

## 44MeV/A $^{12}\text{C}$ 离子与铜相互作用中 靶余核的研究<sup>1)</sup>

李文新\* 孙彤玉\* 戚大海\*\* 孙儒林\*  
萨本豪\*\* 吴定清\* 赵莉莉\* 靳根明\*

\* (中国科学院近代物理研究所, 兰州) \*\* (中国原子能科学研究院, 北京)

### 摘 要

在 44MeV/A 的  $^{12}\text{C}$  离子和铜的相互作用中, 用核化学技术测定了 35 个靶余核的截面以及前向平均射程。得到了同量异位素分布、质量分布和径向动量转移。质量分布和同量异位素分布与推广的统计模型和蒙特卡罗方法计算结果满意地相符。

### 一、引 言

近年来中能重离子核反应的研究引起了人们的极大兴趣, 因为预期反应动力学变化正发生在这个能区。已经知道, 低能 ( $E_i \leq 10\text{MeV}/A$ ) 反应平均场动力学起着主要作用, 主要反应有全熔合及深部非弹性过程。在另一极端, 高能 ( $E_i \geq 200\text{MeV}/A$ ) 反应涉及核子-核子碰撞动力学, 并能用参加者-旁观者模型解释。这两个能区已经有较长的研究历史, 而中能区仅仅由于近几年来随着中能加速器的出现才成为具有极大吸引力的研究领域。

作为近代物理研究所的重离子加速装置(HIRFL)上的第一批实验, 我们用放射化学的厚靶-厚收集箔技术研究了 44MeV/A  $^{12}\text{C}$  和天然 Cu、 $^{93}\text{Nb}$ 、 $^{181}\text{Ta}$  的相互作用。本文报道 47MeV/A 的  $^{12}\text{C}$  与天然铜反应中靶余核的产额和径向动量转移的研究结果。

在天然铜和 86MeV/A 的  $^{12}\text{C}$  离子作用中, 产物截面以及厚靶反冲性质已有一些报道<sup>[1-3]</sup>。Cho 和他的同事们研究了 35MeV/A  $^{12}\text{C}$  和 Cu 作用中靶余核的质量分布和径向动量转移<sup>[4]</sup>。最近他们把类似的研究拓广到 15—45MeV/A  $^{12}\text{C}$  的范围内<sup>[5]</sup>, 而 Pienkowski 等人则在 10—50MeV/A 能区用厚靶-厚收集箔技术较系统地研究了  $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$  的反应<sup>[6]</sup>。

中能反应研究中实验结果的理论解释尚不成熟。就靶碎片的产额质量分布而言, 无论是用蒙特卡罗的级联蒸发计算<sup>[2]</sup>; 还是假设了非完全熔合, 再用蒸发程序 EVA 或考虑预平衡发射的 Alice 程序<sup>[4]</sup>描述退激发过程都不能满意地符合 86MeV/A 和 35MeV/A  $^{12}\text{C}$  离子和 Cu 靶反应的质量分布。但是, 最近萨本豪等人使用破碎统计模型成功地符

本文 1989 年 8 月 21 日收到, 12 月 13 日收到修改稿。

1) 中科院七五重大课题和国家自然科学基金资助项目。

合了  $35\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$  的质量分布<sup>[7]</sup>。因此本工作的目的主要在于测量  $44\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$  反应的质量分布,并通过和理论比较进一步检验破碎统计模型的适用性,同时观察与一定产物形成有关的平均径向动量转移,以得到更多的关于反应机制演化的资料。

## 二、实 验

照射在中国科学院近代物理研究所的 HIRFL 上进行。18.0mg/cm<sup>2</sup> 厚的 99.99% 纯铜箔夹在两片 Mylar 膜之间组成 Cu 靶组。Cu 靶组和同样方式组成的 <sup>93</sup>Nb 靶组同时进行照射,两个靶组之间以及整个靶组两端分别放置 Mylar 膜用来防止两个反应产物的干扰,同时兼用为空白箔,所有 Mylar 膜厚度均为 10.5mg/cm<sup>2</sup>。

