

20—46MeV/u ^{12}C 离子和Cu相互作用中靶余核的反冲性质研究*

吴定清 李文新 孙彤玉 孙儒林 赵莉莉
张丰收 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)

1994-12-06 收稿

摘 要

使用离线 γ 能谱法和厚靶-厚收集箔技术测量了20—46MeV/u ^{12}C 离子和铜相互作用中余核的前向平均反冲射程,导出了中心碰撞的线性动量转移.当轰击能量为27.5MeV/u时,每个入射核子转移的线性动量达到155MeV/c的最大值.复合系统的最大激发能为每核子2.5MeV.

关键词 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$, $E_i = 20 - 46\text{MeV/u}$, 厚靶-厚收集箔, 最高核温度, 中心碰撞线性动量转移.

1 引 言

在过去的近十年中,大量的工作致力于研究重离子碰撞中线性动量转移(LMT).LMT的研究不仅可以探讨重离子反应如何从平均场控制的低能反应向核子-核子碰撞起主要作用的高能反应演化,而且有助于了解原子核稳定性的极限.至今测量重离子碰撞中LMT的实验方法可分为三类,即裂变碎片角关联,飞行时间和放射化学方法.迄今,关于LMT的大量实验数据主要是用裂变碎片角关联测量获得的^[1].飞行时间法主要用于低能向中能过渡能区的重离子与轻核或中质量核的相互作用,并仅限于测量反应中产生的类熔合产物的反冲速度^[2].测量余核反冲射程的放射化学方法广泛地应用于LMT的研究,因为该方法能精确指定余核的Z和A,不受轰击能量、靶核质量范围以及探测器截止阈的限制.

在中能重离子和Cu相互作用中,用放射化学方法研究LMT已有不少报道.轰击能量包括86MeV/u和22MeV/u^[3],35MeV/u^[4],15MeV/u,25MeV/u和45MeV/u^[5].最近Pienkowski等人报道了16—26MeV/u $^{14}\text{N} + \text{Cu}$ 以及8—46MeV/u $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$

* 国家自然科学基金资助.

的 LMT 研究结果^[6]. 本工作使用厚靶 - 厚收集箔技术在 20 — 46MeV/u 的 8 个轰击能量的 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应中研究了 LMT. 从反冲射程测量得到的平均 LMT 的实验结果已在别处报道了^[7], 本文报道重离子反应中最激烈的中心碰撞线性动量转移的研究结果.

2 实 验

使用标准的厚靶 - 厚收集箔技术测量 ^{12}C 和 Cu 相互碰撞中的线性动量转移. 靶组由 8 片 Cu 箔及相应前后向 Mylar 收集膜以及 Mylar 降能膜组成. 照射在近代物理研究所的重离子研究装置 HIRFL 上进行. 初始入射能量为 47MeV/u 的 ^{12}C 离子经过 Mylar 膜后, 在每片 Cu 靶中心处的平均能量依次为 46.4, 42.3, 38.5, 34.8, 31.1, 27.5, 24.0 和 20.5MeV/u^[8]. 实验过程已在文献 [7] 中作了报道.

3 结 果

本工作鉴定了从 ^{22}Na 到 ^{71}As 共 41 个放射性余核, 对于其中大部分余核, 得到了与 LMT 有关的 FW 值 (余核在靶物质中的平均射程), 这里 F 为余核在前向反冲收集箔中活性占该余核总活性的份数, W 为 Cu 靶厚度. 表 1 列出了 8 个轰击能量下余核的 FW 值, 给出的误差为标准偏差, 包括 γ 谱分析、衰变曲线分解和探测效率误差. 与文献 [4, 5] 相比, FW 值测量结果符合相当好, 在相同或相近的轰击能量下, 90% 的数据误差在 $\pm 15\%$ 范围内, 偏离大于 20% 的数据只占约 10%. 需要指出, 本工作中入射 ^{12}C 离子能量的误差未被考虑.

