

20—46MeV/u ^{12}C 离子和铜的相互作用中靶余核的研究*

Ⅱ. 靶余核的质量产额分布

孙彤玉 李文新 吴定清 罗清政
孙儒林 赵莉莉 尹新民 靳根明

(中国科学院近代物理研究所, 兰州, 730000)

李 泽 敬克兴 李新华

(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

用核化学技术测定了20.5、24.0、27.5、31.1、34.8、38.5、42.3和46.4MeV/u的 ^{12}C 离子和铜相互作用中39个放射性靶余核的生成截面, 根据这些数据得到了电荷分析、质量产额分布以及平均激发能。实验的质量产额分布与级联的两体衰变模型 Monte-Carlo GEMINI 程序计算结果符合得很好。

关键词 $^{12}\text{C}+\text{Cu}$ γ 能谱 质量产额分布 级联两体衰变模型

近年来随着中能重离子加速器相继投入运行, 大量工作集中在从低能到高能过渡能区重离子反应机制的研究。在这中能重离子反应研究中, 靶余核的生成研究是相当重要的一个方面, 它能提供有关反应动力学演化的许多有用的实验资料。使用 γ 能谱法和反冲技术, 可以测量靶余核的生成截面和反冲射程。实验数据用于研究靶碎片的质量产额分布, 重离子碰撞中的线性动量转移, 中质量碎片的生成以及它们与轰击能量的依赖关系等。

迄今为止, 在重离子和铜的相互作用中, 用上述方法已进行了较为完全的测量, 这些工作

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1992-12-10 收到修改稿日期: 1993-03-20

包括86MeV/u $^{12}\text{C}^{[1,2]}$, 84MeV/u 和22MeV/u $^{12}\text{C}^{[3]}$, 35MeV/u ^{12}C , 15、25和45MeV/u $^{12}\text{C}^{[4]}$, 44MeV/u $^{12}\text{C}^{[5]}$, 8—46MeV/u $^{20}\text{Ne}^{[6]}$ 等, 为了更系统地了解中能重离子碰撞过程, 我们在20—46MeV/u 范围内8个轰击能量下, 使用厚靶-厚收集箔技术测量了 $^{12}\text{C}+\text{Cu}$ 反应余核的生成截面和反冲性质。本文研究余核的质量产额分布, 着重观察分布特征与入射能量的依赖关系, 并且考察级联两体衰变模型能否在更宽的范围内再现实验测定的质量分布。

1 实验部分

实验部分参见文献[8]。

2 结果和讨论

2.1 生成截面

用离线 γ 能谱法鉴定了由 $^{12}\text{C}+\text{Cu}$ 反应产生的从 ^{24}Na 到 ^{71}As 共39个放射性靶余核。得到的生成截面及其标准偏差列入表1。由表1可看出, 其相对标准偏差约10%。它是由 γ 谱分析, 最小二乘法分解衰变曲线以及 γ 探测效率等误差合成, 但束流测量误差以及 ^{12}C 离子入射弹核能量计算的误差未包括在内。而后一误差在低能区, 特别是对于那些截面随能量急剧变化的核素是比较大的。

表1 20—46MeV/u $^{12}\text{C}+\text{Cu}$ 反应中余核的生成截面 (10^{-31}m^2)

