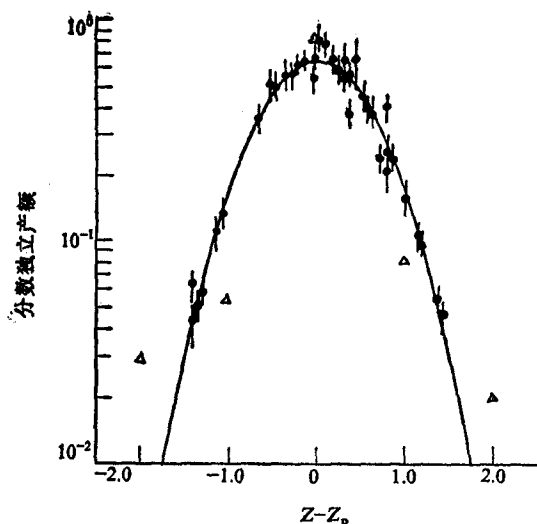


图1 46MeV/A $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中的电荷分布实验与模型计算的比较
——为高斯电荷分布曲线; ●——实验点;
△——模型计算值 ($A=51$)。

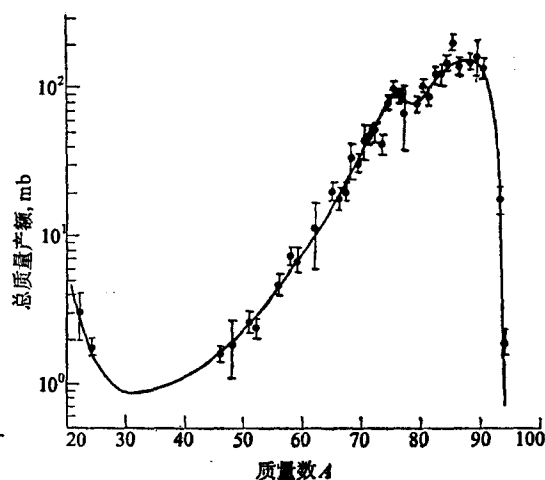


图2 46MeV/A $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应的质量分布曲线

$A=88$ 处, 平均质量数为 $A=81.0$ 。随着质量减小, 产额下降, 在 A 接近30处降到最小, 而后增加; 原子序数比靶重的超靶核素有 ^{93m}Mo 和 ^{94g}Tc 。质量分布曲线的形状和44MeV/A $^{12}\text{C} + \text{Cu}^{[2]}$ 的形状类似, 但其半宽度比后者大, 显示出质量分布的宽度随靶质量数增加而变宽。对图2的质量分布在 $A=30-94$ 范围内求和, 得到总反应截面为 $2.61 \pm 0.39\text{b}$ 。对 $A < 30$ 质量区, 这一部分的产额源于多重碎裂, 因此它们的生成截面包含在与其互补的重产物中, 所以, 求和时不计在内。采用Kox等^[9]提出的参数化的总反应截面计算式计算出46MeV/A $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应总截面为2.70b, 计算值与本工作测定值2.61b相符。另外, 本工作得到了超靶核素 ^{94g}Tc 的产额, 这对于平衡统计碎裂模型^[11]中所作的靶核子全部参加非完全融合后形成热核的假设是一个强有力的支持。

2. 实验结果与平衡统计碎裂模型计算值的比较

利用平衡统计碎裂模型^[11]计算了46MeV/A下 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 的质量分布, 所用的模型参数为: $R_{\text{T.O.}} = 2.2\text{fm}$; $C_i = 0.80$, 这里 $R_{\text{T.O.}}$ 是表征热核破碎体积的半径参数, C_i 是有效反应能提供作为激发能的比例因子。图3给出了质量分布的理论计算值与实验结果的比较, 由该图可见, 两者符合得相当好。用该模型计算了 $A=51$ 产物的电荷分布, 计算值以空心三角点绘在图1中。可以看出, 计算值与拟合出的高斯电荷分布曲线大体相符, 在最可几电荷 Z_p 处相符最好, 远离 Z_p 时, 相符得较差。

在本工作和44MeV/A $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 研究中, 平衡统计碎裂模型计算都成功地再现了实验结果。这表明, 该模型对不同能区^[10]、不同质量系统的重离子反应中形成的热核破碎都能给予成功的描述。

最后需要指出, 在图2所示质量分布曲线的 $70 < A < 80$ 区间, 似乎呈现双峰结构。类似

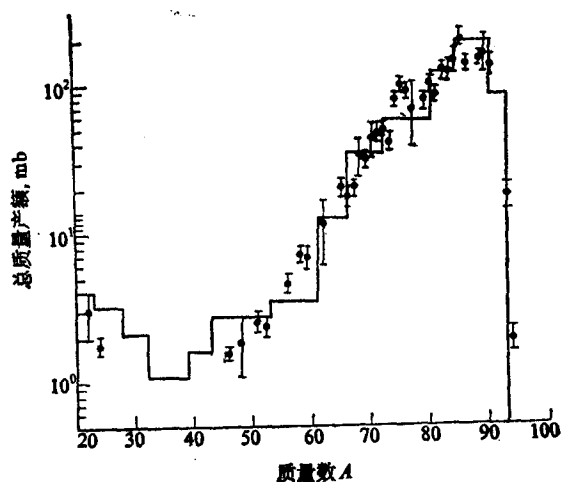


图3 46 MeV/A $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 质量分布实验与模型计算结果的比较
 x 为实验点; — 为模型计算值。