从厚靶 - 厚收集箔方法测量得到的核反冲性质的数据中提取的余核的速度在束流方向的投影 $v_{//}$ 是建立在二步矢量模型基础上的, 已在高能反应实验研究中讨论并应用了三十年之久. 在中能重离子反应中, Cho 等人比较了几种计算 $v_{//}$ 的方法之后指出^[9], 由于余核生成时伴随相当大的动量转移, 退激发阶段粒子发射对余核反冲速度的影响可以忽略. 因此, 在对射程作了转换之后, 从 FW 值就能提取 $v_{//}$. 最近 Pienkowski 等人在 $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$ 反应研究中详细讨论了 $v_{//}$ 的计算^[6]. 他们认为, 在中能反应中余核在前向收集箔和后向收集箔中的活性比 F/B 值相当大 (典型值约 $100^{[4,9]}$). 那么, 在余核所涉及到的质量区, 使用 Northcliffe-Schilling 的射程能量表^[10], 将 FW 值转换成的速度就是余核在束流方向反冲速度 $v_{//}$ 的一个相当好的近似. 本工作使用 Pienkowski 等人的方法计算了 8 个轰击能量下余核的径向反冲速度 $v_{//}$. 余核的反冲速度与假想形成全熔合的复合核的反冲速度之比 $v_{//}/v_{\text{CN}}$ 与余核的质量损失 ΔA 的依赖关系描绘在图 1 中. 其中质量损失定义为生成该余核时需要从靶核中移走的核子数, 即靶质量 A_T (取作 64) 与余核质量之差: $\Delta A = A_T - A_R$. 图中标出的误差不包括从 FW 转换成 $v_{//}$ 值时引进的系统误差. ^{24}Na 的 F/B 值很小, 表明它起源于其他反应机制, 因此没有给出这些轻余核的反冲速度.

图 1 显示了中能重离子碰撞中典型的 $v_{//}/v_{\text{CN}}$ 对 ΔA 的依赖关系^[5,6,9,11]. 对于 ΔA 接近零的近靶产物, 相对反冲速度最低, 因为它们起源于远距离碰撞的准弹性转移过程.