核素	入射能量/MeV·u ⁻¹								余核 产额 类型
	20.5	24.0	27.5	31.1	34.8	38.5	42.3	46.4	
^{24}Na	1.13±0.09	1.29±0.11	1.51±0.16	1.61±0.14	1.73±0.14	1.81±0.17	1.98±0.17	21.5±0.19	C—
^{28}Mg					0.98±0.04	0.13±0.03	0.14±0.02	0.16±0.30	C—
$^{34}\text{Cl}^{\text{m}}$								0.65±0.06	C+
^{39}Cl								0.44±0.14	I
^{41}Ar		0.20±0.03		0.32±0.08		0.76±0.54	0.70±0.13	0.82±0.12	C—
^{42}K	0.69±0.12	1.28±0.12	1.76±0.19	2.74±0.27	3.47±0.35	4.09±0.43	4.91±0.48	5.54±0.56	I
^{43}K	0.16±0.02	0.31±0.03	0.53±0.04	0.80±0.08	1.15±0.07	1.44±0.10	1.64±0.09	1.84±0.11	C—
$^{44}\text{Sc}^{\text{g}}$	0.79±0.10	1.53±0.21	2.71±0.33	4.13±0.60	4.56±0.44	5.47±0.62	5.91±0.61	6.49±0.66	I
$^{44}\text{Sc}^{\text{m}}$	1.99±0.14	3.81±0.27	6.07±0.45	8.99±0.65	11.5±0.69	13.4±0.91	13.8±0.82	15.7±0.82	I
^{46}Sc	2.67±0.18	4.67±0.33	7.01±0.53	9.47±0.57	12.1±0.81	13.6±0.97	15.2±1.00	16.6±1.15	I
^{47}Sc	0.79±0.10	1.59±0.16	2.59±0.41	3.39±0.33	4.22±0.44	4.83±0.50	5.61±0.62	5.66±0.55	C—
^{48}Sc	0.17±0.02	0.34±0.05	0.39±0.09	0.66±0.09	0.73±0.06	0.81±0.08	1.31±0.08	0.97±0.07	I
^{48}V	6.12±0.35	12.1±0.69	19.4±1.00	24.1±1.60	29.3±1.70	32.2±1.90	31.4±1.20	34.0±1.80	C+
^{48}Cr	0.11±0.01	0.23±0.02	0.41±0.03	0.59±0.04	0.80±0.06	0.84±0.09	1.03±0.07	1.02±0.08	I
^{49}Cr	1.83±1.35	3.00±0.37	7.82±1.20	8.50±1.19	7.15±1.32	7.45±1.11	7.22±1.51	7.32±0.87	C+
^{51}Cr	27.7±2.80	44.4±4.20	63.0±5.90	73.2±7.10	79.7±7.80	83.4±8.50	78.9±7.90	79.5±7.90	C+
$^{52}\text{Mn}^{\text{g}}$	15.7±0.64	25.9±1.20	31.1±1.60	35.2±1.50	35.6±1.40	35.4±1.60	33.9±1.30	31.8±1.30	I
$^{52}\text{Mn}^{\text{m}}$	2.00±1.27	3.57±1.10	10.9±3.20	8.47±1.58	6.72±4.40	3.28±0.62	5.13±3.76	3.93±0.69	C+
^{52}Fe	0.08±0.01	0.17±0.02	0.28±0.03	0.35±0.03	0.40±0.05	0.45±0.05	0.43±0.05	0.43±0.04	I
^{54}Mn	48.2±4.60	62.4±6.00	65.4±5.60	67.2±4.60	69.9±6.80	71.1±7.50	68.5±6.90	65.4±7.40	I
^{55}Co	2.99±0.17	4.05±0.21	4.73±0.27	4.93±0.28	4.64±0.23	4.44±0.27	4.20±0.24	3.99±0.22	C+
^{58}Mn	4.93±0.40	6.42±0.49	6.89±0.50	7.60±0.66	6.92±0.56	6.90±0.70	6.62±0.58	6.47±0.54	C—
^{58}Co	25.7±1.20	31.5±1.30	32.4±1.90	32.4±1.20	30.4±1.50	28.3±1.50	25.8±1.00	26.2±1.20	C+
^{56}Ni	0.10±0.02	0.09±0.03	0.06±0.05	0.14±0.03	0.17±0.05	0.16±0.05	0.13±0.05	0.21±0.03	I