整个靶组安装在处于真空中的法拉第筒前面,法拉第筒的偏压环上加负 100 伏偏压以抑制电子的逃逸。加速器引出的  $47\text{MeV}/A^{12}\text{C}$  先穿过 Nb 靶组,然后是 Cu 靶组。<sup>12</sup>C 离子经过 Mylar 和 Nb 箔后在 Cu 靶中心的能量为 527MeV,或  $43.9\text{MeV}/A^{[8]}$ 。照射持续约 39 小时,束流强度用电流积分器和定标器周期性地记录。典型流强为 5—10enA,总的积分束流达 746 $\mu\text{c}$  或  $7.8 \times 10^{14}$  个 <sup>12</sup>C 离子。

照射结束,前冲和后冲收集箔以及靶子分别用效率已刻度过的 HPGe  $\gamma$  射线能谱仪分析。 $\gamma$  活性测量在照射结束 33 分钟后开始,测量持续 2 个月,最长获取时间为 14 小时。根据  $\gamma$  活性强度,样品与探测器表面之间距离在 20—4cm 范围内变化,以减少死时间和级联  $\gamma$  引起符合的计数损失。

记录在 4096 道上的  $\gamma$  能谱用 SAMPO<sup>[9]</sup> 程序分析。衰变曲线用 TAU 88 程序在 Tektronix-4014 图象终端上分析。放射性核素鉴定以及产额计算方法已在别处描述了<sup>[10]</sup>。计算产额用的核数据引自文献[11]。靶子及收集箔上测定的产额相加得到该核素的生成截面。

## 三、结 果

### 1. 截面

本工作中测定了从 <sup>22</sup>Na 到 <sup>67</sup>Ga 共 35 个放射性核素的生成截面(见表 1)。列出的误差为标准偏差,它包括  $\gamma$  谱分析误差、最小二乘法分解衰变曲线误差以及 5% 的  $\gamma$  探测效率误差。靶厚误差可以忽略,但束流测量误差未包括在内。作为空白的 Mylar 膜上除了膜和 <sup>12</sup>C 作用生成的 <sup>7</sup>Be 和 <sup>24</sup>Na 外,未检出明显的其他活性,表明实验中使用的 Mylar 膜足够厚,已阻挡住了 Nb 靶反冲出来的全部活性。表 1 中 <sup>24</sup>Na 的生成截面已扣除了 Mylar 膜中直接生成的活性。

### 2. 电荷分布

尽管实验测定了大量核素的截面,但它们只代表总反应截面的一部份。为了获得质量产额分布必须借助电荷分布函数,估计未测定核素的生成截面。为此假定,同量异位素的独立产额  $\sigma(Z, A)$  可用高斯电荷分布函数描述:

表 1 44MeV/A<sup>12</sup>C + Cu 反应中放射性核素的生成截面

核素	截面 (mb)	核素	截面 (mb)	核素	截面 (mb)
<sup>22</sup> Na	3.24±0.45	<sup>45</sup> Sc	1.44±0.13	<sup>57</sup> Ni	3.08±0.18
<sup>24</sup> Na	2.74±0.36	<sup>48</sup> V	43.1±3.0	<sup>58</sup> Co	92±12
<sup>26</sup> Mg	0.21±0.02	<sup>48</sup> Cr	1.02±0.08	<sup>58</sup> Co <sup>m</sup>	88±11
<sup>41</sup> Ar	0.94±0.12	<sup>49</sup> Cr	10.4±2.6	<sup>59</sup> Fe	3.55±0.26
<sup>42</sup> K	6.91±0.70	<sup>52</sup> Mn	40.6±2.5	<sup>60</sup> Co	25.7±2.4
<sup>43</sup> K	2.07±0.15	<sup>52</sup> Mn <sup>m</sup>	6.6±4.3	<sup>60</sup> Cu	14.6±1.6
<sup>43</sup> Sc	7.6±2.8	<sup>52</sup> Fe	0.54±0.05	<sup>61</sup> Cu	49.8±3.8
<sup>44</sup> Sc	8.5±1.0	<sup>54</sup> Mn	79.1±7.8	<sup>62</sup> Zn	5.79±0.45
<sup>44</sup> Sc <sup>m</sup>	18.4±1.4	<sup>55</sup> Co	5.32±0.42	<sup>63</sup> Zn	18.9±2.0
<sup>46</sup> Sc	20.2±1.7	<sup>56</sup> Mn	8.12±0.54	<sup>64</sup> Zn	17.3±1.9
<sup>47</sup> Ca	0.12±0.02	<sup>56</sup> Co	32.0±2.1	<sup>67</sup> Ga	0.50±0.11
<sup>47</sup> Sc	7.48±0.71	— <sup>57</sup> Co	110.7±8.5		