表1 20—46MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应中余核的前向平均反冲射程FW值

FW 核素	20.5	24.0	27.5	31.1	34.8	38.5	42.3	46.4
^{24}Na	5.75±0.83	5.50±0.76	5.79±0.94	6.04±0.93	5.47±0.78	5.31±0.86	4.62±0.64	4.57±0.65
^{28}Mg						4.28±0.98	3.89±0.86	3.66±0.72
^{42}K	2.82±1.4	2.59±0.42	2.49±0.41	2.51±0.53	2.51±0.43	2.64±0.44	2.22±0.35	2.10±0.34
^{43}K	2.75±0.56	2.58±0.44	2.69±0.31	2.48±0.34	2.23±0.22	2.23±0.22	2.11±0.17	2.01±0.17
^{43}Sc	1.50±0.48	1.70±0.57	1.39±0.25	1.28±0.31	1.47±0.28	1.41±0.27	1.44±0.25	1.56±0.27
$^{44}\text{Sc}^g$	2.00±0.39	2.13±0.41	2.04±0.53	2.14±0.50	2.19±0.38	1.96±0.33	2.01±0.31	2.06±0.45
$^{44}\text{Sc}^m$	2.38±0.25	2.35±0.25	2.71±0.31	2.53±0.28	2.28±0.23	2.29±0.24	2.08±0.19	2.05±0.21
^{46}Sc	2.50±0.27	2.49±0.28	2.75±0.31	2.64±0.27	2.41±0.22	2.35±0.25	2.23±0.23	2.04±0.23
^{47}Sc	2.66±0.46	2.56±0.41	2.32±0.46	2.56±0.38	2.46±0.38	2.14±0.34	2.21±0.34	2.10±0.31
^{48}Sc			2.43±0.81	2.76±0.78	2.22±0.32	2.30±0.31	2.28±0.25	2.20±0.29
^{48}V	2.24±0.21	2.26±0.20	2.41±0.17	2.49±0.26	2.25±0.20	2.11±0.19	2.19±0.12	1.83±0.16
^{48}Cr	2.15±0.39	2.22±0.31	2.42±0.26	2.62±0.25	2.10±0.25	2.10±0.33	2.04±0.22	1.98±0.23
^{49}Cr					2.00±0.61	2.08±0.51	2.10±0.60	2.13±0.48
^{51}Cr	2.22±0.40	2.23±0.32	2.54±0.30	2.45±0.36	2.25±0.33	2.13±0.36	1.99±0.30	1.85±0.28
$^{52}\text{Mn}^g$	2.30±0.15	2.19±0.16	2.51±0.17	2.44±0.15	2.13±0.13	2.06±0.14	1.81±0.11	1.71±0.11
^{52}Fe		2.09±0.39	2.35±0.33	2.27±0.65	2.04±0.35	1.84±0.29	1.82±0.29	1.68±0.26
^{54}Mn	2.37±0.35	2.33±0.36	2.43±0.29	2.35±0.26	2.11±0.31	1.91±0.30	1.66±0.21	1.52±0.25
^{55}Co	2.29±0.19	2.18±0.20	2.16±0.20	2.23±0.24	2.04±0.17	1.77±0.17	1.47±0.13	1.34±0.14
^{56}Mn	2.34±0.28	2.23±0.25	2.18±0.24	2.03±0.30	1.88±0.23	1.61±0.23	1.43±0.20	1.28±0.18
^{56}Co	2.13±0.15	2.15±0.15	2.21±0.14	2.05±0.12	1.84±0.14	1.65±0.14	1.47±0.09	1.27±0.10
^{57}Co	2.18±0.23	2.03±0.21	2.13±0.28	1.85±0.21	1.70±0.19	1.50±0.24	1.32±0.20	1.27±0.14
^{57}Ni	2.37±0.23	2.27±0.25	2.40±0.25	2.26±0.20	1.75±0.17	1.62±0.18	1.42±0.15	1.25±0.13
^{58}Co	2.08±0.30	1.94±0.28	2.00±0.28	1.79±0.26	1.52±0.23	1.33±0.20	1.12±0.17	1.03±0.15
^{59}Fe	1.99±0.24	1.76±0.34	1.65±0.21	1.56±0.16	1.39±0.30	1.31±0.19	0.91±0.18	0.94±0.22
^{60}Co	1.92±0.26	1.65±0.65	1.60±0.83	1.08±0.21	1.00±0.38	0.94±0.34	0.99±0.16	1.14±0.37
^{60}Cu	2.13±1.17	1.68±0.35	1.60±0.68	1.41±0.44	1.13±0.36	1.11±0.25		0.87±0.17
^{61}Cu	1.64±0.11	1.29±0.15	1.31±0.11	1.10±0.10	0.91±0.07	0.74±0.07	0.60±0.06	0.55±0.06
^{62}Zn	1.72±0.12	1.78±0.22	1.29±0.13	1.10±0.11	0.97±0.09	0.73±0.07	0.64±0.07	0.59±0.09
^{63}Zn	1.44±0.33	1.17±0.18	1.25±0.49		0.61±0.20			
^{65}Zn	1.66±0.25	1.38±0.21	1.13±0.18	1.02±0.18	0.74±0.15			
^{66}Ga	2.17±0.15	1.84±0.23	1.55±0.22	1.14±0.14				
^{67}Ga	2.20±0.17	1.71±0.15	1.72±0.15	1.41±0.16	1.05±0.20	0.97±0.18		
^{71}As	2.22±0.39	1.76±0.31						

随着 ΔA 的增加, 反冲速度也增加. 当 ΔA 超过约 15 以后, 反冲速度达到极大, 并且基本保持为常数, 不再随 ΔA 的增加而变化, 在 $v_{//}/v_{\text{CN}} \sim \Delta A$ 图中形成了一个相应于最大反冲速度的“坪”. 坪上各余核反冲速度的平均值定义为 $v_{//}^{\text{max}}$, 这个最大的反冲速度 $v_{//}^{\text{max}}$ 就是重离子中心碰撞形成类复合核的反冲速度^[6,9,11].