核素	入射能量/MeV·u ⁻¹								余核 产额 类型
	20.5	24.0	27.5	31.1	34.8	38.5	42.3	46.4	
⁵⁷ Co	89.3±6.20	101.6±7.0	92.5±5.40	95.5±6.60	89.4±6.40	83.1±6.90	75.9±8.20	70.6±5.30	C+
⁵⁷ Ni	2.28±0.13	2.71±0.15	2.67±0.15	2.81±0.16	2.88±0.17	2.54±0.17	2.42±0.15	2.39±0.14	C+
⁵⁸ Co ^a	115.6±11.0	121.±11.6	114.0±10.9	106.0±10.2	101.0±9.90	94.3±9.40	89.3±9.00	84.8±8.60	I
⁵⁹ Fe	2.23±0.17	2.59±0.20	2.81±0.27	2.83±0.19	2.81±0.23	2.85±0.23	2.34±0.17	2.85±0.24	C-
⁶⁰ Co	22.8±1.80	26.6±2.90	24.4±2.90	23.7±3.30	29.0±4.50	22.1±2.50	29.7±4.70	26.0±2.40	I
⁶⁰ Cu	21.0±3.90	18.9±3.00	19.1±3.50	16.3±2.30	11.3±1.60	10.2±1.30		8.13±0.74	C+
⁶¹ Cu	74.6±3.10	67.2±2.90	63.0±3.20	55.7±2.80	52.4±2.30	48.2±3.00	43.3±2.10	40.0±1.80	C+
⁶² Zn	12.4±0.60	9.99±0.48	9.32±0.43	7.96±0.48	6.79±0.34	6.09±0.38	4.84±0.23	4.22±0.27	C+
⁶³ Zn	74.3±9.20	56.4±5.20	50.2±14.8	39.8±4.50	30.4±9.20	20.9±6.60	17.4±9.10	12.0±2.10	C+
⁶⁵ Zn	97.2±10.0	65.0±6.60	45.7±4.80	32.2±4.10	27.3±3.00	20.1±2.30	15.1±2.30	12.5±1.40	C+
⁶⁶ Ga	26.2±0.90	12.3±0.70	7.28±0.90	4.19±0.28	1.86±0.19	0.93±0.13	3.72±0.60	0.78±0.27	C+
⁶⁶ Ge	1.05±0.20								C+
⁶⁷ Ga	20.0±1.00	8.49±0.45	4.54±0.28	2.57±0.28	1.70±0.14		0.71±0.10	0.46±0.05	C+
⁶⁹ Ge	3.33±0.19	0.80±0.05							C+
⁷¹ As	0.49±0.06	0.23±0.03	0.14±0.03						C+

注: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。

值得指出的是本工作与 Cho 等^[4]报道的生成截面相比,当轰击能量约为25MeV/u 时,全部实验截面在±17%范围内相符,在~35MeV/u 和~45MeV/u 轰击能量下,大约1/3的截面偏离±20%左右,而截面偏离大于30%的不到15%。这表明本工作的余核生成截面测量结果和 cho 等的结果符合很好。

2.2 电荷分布

尽管实验测定了大量核素的截面,但它们只是反应截面的一部分。为获得反应产物的质量分布,必须引入电荷分布函数来估计未测定核素的生成截面。计算方法已在文献[8]中详细描述了。表2列出了电荷分布拟合所使用的参数。表中宽度参数σ_z取值A=48和A=56的σ_z之平均值。对质量数A的最可见电荷Z_p(A)由Z_p(A)=K₀+K₁A+K₂A²计算。这里,K₀、K₁、K₂为常数,A为质量数。我们把K₁和K₂作为固定值。

表2 20—46MeV/u 电荷分布拟合使用的参数

入射 能量 /MeV •u ⁻¹	宽 度 参 数 (σ _z)	K ₀						K ₁	K ₂	
		质 量 区 (A)								
		24-44	46-48	49-52	54-57	58-60	61-71			
20.5	0.498	-0.02	0.0	0.0	0.05	(A = 58 - 61) (A = 62 - 71)				
						-0.05	0.0			
24.0	0.497	-0.04	-0.03	(A = 49 - 55) (A = 56 - 58) (A = 59 - 61) (A = 62 - 71)						
				0.04	0.0	-0.08	0.0			
27.5	0.490	-0.02	0.04	0.04	0.05	-0.10	0.0			
31.1	0.508	-0.02	0.04	0.0	0.03	-0.08	0.0			
34.8	0.520	0.0	0.04	0.0	0.02	-0.12	0.0	0.479	-2.15×10 ⁻⁴	
38.5	0.515	-0.03	0.02	0.0	0.02	-0.08	0.0			
42.3	0.526	0.0	0.0	-0.03	0.0	-0.10	0.0			
46.4	0.529	-0.03	0.0	-0.03	0.0	-0.12	-0.1			