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

其中  $\sigma(A)$  为质量产额, 即该质量各同量异位素独立产额之和;  $\sigma_z$  为电荷分布宽度参数;  $Z_p(A)$  为该质量的最可几电荷, 并用

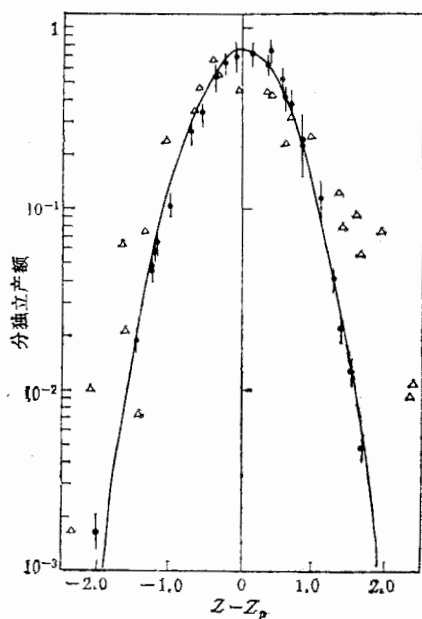
$$Z_p(A) = K_0 + K_1 A + K_2 A^2 \quad (2)$$

计算. 这里  $K_0, K_1, K_2$  为常数;  $A$  为质量数. 本工作  $A = 48$  质量链上测定了 <sup>48</sup>Sc, <sup>48</sup>V 和 <sup>48</sup>Cr 3 个核素的产额, 考虑了来自母体  $\beta^+$  衰变的贡献后利用方程(1)解得:  $\sigma_z = 0.529$ ,  $Z_p = 22.47$ . 这与 Lund 以及 Cho 等人在 86MeV/A 和 35MeV/A 的 <sup>12</sup>C + Cu 反应中采用的值都非常接近<sup>[1,4]</sup>. 表明在所研究的能区, 电荷分布参数对入射弹核能量变化并不灵敏. 因此我们取公式(2)中  $K_1$  和  $K_2$  分别为 0.479 和  $-2.15 \times 10^{-4}$ <sup>[4]</sup>. 于是固定  $\sigma_z = 0.529$ , 在划分的若干质量区间内分别调节  $K_0$  值, 使得实验测定的产额对母体  $\beta$  衰变馈送修正后得到的相对独立产额  $\sigma(Z, A)/\sigma(A)$  能最好拟合公式(1)的高斯电荷分布函数. 只有对近靶产物 ( $59 < A < 67$ ), 为了得到更好的拟合, 电荷分布宽度参数  $\sigma_z$  取作 0.58.

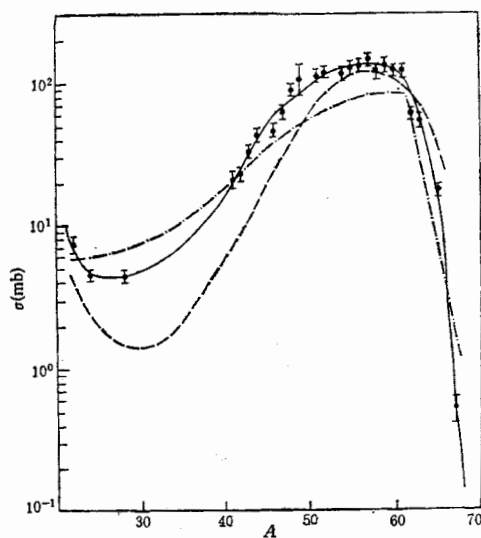
图 1 画出了宽度参数  $\sigma_z = 0.529$  的高斯电荷分布曲线. 对于  $A < 58$  的产物, 实验测定的产额经  $\beta$  衰变馈送修正后得到的相对独立产额能非常满意地与曲线相符. 通过电荷分布计算得到的质量产额分布见图 2. 使用本文描述方法不需要象有些工作那样<sup>[4,5]</sup> 须预先作出关于质量分布函数形式的假设.