中能重离子反应主要是非完全熔合过程. 在这个过程中, 一部分炮弹核子和靶核相熔合, 而总质量为 Δm 的剩余炮弹核子以接近原始束流速度从 0° 方向逃逸. 因此, 非

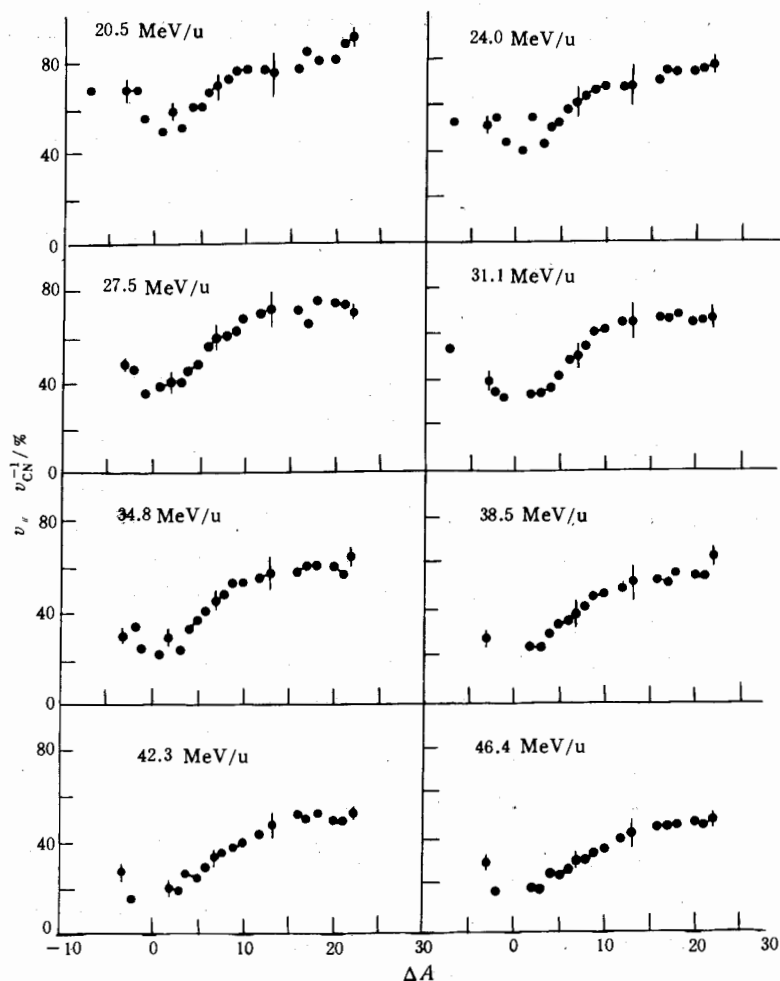


图1 相对速度 $v_{//}/v_{CN}$ 随质量损失 ΔA 的变化

完全融合过程中初始类复合核的反冲动量近似正比于和靶核相融合的那部分弹核的

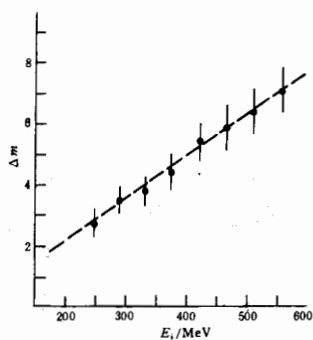


图2 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应中心碰撞的 $p_{//}^{\text{max}}/p_{\text{beam}}$ 和 $p_{//}^{\text{max}}/A$ 值列于表2, 其中 p_{beam} 为入射 ^{12}C 离子质量损失 Δm 和能量的依赖关系 子的动量。

质量。根据这个简单的模型, 从 $v_{//}^{\text{max}}$ 值可以计算重离子中心碰撞时从炮弹中逃逸的质量数 Δm 值, 计算结果给出在图2中。知道了 Δm 值, 则 ^{12}C 离子和 Cu 靶中心碰撞形成复合系统的平均质量就为复合核质量 A_{CN} 和 Δm 之差。 ^{12}C 转移给复合系统的线性动量即为最大反冲速度 $v_{//}^{\text{max}}$ 和复合系统平均质量的乘积, 记作 $p_{//}^{\text{max}}$ 。显然 $p_{//}^{\text{max}}$ 就是一定轰击能量的 ^{12}C 离子和 Cu 碰撞时可转移的最大线性动量, 也就是炮弹和靶核完全重叠时中心碰撞的 LMT^[6,11]。 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应中每个轰击能量下得到的 $v_{//}^{\text{max}}/v_{\text{CN}}$, Δm , $p_{//}^{\text{max}}$,