20—46MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应的高斯电荷分布曲线示于图1。由图1可见,实验测定的产额经 β 衰变馈送修正后得到的相对独立产额能满意地与曲线相符。

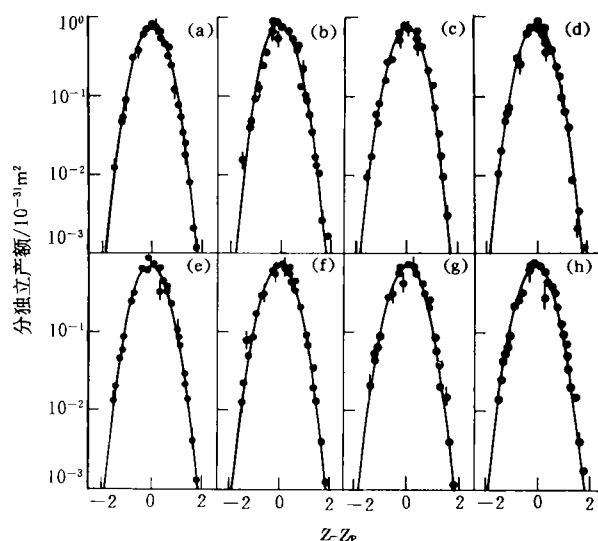


图1 20—46MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应的电荷分布曲线
入射能量/MeV $\cdot\text{u}^{-1}$: (a)——20.5, (b)——24.0 (c)——27.5, (d)——31.1,
(e)——34.5, (f)——38.5, (g)——42.5, (h)——46.4。

2.3 质量产额分布

通过电荷分布计算得到的质量产额分布示于图2。从图2的质量产额分布曲线可见,不同入射能量的 ^{12}C 离子和铜相互作用中,质量分布曲线形状大体相似,但随着 ^{12}C 离子入射能量的增加,质量分布的峰变宽,峰位向低质量数迁移。超靶产物的产额随入射弹核的能量下降而明显增高,这表明随着入射能量的降低完全或接近完全熔合反应后的贡献越来越大。

描述质量分布的特征,可以以平均质量数 $\bar{A}$ 、质量损失 ΔA ($\Delta A = A_t - \bar{A}$, 其中 A_t 为靶质量64)和产额曲线在 $37 < A < 57$ 质量区的斜率表示。各个入射弹核能量下的质量分布数据列入表3。由表3可见,随 ^{12}C 离子入射能量的增加,平均质量数 $\bar{A}$ 由高向低迁移,平均质量损失 ΔA 由低向高变化。这表明较高的轰击能量下对应存在着较高的激发能,从而导致了较大的质量损失。表3中的斜率和Cho等的工作一样。在 $37 < A < 57$ 之间进行指数拟合,结果表明,质量产额分布曲线指数区的斜率随弹核入射能量的降低而增加。这和Cumming等^[9]的结果一致。