### 3. 反冲性质

根据前向收集箔和后向收集箔中活性, 可以计算前向和后向收集箔中的活性占该核素总活性的相对份数 F 和 B 值. 这两个值是与反冲角分布及射程都有关的综合量度. 在厚靶-厚收集箔中更具有明确物理意义的是平均前向射程 FW 和前后向发射比 F/B, 其中  $W$  是靶的厚度. 测量结果列在表 2 中, 误差按误差的传递公式计算. 除了 <sup>24</sup>Na 能在 Mylar 中直接生成外, 实验还发现束流下向 Mylar 中 <sup>24</sup>Na 活性显著大于束流上向

图1  $44\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$  反应的电荷分布曲线

●——实验测定结果；△——理论计算值

图2  $^{12}\text{C} + \text{Cu}$  反应的质量分布

—— $44\text{MeV}/A$ (本文);

--- $35\text{MeV}/A^{12}$ ; -·-·- $86\text{MeV}/A^{12}$

表2  $44\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$  反应中靶余核的反冲性质

核素	$FW$ ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	F/B	$v_{\parallel}/v_{CN}$	核素	$FW$ ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	F/B	$v_{\parallel}/v_{CN}$
$^{23}\text{Na}$	$5.8 \pm 1.8$	$1.61 \pm 0.51$		$^{52}\text{Mn}$	$2.01 \pm 0.12$	$206 \pm 21$	$0.47 \pm 0.05$
$^{24}\text{Na}$	$4.41 \pm 0.64$	$6.7 \pm 1.6$		$^{52}\text{Mn}^m$	$2.0 \pm 1.5$		$0.45 \pm 0.34$
$^{25}\text{Mg}$	$4.56 \pm 0.69$			$^{52}\text{Fe}$	$1.94 \pm 0.30$		$0.47 \pm 0.07$
$^{42}\text{K}$	$2.32 \pm 0.35$		$0.53 \pm 0.08$	$^{56}\text{Mn}$	$1.80 \pm 0.28$	$94 \pm 43$	$0.41 \pm 0.06$
$^{43}\text{K}$	$2.43 \pm 0.22$	$54.9 \pm 9.5$	$0.54 \pm 0.05$	$^{55}\text{Co}$	$1.59 \pm 0.17$	$56 \pm 45$	$0.38 \pm 0.04$
$^{43}\text{Sc}$	$2.19 \pm 0.86$	$103 \pm 48$	$0.53 \pm 0.20$	$^{56}\text{Mn}$	$1.46 \pm 0.16$	$55 \pm 46$	$0.34 \pm 0.04$
$^{44}\text{Sc}$	$2.18 \pm 0.32$	$241 \pm 187$	$0.53 \pm 0.07$	$^{56}\text{Co}$	$1.54 \pm 0.10$	$85 \pm 56$	$0.37 \pm 0.04$
$^{44}\text{Sc}^m$	$2.34 \pm 0.18$	$108 \pm 11$	$0.55 \pm 0.05$	$^{57}\text{Co}$	$1.36 \pm 0.15$		$0.33 \pm 0.04$
$^{46}\text{Sc}$	$2.17 \pm 0.23$	$60 \pm 13$	$0.50 \pm 0.05$	$^{57}\text{Ni}$	$1.40 \pm 0.14$		$0.34 \pm 0.03$
$^{47}\text{Sc}$	$2.19 \pm 0.32$	$61 \pm 11$	$0.49 \pm 0.07$	$^{58}\text{Co}$	$1.04 \pm 0.16$	$29 \pm 5$	$0.30 \pm 0.04$
$^{48}\text{Sc}$	$2.00 \pm 0.21$	$88.9 \pm 5.5$	$0.44 \pm 0.05$	$^{59}\text{Fe}$	$0.96 \pm 0.17$		$0.25 \pm 0.04$
$^{48}\text{V}$	$2.13 \pm 0.15$	$150 \pm 15$	$0.50 \pm 0.05$	$^{60}\text{Co}$	$0.65 \pm 0.06$		$0.20 \pm 0.02$
$^{48}\text{Cr}$	$2.30 \pm 0.24$		$0.54 \pm 0.05$	$^{60}\text{Cu}$	$0.74 \pm 0.16$		$0.22 \pm 0.05$
$^{49}\text{Cr}$	$2.01 \pm 0.87$		$0.48 \pm 0.20$	$^{61}\text{Cu}$	$0.65 \pm 0.07$		$0.20 \pm 0.02$
$^{51}\text{Cr}$	$2.07 \pm 0.32$		$0.48 \pm 0.07$	$^{62}\text{Zn}$	$0.72 \pm 0.11$		$0.22 \pm 0.03$