表2 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应中线性动量转移计算结果

E_i (MeV/u)	$v_{\text{CN}}^{\text{max}}/v_{\text{CN}}$	Δm (u)	$p_{\text{CN}}^{\text{max}}$ (GeV/c)	$p_{\text{CN}}^{\text{max}}/p_{\text{beam}}$	$p_{\text{CN}}^{\text{max}}/A$ (MeV/c)
20.5	0.80 ± 0.12	2.74 ± 0.41	1.81 ± 0.27	0.77 ± 0.12	151 ± 23
24.0	0.74 ± 0.10	3.53 ± 0.48	1.79 ± 0.24	0.71 ± 0.09	149 ± 20
27.5	0.72 ± 0.10	3.79 ± 0.53	1.86 ± 0.26	0.68 ± 0.09	155 ± 22
31.1	0.67 ± 0.09	4.43 ± 0.60	1.82 ± 0.25	0.63 ± 0.09	152 ± 21
34.8	0.59 ± 0.07	5.43 ± 0.64	1.67 ± 0.20	0.55 ± 0.06	139 ± 17
38.5	0.55 ± 0.07	5.91 ± 0.75	1.63 ± 0.21	0.51 ± 0.06	136 ± 17
42.3	0.51 ± 0.06	6.39 ± 0.75	1.57 ± 0.19	0.46 ± 0.05	131 ± 15
46.4	0.45 ± 0.05	7.10 ± 0.79	1.44 ± 0.16	0.41 ± 0.04	120 ± 13

4 讨 论

低能重离子碰撞中, 伴随全部动量转移的全融合反应占绝对优势. 当轰击能量高于库仑位垒约 5MeV/u 之后, 出现了非完全的 LMT. 随着入射弹核实验室系相对速度增加, 相对 LMT 近似以直线下降. 根据主要是易裂变靶核的实验结果, 相对 LMT 可用下面经验公式表示:

$$p_{\text{CN}}/p_{\text{CN}}^{\text{max}} = -0.092\sqrt{E/A} + 1.273, \quad (1)$$

并且和入射重离子的种类几乎无关^[12]. 从图 3 可以看到, 本工作在 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应中测定的相对 LMT 也随着入射 ^{12}C 离子的速度增加而线性下降, 但是下降的速率比系统性预言的快得多, 表明了相对 LMT 与靶质量的依赖关系. 类似的趋势在我们以前的工作中也注意到了, 并且和引导粒子模型计算结果相符^[11,13]. 另一方面, 本工作得到的结果比 $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$ 反应中测得的相对 LMT 更大, 表明用不同重离子轰击 Cu 靶时, 较轻的重离子能转移更多的线性动量. 这和费米动量球模型预言相符^[11,14].