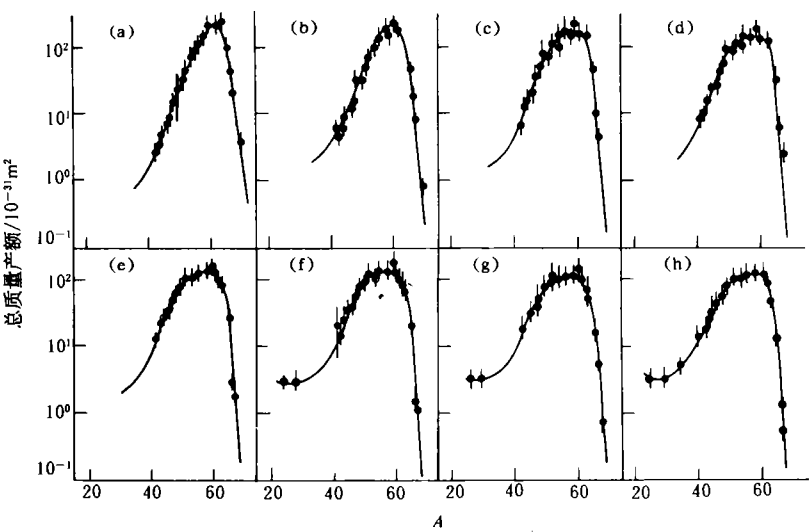


图2 20—46MeV/u ¹²C+Cu 反应的质量产额分布曲线
入射能量/MeV·u⁻¹: (a)——20.5, (b)——24.0, (c)——27.5, (d)——31.1,
(e)——34.8, (f)——38.5, (g)——42.3, (h)——46.4。

表3 20—46MeV/u ¹²C+Cu 反应实验结果

¹² C 入射能量 /MeV·u ⁻¹	总截面/10 ⁻²⁸ m ²		平均质量数 $\bar{A}$	质量损失 ΔA	斜率/%	平均激发能 /MeV·u ⁻¹
	实验值	理论值				
20.5	2.13±0.32	2.49±0.37	59.3	4.7±0.7	32±8	1.62±0.24
24.0	2.21±0.33	2.44±0.37	57.7	6.3±1.0	27±7	1.78±0.27
27.5	2.24±0.34	2.40±0.36	56.4	7.6±1.1	24±6	1.95±0.29
31.1	2.19±0.33	2.35±0.35	55.8	8.2±1.2	21±5	1.97±0.30
34.8	2.02±0.30	2.30±0.35	55.1	8.9±1.3	17±4	1.99±0.30
38.5	2.10±0.32	2.26±0.34	54.4	9.6±1.4	16±4	2.06±0.31
42.3	1.96±0.29	2.22±0.33	53.9	10.1±1.5	14±4	2.07±0.31
46.4	1.99±0.30	2.16±0.32	53.7	10.3±1.6	14±3	2.06±0.31

将图2中的质量分布在 $A = 30 - 71$ 范围内的质量产额求和,得到各入射弹核能量下的反应总截面 σ_R 。 $A < 30$ 的产额不包括在内,因为这部分产物是二重甚至多重碎裂过程产生的。采用 Kox 等^[10]提出的参数化的总反应截面表达式计算反应总截面,结果示于图3。从图3可看到,理论计算值高于实验值10%左右,但仍在实验值的误差范围内。理论计算的总反应截面随入射能增加缓慢降低。实验结果基本符合该趋势,并在27.5MeV/u 处有一个不很明显的极大。在较高入射能量时,实验和理论的符合远比 Cho 等的结果好得多。

2.4 与级联两体衰变模型的比较

我们曾在 $44\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + \text{Cu}^{[5]}$ 和 $46\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + \text{Nb}^{[11]}$ 的研究中,使用平衡统计碎裂模型成功地再现了实验结果。最近我们在 $42\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + ^{115}\text{In}$ 研究中^[12],用级联两体衰变模型计算,其结果与实验值也符合得相当好。但是在计算中,各种熔合反应占总反应的份数作为可调参数使用。

本文采用级联两体衰变模型的 Monte-Carlo GEMINI 程序^[13]计算了 24.0、31.1、38.5 和 46.4 MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 的质量分布。在计算中所用的参数是根据火球模型^[14]计算结果得到的。表4列出了在计算过程中

所用的最大角动量和平均激发能。有关质量分布的理论计算值与实验结果的比较示于图4。由图4可见,两者符合得很好,表明该模型也能用于不同能区、不同质量系统的重离子反应中靶余核质量产额分布描述。有关级联两体衰变模型及其计算的详细情况,将另文报道。