Mylar 中活性,表明 Mylar 中生成的  $^{24}\text{Na}$  有足够大的前向射程,使得相当部分的  $^{24}\text{Na}$  转移到邻近的束流下方的 Mylar 中。本工作测定了不同几何排列的 3 片空白 Mylar 膜的  $^{24}\text{Na}$  活性,因此能对  $^{24}\text{Na}$  的反冲进行修正。 $44\text{MeV}/A^{12}\text{C}$  和  $\text{Cu}$  相互作用中,靶余

核在靶中的前向平均射程随着余核质量数增加而减小。引人注意的是对于最轻的三个产物  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Na}$  和  $^{28}\text{Mg}$  有相当大的反冲射程。从表 2 还可以看到, F/B 是相当大的,除了  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Na}$  外,典型的 F/B 值约在 100 左右。这些反冲性质表明,靶余核的生成伴随着相当大的动量转移。

## 四、讨 论

### 1. 质量分布

从图 2 的质量产额分布曲线可见,质量分布在略低于靶质量附近呈一较宽的峰,峰位约在  $A = .57$  处。随着质量数下降,产额逐渐下降;到  $A$  接近 30 时,产额降到最小;之后随质量进一步减少,产额反而增加。在  $35\text{MeV}/A$  和  $86\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$  反应中,发现唯一的原子序数比靶更重的超靶核素为  $^{65}\text{Zn}$ 。本工作除了  $^{65}\text{Zn}$  外,还发现  $^{67}\text{Ga}$ , 其生成截面只有  $0.5\text{mb}$ 。

质量分布曲线总的形状与  $35\text{MeV}/A$  和  $86\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$  的结果相似(见图 2)。但是仍能看到随着入射弹核能量增加,质量分布的峰变宽,产额随质量数下降的斜率变小,而质量数最低的几个核素的相对产额上升。本工作得到的平均质量数为 53.4, 处于  $35\text{MeV}/A$  的 55.2 和  $86\text{MeV}/A$  的 51.1 之间。这个结果表明,在本文所研究的能区,较高的轰击能量对应存在着较高的激发能,从而导致了较大的质量损失。

Cumming 等人<sup>[12]</sup>发现,  $^{12}\text{C} + \text{Cu}$  反应中质量产额曲线指数区的斜率随着轰击能量增加而减小,并且是在初始相互作用中转移给组成体系平均激发能的量度。本工作测定的质量分布在该质量区间并不呈指数变化。但是,为了和其他工作相比较,象 Cho 等人<sup>[4]</sup>工作一样,我们在  $37 < A < 57$  之间进行指数拟合,得到斜率为每质量单位 12.5%, 处于  $35\text{MeV}/A$  和  $86\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$  得到的 19% 和 9% 之间<sup>[6,9]</sup>,也是符合 Cumming 等人的系统性的。

对图 2 的质量分布在  $A = 28-65$  范围内求和,得到总反应截面为  $2.23 \pm 0.33\text{b}$ 。没有考虑  $A < 28$  的产额,因为深信这部份产物是二重甚致多重碎裂过程产生的。Kox 等人曾提出了参数化的总反应截面计算表达式<sup>[13]</sup>。Sanit-Laurent 等人使用  $4\pi-\gamma$  方法,在比较宽的各种炮弹-靶子体系范围内测定了反应总截面,发现 Kox 提出的公式能很好拟合实验结果<sup>[14]</sup>。使用同样的参数,我们计算了  $44\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$  的反应总截面为  $2.20\text{b}$ ,与本工作测定结果惊人地相符。