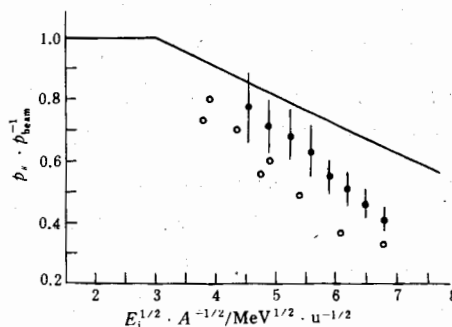


图3 相对线性动量转移与入射弹核相对速度的关系

相对 LMT 随轰击离子的速度增加而减少, 而炮弹中每个核子携带的动量随轰击离子的速度增加而增加, 这两种相反作用的影响使得每个人射核子转移的线性动量往往随轰击能量增加先增加随后减小, 出现了一个 LMT 的最大值. 这个最大可转移的线性动量和原子核的极限稳定性有着密切的联系. ^{12}C 同 ^{14}N 和 ^{238}U 相互作用中, 当轰击能量为 35MeV/u 时, 每个人射炮弹核子转移的线性动量达到 200MeV/c 的极限^[11]. Cho 等人在 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应中用放射化学方法得到每个炮弹核子可转移的最大线性动量为 142MeV/c, 极大值位于约 23MeV/u 处^[5]. 但该工作得到的是平均 LMT, 即包括了周边碰撞和中心碰撞的权重平均值. 在 $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$ 反应中, Pienkowski 等人指出, 对于中心碰撞, 每个人射

核子转移的线性动量在轰击能量约为 11MeV/u 时达到极大, 其极大值为 140 MeV/c^[6]. 本工作, 正如图 4 所指出的, 极大值发生在 27.5MeV/u 处, 对应每个炮弹核子可转移的线性动量为 155MeV/c. 应该指出, 极大值并不十分突出.

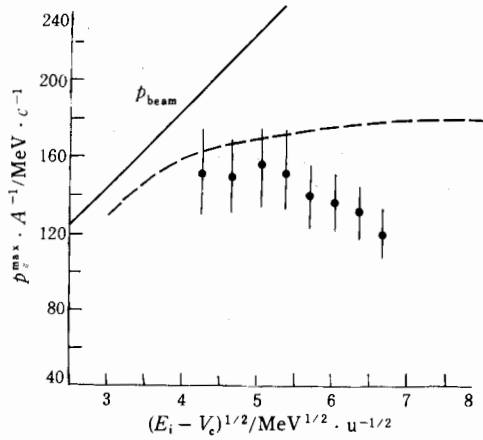


图 4 每个弹核转移的线性动量与弹靶相对速度参数 $\sqrt{(E - V_C)/A}$ 的依赖关系

实验点为本文测量结果, 实线为入射弹核动量, 虚线为激子模型计算结果.

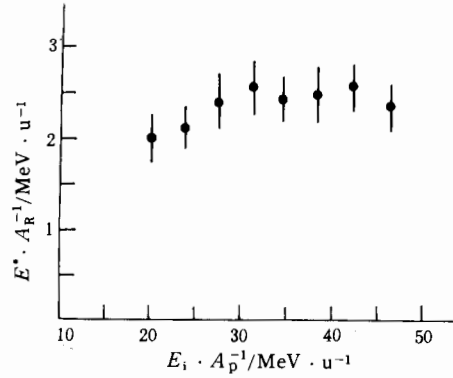


图 5 中心碰撞中复合系统单核子激发能

已有若干理论模型解释 LMT 的实验结果, 例如费米球模型, 波尔兹曼主方程方法和两体耗散机制等. 本工作使用激子模型计算了 ¹²C 离子和 Cu 相互作用的 LMT, 在考虑预平衡粒子发射时, 计算中引进了集团发射的新自由度^[15], 计算结果见图 4. 总的说来, 计算结果高估了实验值, 虽然在低能区, 理论值尚能近似再现实验结果, 但高于 27.5MeV/u 后, 计算值偏离实验值越来越大, 类似的理论计算趋势也曾被看到^[6].

从 LMT 的实验数据可以估计重离子碰撞中形成热平衡的复合系统的激发能. Jastrzebski 等人用下式计算激发能 E^* ^[16]

$$\frac{E^*}{E_{CN}} = K \frac{p_{\parallel}^{\max}}{p_{\text{beam}}}, \quad (2)$$

这里 E_{CN} 是全熔合复合核的激发能, K 为比例系数, 根据核内级联模型计算, K 值在 0.7 — 0.8 范围内. Cho 等人根据非完全熔合模型假设, 使用 Δm 值计算了复合系统激发能^[5]. 而 Pienkowski 等人则根据同样假设按下式计算激发能^[6]:

$$E^* = \frac{1}{2} v_{\text{beam}}^{\max} v_{\text{beam}} A_T + Q, \quad (3)$$

其中 v_{beam} 为 ¹²C 离子速度, A_T 为靶质量. 计算 Q 值时进一步假设质量 Δm 是以自由核子形式逃逸. 本工作表明, 后两种方法计算结果彼此很接近, 而比(2)式计算结果大约高 5% — 20%. 使用(3)式计算结果指出, 激发能随着轰击能量而增加, 当轰击能量超过 27.5MeV/u 时, 激发能趋于饱和, 其平均值约 173MeV. 单核子激发能随轰击能量变