表4 20—46MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应在 GEMINI 程序计算中所使用的参数

入射能量/MeV·u ⁻¹	最大角动量/h	总激发能/MeV
24.0	45	151.0
31.1	40	191.9
38.5	30	227.3
46.4	30	235.8

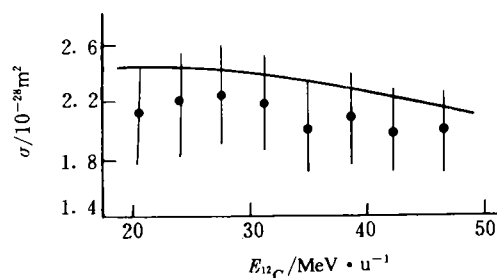


图3 入射弹核能量与总反应截面的关系

●为实验点;实线为理论计算值。

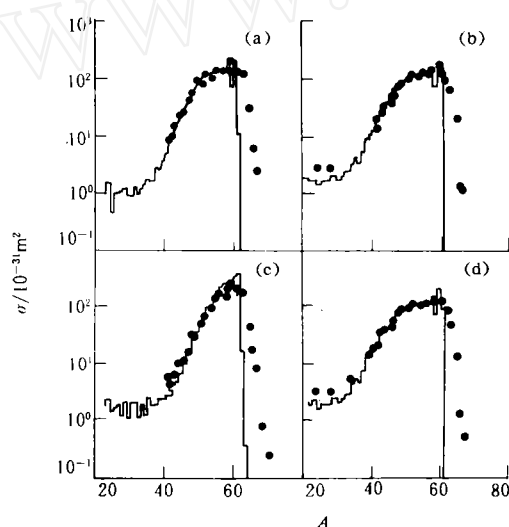


图4 20—46MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 质量分布实验与理论计算结果的比较

●为实验点;实线为模型计算值。

2.5 复合系统的平均激发能

从实验测定的靶余核质量产额分布可以估计 ^{12}C 离子和 Cu 靶核相互作用形成复合系统的平均激发能,它与从线性动量转移实验结果估计的激发能一样,都依赖于所使用的关于反应机制的假设。根据非完全熔合反应的假设, ^{12}C 离子和 Cu 核碰撞的初始阶段形成的复合系统的平均质量已被测定^[15]。在反应第二阶段,从复合系统蒸发的平均核子数就是复合系统平均质量数和本工作测定余核平均质量数 $\bar{A}$ 之差。进一步假定从复合系统每蒸发一个核子所需的平均能量为 10 MeV,并且与复合系统的激发能和核的中子、质子组成无关,这样就能计算复合系统的平均激发能。 ^{12}C 入射能量与从质量产额分布得到的平均激发能的关系示于图5。由图5可见,复合系统每个核子的激发能,在低能区随轰击能量增加而增加,当轰击能量增加到 38.5 MeV/u 时,激发能就达到饱和,平均每个核子的激发能为 2.0 MeV/u,相当于核温度 $T = 4.0 \text{ MeV}$ 。从线性动量转移得到的平均激发能比从质量分布得到的平均激发能高约 21%,但仍在图5所示的实验误差范围内。