### 2. 与统计模型计算的比较

把原适用于描述高能重离子反应破碎过程的统计模型推广应用到中能重离子反应,成功地再现了  $35\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$  反应靶余核的质量分布<sup>[7]</sup>。本文再次使用推广的统计模型和蒙特卡罗方法<sup>[15]</sup>计算了  $44\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$  的质量分布和电荷分布,以便观察不同入射能量下理论和实验符合情况。计算中使用了理论参数  $R_{T0} = 1.90\text{fm}$ ,  $C_p = 0.73$  ( $R_{T0}$  和  $C_p$  分别为表征系统破碎体积的半径参数和有效激发能比例因子)。计算结果和实验值的比较见图 1 和图 3。

由图3可见,靶碎片质量分布的理论计算结果和实验符合得相当好.尤其是峰的位置,

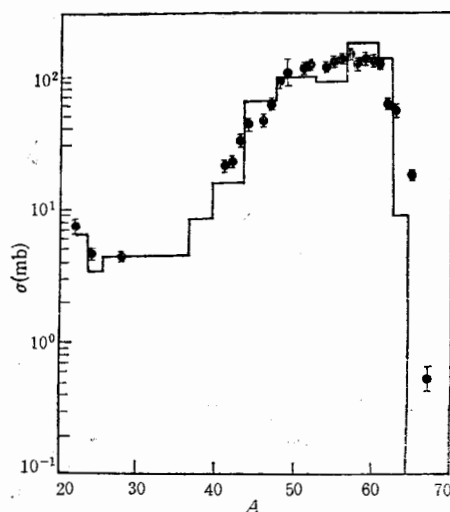


图3 实验的质量分布与推广的统计模型计算值的比较

尤其是峰的位置,  $A \sim 40$  质量区分布的斜率以及  $A < 30$  后质量产额回升等特点在理论结果中都得到了再现.但是重质量区 ( $A > 63$ ) 实验和理论值分歧较大,因为这些余核主要来自弹核和靶核之间直接的相互作用,例如转移反应,非弹性散射,而本文使用的理论模型不包括弹性道的贡献.因此,在这个区域内理论和实验结果的偏离是可以理解的.但是在近靶区,例如  $56 < A < 60$ ,理论与实验数据的符合与后面将提到的线性动量转移存在着一定矛盾.根据线性动量转移数据我们知道这个质量区产物主要来自周边碰撞,因此没形成复合系统也不在理论计算的考虑之内.所以在这个质量区理论计算似乎过高估计了产物的产额.但

从整体上看,理论计算结果还是很好再现了实验结果.电荷分布的理论计算结果和实验测定值基本上满意地相符.虽然理论计算的电荷分布两翼比实验结果更宽(见图1),但是半高度处的全宽度二者则基本一致.此外,理论计算的电荷分布峰位略偏向丰中子一边.

实验和理论计算结果很好相符这个事实再次指出,热核的解体可以用统一的统计模型描述,而不管这个热核的生成涉及到的是中能还是高能碰撞.同时还表明,在本文研究的  $44\text{MeV}/A^{12}\text{C}$  和  $\text{Cu}$  相互作用中多重破裂是重要的反应机制之一.

### 3. 径向动量转移

重离子反应中径向动量转移(LMT)能提供反应机制怎样随入射弹核能量增加从全熔合向非完全熔合以至破裂演化的资料;同时,还能够得到关于沉积在复合体系中的激发能的某些特征.从放射化学的厚靶-厚收集箔测量提取LMT基于二步矢量模型(the two-step model)假设从  $2W(F+B)$  和  $F/B$  值计算<sup>[16]</sup>.这个方法在高中能反应研究中广泛被使用.在本文涉及的中能区,正如前面所述,反应中动量转移相当大,而且余核反冲射程近似正比于反冲速度.因此,在反应的第二步即退激发阶段,由于粒子蒸发,传递给余核的反冲速度  $V$  可以忽略.余核的反冲速度主要在初始相互作用中由弹核转移给复合体系的速度  $v_{\parallel}$  所决定.于是和 Cho 等人一样<sup>[4]</sup>采用 Winsberg 和 Alexander 提出的方法<sup>[17]</sup>,把相应于余核在靶中前向射程  $FW$  的速度认为是  $v_{\parallel}$ .此外,本工作计算  $v_{\parallel}$  时还忽略了角分布的影响.估计这项使转移动量减小的修正因子显著低于 15%<sup>[18]</sup>.计算中使用了 Nortkclifle 和 Schilling 的能量-射程表<sup>[19]</sup>,得到的表征径向动量转移的  $v_{\parallel}/v_{CN}$  值列在表2中,其中  $v_{CN} = 1.487 (\text{MeV}/u)^{1/2}$  是假设的复合核的反冲速度.