化的依赖关系给出在图5中。在较高轰击能量下, 激发能为每核子2.5MeV, 相当于核温度的平均值为4.5MeV。本文实验结果和 $^{14}\text{N} + \text{Cu}$ 以及 $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$ 反应测定的相接近^[6]。由此可见, 对于 ^{12}C 、 ^{14}N 和 ^{20}Ne 离子和Cu的相互作用, 中心碰撞形成平衡复合体系的单核子激发能无多大区别。

感谢HIRFL全体运行人员为本实验提供了高效率的照射条件; 对敬岚和赵之正同志在 γ 能谱仪调试和 γ 谱转移中给予的帮助表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Fatyga M, Kwiatkowski K, Viola V E, *Phys Rev Lett.*, **55** (1985) 1376.
- [2] Chan Y, Murphy M, Stokstad R G *et al.*, *Phys Rev.*, **C27** (1983) 447.
- [3] Kowalski L, Haustein P E, Cumming J B, *Phys Rev Lett.*, **51** (1983) 642.
- [4] Cho S Y, Chang Y H, Porile N T *et al.*, *Phys Rev.*, **C36** (1987) 2349.
- [5] Cho S Y, Porile N T, Morrissey D J, *Phys Rev.*, **C39** (1989) 2227.
- [6] Pienkowski L, Jastrzebski J, Kurcewicz W, *Phys Rev.*, **C43** (1991) 1331.
- [7] 吴定清、李文新、孙彤玉等, *核化学与放射化学*, **17** (1995) 73.
- [8] Hubert F, Fleury A, Bimbot R *et al.*, *Ann Phys (paris)*, 1980, 5, Suppl: 3—213.
- [9] 李文新、孙彤玉、戚大海等, *高能物理与核物理*, **14** (1990) 745.
- [10] Northcliffe L C, Schilling R F, *Nucl Data Tables*, **A7** (1970) 233.
- [11] 李文新、孙彤玉、孙儒林等, *高能物理与核物理* **14** (1990) 1110.
- [12] Tomasi E, Proc. Second Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions. Vol. I P. 60.
- [13] 李文新、孙彤玉、吴定清等, Proc. Second IN2P3-RIKEN Symposium on Heavy-ion Collisions, Obernai, France April, 1990, P. 263.
- [14] Stephans G S F, Kovar D G, Janssens R V F *et al.*, *Phys Lett.*, **B161** (1985) 60.
- [15] Ge Lingxiao, Zhang Fenshou, *Chinese Journal of Nuclear Physics*, **12** (1990) 207.
- [16] Jastrzebski J., *Phys Rev.*, **C34** (1986) 60.

Study of Recoil Properties of Target Residues From the Interaction of Copper With 20 — 46MeV/u ^{12}C Ions

Wu Dingqing Li Wenxin Sun Tongyu Sun Rulin Zhao Lili
Zhang Fengshou Yin Xinmin Jin Genming

(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Li Ze Jing Kexing Li Xinhua

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Received 6 December 1994

Abstract

By using off-line γ -ray spectroscopy in conjunction with thick target-thick catcher foil techniques, the mean forward recoil ranges have been measured for the residues produced from interaction of copper with 20 — 46MeV/u ^{12}C ions. From these data, linear momentum transfer for central collisions has been extracted. The linear momentum transfer per incident nucleon attains a maximum value of 155MeV/c at approximately 27.5MeV/u. The maximum excitation energy of the composite system is found to be 2.5MeV/u.

Key words $^{12}\text{C} + \text{Cu}$, $E_i = 20 - 46\text{MeV/u}$, thick target-thick catcher foil, highest nuclear temperature, linear momentum transfer in central collision.