现象在中能 $^{12}\text{C} + ^{89}\text{Y}$ 和 $^{12}\text{C} + \text{Ag}$ 反应^[11]中也出现过。此外,在反应产物中有确凿的证据表明存在某些丰中子核素如 ^{72}Zn , ^{76}As , ^{82}Br 及 ^{91}Sr 等,但它们的生成截面不能用本文的高斯电荷分布曲线相关联,其原因尚不清楚。最后,理论模型看来高估了近靶产物的产额,因为近靶产物产生于入射弹核和靶核的周边碰撞,包括直接相互作用,这时并未形成高度激发的热核,理论模型实际上并未考虑来自直接相互作用的贡献。这有待于进一步研究。

张立,李云生参加了部分工作,重离子加速器全体人员为我们完成本工作所作的巨大努力,并对 VAX-8350 运行组全体人员给予的协作和帮助,在此表示深切的谢意。

参 考 文 献

- [1] Sa Benhao et al., *Phys. Rev.*, C40, 2680 (1989).
- [2] 李文新等, *高能物理与核物理*, 14, (8), 745 (1990).
- [3] 陈家超等, *高能物理与核物理*, 15(1), 59 (1991).
- [4] Routti T. et al., *Nucl. Instrum. Meth.*, 72, 125 (1969).
- [5] 李文新, *近代物理研究所1985年年报*, 133 (1986).
- [6] 李文新, 孙彤玉, *原子能科学技术*, 24 (2), 60 (1990).
- [7] Reus, U. et al., *At. Data, Nucl. Data Tables*, 29 (1983).
- [8] 李文新等, *高能物理与核物理*, 14, (12), 1110 (1990).
- [9] Kox, S. et al., *Phys. Rev.*, C 35, 1678 (1987).
- [10] 戚大海, 萨本豪, *高能物理与核物理*, 14(7), 669 (1990).
- [11] L'eres, A. et al., *Z. Phys.*, A 312, 177 (1983).

MASS AND CHARGE DISTRIBUTIONS OF RESIDUES FORMED IN THE INTERACTION OF ^{93}Nb WITH 46 MeV/A ^{12}C IONS

SUN TONGYU LI WENXIN WU DINGQING SUN RULIN ZHAO LILI
 (Institute of Modern Physics, Lanzhou)

CHIH TAHAI ZHENG YUMING SA BENHAO
 (China Institute of Atomic Energy, P.O. Box 275, Beijing)

ABSTRACT

Cross sections are determined for 50 target residues from the interaction
 (下转第222页, Continued on p.222)

PREPARATION AND IR SPECTRA ON SOME β -DIKETONE COMPLEXES WITH URANYL ION

SHI NAI DING XIAOCHUN ZHOU WEIJING LU YI WU JINGUANG

(Department of Technical Physics, Department of Chemistry, Peking University, Beijing)

ABSTRACT

In the present investigation four β -diketone complexes of uranyl ion $\text{UO}_2(\text{AA})_2 \cdot \text{HAA}$, $\text{UO}_2(\text{BA})_2 \cdot \text{HBA}$, $\text{UO}_2(\text{DBM})_2 \cdot \text{HDBM}$ and $\text{UO}_2(\text{TTA})_2 \cdot \text{HTTA}$ are prepared, where HAA, HBA, HDBM, and HTTA are acetylacetone, benzoylacetone, dibenzoylmethane and 2-thenoyltrifluoroacetone, respectively; and AA, BA, DBM and TTA are their anions, correspondingly.

The complexes are characterized by chemical analyses and infrared spectra. The measurements of the infrared spectra are carried out in the $4000-150 \text{ cm}^{-1}$ range. An approximate assignment is given for some characteristic bands. The relationships between the characteristic bands and the structures of the complexes are also studied.

Key words β -Diketone complexes, Infrared spectra, Uranyl ion.

(上接第212页, Continued from p. 212)

of $46 \text{ MeV/A } ^{12}\text{C}$ with ^{93}Nb by using nuclear chemistry techniques. In virtue of the fit of Gaussian distribution, the isobaric yield distribution and then the mass yield distribution are obtained.

The theoretical calculations based on a modified statistical model are performed. The calculated results agree with the corresponding experimental data quite well.

Key words Intermediate-energy heavy ion reaction, Target residue, Statistical model, γ -spectroscopy.