各反应产物的  $v_{\parallel}/v_{CN}$  值对产物的质量损失  $\Delta A (=A_T - A_P, A_T$  和  $A_P$  分别为靶核与产物的质量数) 关系见图 4. 从图 4 可以看到, 相对径向动量转移  $v_{\parallel}/v_{CN}$  值随质量损失增加而增加, 从靠近靶子产物的约 20% 增加到轻产物的约 54%. 权重了实验测定的质量产额分布以后, 得到的整个反应 (即所有碰撞参数的积分) 相对径向动量转移平均值为  $0.38 \pm 0.05$ . 相当于径向动量转移为  $1.3 \pm 0.2$  GeV/C. 图 4 还指出了 35 MeV/A 和 86 MeV/A 的 <sup>12</sup>C + Cu 反应中类似的测量结果<sup>[3,4]</sup>.  $v_{\parallel}/v_{CN}$  对  $\Delta A$  的关系曲线大致有相似的形状, 并且显然可见, 相对径向动量转移随入射弹核能量增加而减小. 这与已经发现的 LMT 随入射弹核速度增加以近似线性形式下降的系统性相一致<sup>[20]</sup>.

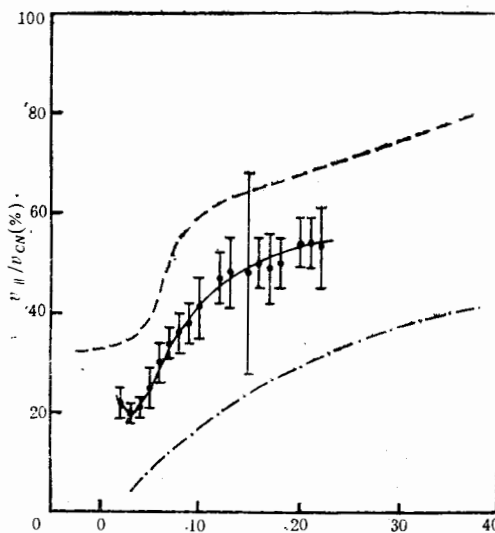


图 4 相对 LMT 随质量损失  $\Delta A$  的变化

— 44 MeV/A (本文);

--- 35 MeV/A<sup>[3,4]</sup>; - · - · - 86 MeV/A<sup>[3]</sup>

但是, 定量考察 LMT 可以发现本工作测定的相对动量转移要明显低于 LMT 系统性预言的 0.50—0.65<sup>[21,22]</sup>. 偏低的原因一方面在于本工作测定的是全部碰撞参数的平均值, 包括了只转移很少动量的准弹性转移反应; 另一方面, 最近关于 LMT 研究有迹象表明, 相对 LMT 除了主要取决弹核速度外, 还与靶质量及弹核种类有关<sup>[18]</sup>. 重靶转移动量较轻靶大, 而象 <sup>4</sup>He 这样的轻离子比重离子转移动量大. 考虑到这些因素, <sup>12</sup>C + Cu 反应转移较低的相对 LMT 也就不难理解了.

根据径向动量转移数据可以获得初始相互作用以后沉积在复合体系中的激发能. 如果认为重离子和靶核初始相互作用为一个非完全熔合过程, 而未被俘获的弹核核子以束流速度向 0° 逃逸. 在上述假设下, 根据 Jastzebski 等人工作<sup>[23]</sup>, 并假定蒸发一个核子平均需要 10 MeV 激发能, 则从实验测定的平均质量数可以得到复合体系的平均激发能为 150 MeV.