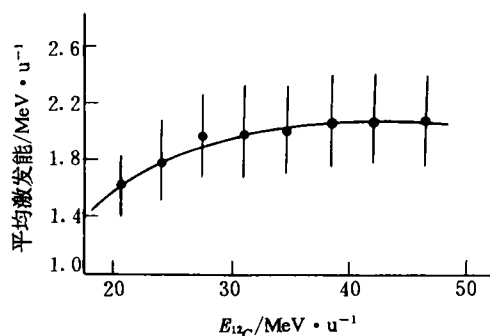


图5 ^{12}C 入射能量与平均激发能的关系

致谢:敬岚,赵之正在多道分析系统的调试中给予很大帮助;HIRFL 和 VAX-8350 全体运行人员为我们提供了良好的工作条件,在此表示深切的谢意。

参 考 文 献

- 1 Lund T, Molzahn D, Bergersen B, et al. Yield and Recoil Properties of Products From the Reaction Between Natural Copper and 86 MeV/u ^{12}C Ions. *Z Phys, A*, 1982, 306: 43.
- 2 Lund T, Molzahn D, Brandt R, et al. Charge and Mass Distribution of Products Form the Nuclear Interaction Between Copper and 1 GeV ^{12}C . *Phys Lett, B*, 1981, 102 (4): 239.
- 3 Kowalski L, Hausteine PE and Cumming JB. Onset of Damping in Energetic Heavy-Ion Interaction. *Phys Rev Lett*, 1983, 51 (8): 642.
- 4 Cho SY, Porile NT, Morrissey DJ. Target Residues From the Interaction of Copper With 15—45 MeV/nucleon ^{12}C Ions. *Phys Rev, C*, 1989, 39(6): 2277.
- 5 李文新, 孙彤玉, 戚大海, 等. 44 MeV/u ^{12}C 离子与铜相互作用中靶余核的研究. *高能物理与核物理*, 1990, 14(8): 745.
- 6 Piewkowkl L, Jastrzebski J, Kurcewicz. Interaction of 8—46 MeV/nucleon ^{20}Ne with Cu, *Phys Rev, C*, 1991, 43(3): 1331.
- 7 Reus U, Wesmeier W. Gamma-ray Catalog. *At Data Nucl Data Tables*. 1983, 29(2): 195.
- 8 孙彤玉, 李文新, 吴定清, 等. 20—40 MeV/u ^{12}C 离子和铜的相互作用中靶余核的研究 I. 靶余核的产额及其分布. *核化学与放射化学*, 1993, 15(2): 65.
- 9 Cumming JB, Hausteine PE, Ruth TJ, et al. Spallation of Copper by 80 GeV ^{40}Ar Ions. *Phy Rev, C*, 1987, 17: 1632.

- 10 Kox S, Gamp A, Perrin C, et al. Trends of Total Reaction Cross Sections for Heavy ion Collisions in the Intermediate Energy Range. *Phys Rev, C*, 1987, 35:1678.
- 11 孙彤玉, 李文新, 戚大海, 等. 46MeV/u ^{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. *核化学与放射化学*, 1991, 13(4):208.
- 12 Li Wenxin, Yin Xinmin, Luo Qingzheng, et al. Mass Yield Distribution of Farget Residues From the Reaction of Indium With 42 MeV/nucleon ^{12}C Ions. *Phys Rev, C*, 1992, 46(4):1538.
- 13 Charity RJ, McMahan MA, Wozniak GJ, et al. Systematics of Complex Fragment Emission in Niobium Induced Reactions. *Nucl Phys, A*, 1988, 83:371.
- 14 Gosset J, Gutbrod HH, Meyer WG, et al. Central Collisions of Relativistic Heavy Ions. *Phys Rev, C*, 1977, 16(2):629.
- 15 吴定清, 李文新, 孙彤玉, 等. $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应中平均线性动量转移. *核化学与放射化学*, 在排印中.

MASS DISTRIBUTIONS OF RESIDUES FORMED IN THE INTERACTION OF COPPER WITH 20—46MeV/U ^{12}C IONS

SUN TONGYU LI WENXIN WU DINGQING LUO QINGZHENG
SUN RULIN ZHAO LILI YIN XINMIN JIN GENMING

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

LI ZE JING KEXING LI XINHUA

(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

Gross sections for 39 target residues from the interaction of copper with 20.5, 24.0, 27.5, 31.1, 34.8, 42.3 and 46.4 MeV/u ^{12}C ions have been determined by nuclear chemistry techniques. These data are used to obtain the charge distributions, the mass yield distributions and the mean excitation energy.

The experimental mass yield distributions are in good agreement with those calculated from monte-carlo GEMINI.

Key words $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ α -Spectroscopy Mass yield distribution Sequential binary decay model