与生成最终产物有关的初始碰撞形成的复合体系激发能  $E^*$  可以按公式

$$\frac{E^*}{E_{CN}} = 0.8 \frac{\langle v_{\parallel} \rangle}{v_{CN}} \quad (3)$$

计算<sup>[23]</sup>. 其中  $E_{CN}$  是假定发生全熔合的复合体系激发能. 计算结果表明, 激发能随质量损失  $\Delta A$  的增加从约 80 MeV 增加到 340 MeV. 合并考虑到 LMT 随  $\Delta A$  增加而增加这个事实, 我们可以得到结论, 近心碰撞伴随大的 LMT, 形成较高激发能的中间复合体系, 导致大量核子蒸发, 最后产生较轻的反应产物. 相反, 周边碰撞结果导致产生近靶产物, 伴随较小的 LMT 和较低的激发能. 使用放射化学技术可以区分近心碰撞和周边碰撞过程, 这对进一步研究径向动量转移是很有意义的.

衷心感谢重离子加速器全体人员为我们完成在 HIRFL 上第一个实验所作出的巨大努力。张立,李宗伟,秦芝和李云生参加了部份工作,谨表示谢意。

### 参 考 文 献

- [1] T. Lund et al., *Physics Letters*, **102B** (1981), 239.
- [2] T. Lund et al., *Z. Phys.* **A306**(1982), 43.
- [3] L. Kowalski, P. E. Haustein and J. B. Cumming, *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 642.
- [4] S. Y. Cho et al., *Phys. Rev.*, **C36**(1987), 2349.
- [5] N. T. Porile et al., Proc. Third Inter. Conf. on Nucleus Nucleus Collisions (France, 1988) P. 65.
- [6] L. Pienkowski et al., *ibid.*, P. 63.
- [7] 萨本豪、郑玉明、张孝泽,“中能重离子反应破碎过程的统计描述”,高能物理与核物理,(待发表).
- [8] 陈家超,陈克勤,马峰,“快离子辐照损伤能量深度分布理论计算”,高能物理与核物理,(待发表).
- [9] T. Routti and S. G. Prussin, *Nucl. Instrum. Methods*, **72**(1969), 125.
- [10] 李文新,孙彤玉,“核化学研究中  $\gamma$  能谱的测量和分析”,原子能科学与技术,(待发表).
- [11] U. Reus and W. Westmeier, *At. Data Nucl. Data Tables*, **29**(1983), No. 2.
- [12] J. B. Cumming et al., *Phys. Rev.*, **C17** (1978), 1632.
- [13] S. Kox et al., *Phys. Rev.*, **C35**(1987), 1678.
- [14] M. G. Saint-Laurent et al., *Z. Phys.*, **A332**(1989), 457.
- [15] Sa Ben-hao, Zheng Yu-ming and Zhang Xiao-ze, “Statistical Model for the Disassembly Processes of Medium Energy Heavy-Ion Reactions” (Submitted to *Phys. Rev. C*).
- [16] L. Winsberg, *Nucl. Instrum. Methods*, **150**(1978), 465.
- [17] L. Winsberg and J. M. Alexander, *Phys. Rev.*, **121**(1961), 518.
- [18] T. Batsch et al., *Phys. Lett.*, **B189**(1987), 287.
- [19] L. C. Northcliffe and R. F. Schilling, *Nucl. Data Tables*, **A7**(1970), 233.
- [20] V. Viola et al., *Phys. Rev.*, **C36**(1982), 178.
- [21] E. Tomasi et al., Proc. Second Inter. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions, Vol. 1, P. 60.
- [22] J. Jastrzebski et al., *Phys. Lett.*, **136B** (1984), 153.
- [23] J. Jastrzebski et al., *Phys. Rev.*, **C34**(1986), 60.

## STUDY ON TARGET RESIDUES FROM THE INTERACTION OF COPPER WITH 44 MeV/A $^{12}\text{C}$ IONS

LI WENXIN\* SUN TONGYU\* QI DAHAI\*\* SUN RULIN\* SA BENHAO\*\* WU DINGQING\*  
ZHAO LILI JIN GENMING\*

\*(Institute of Modern Physics, Lanzhou)

\*\* (Institute of Atomic Energy, Beijing)

### ABSTRACT

Cross sections and average forward ranges were determined for 35 target residues from the interaction of copper with 44 MeV/A  $^{12}\text{C}$  ions with nuclear chemistry techniques. From these data the isobaric yield distribution, the mass yield distribution and the longitudinal momentum transfer were obtained. The mass yield distribution and the isobaric yield distribution are in good agreement with those calculated from a modified statistical model and corresponding Monte Carlo technique.