

40MeV/u ^{40}Ar 与 Cu 相互作用的靶余核*

尹新民¹⁾ 李文新²⁾ 张翔¹⁾ 孙彤玉¹⁾

1) (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2) (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

安部静子 大久保嘉高 岩本正子 小林羲男

H. Maeda 安部文敏

(理化学研究所 日本国埼玉县和光市 351-01)

1994-10-19 收稿

畸 埝

摘 要

使用离线 γ 能谱法和厚靶——厚收集箔技术测量了40MeV/u ^{40}Ar 和 Cu 相互作用中靶余核的生成截面和前向平均反冲射程 FW 值. 根据电荷分布假设得到了靶余核的质量产额分布. 从 FW 值导出了重离子碰撞中的线性动量转移. 与 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 和 $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$ 的类似结果比较指出, 在相同的弹核速度下, 相应于中心碰撞的相对线性动量转移随弹核质量增加而减小, 但是在 ^{40}Ar 离子和 Cu 的中心碰撞中产生的复合系统的激发能比 ^{12}C 和 ^{20}Ne 离子碰撞情况下更高, 达到每核子 5.3MeV.

关键词 $^{40}\text{Ar} + \text{Cu}$, FW (前向平均反冲射程), 质量产额分布, 线性动量转移.

1 引 言

近年来热核的形成、性质和衰变研究已成为中能重离子碰撞中最富有活力的热点之一. 放射化学方法是研究热核的一个重要工具, 该方法主要测量中能重离子碰撞中靶余核的生成截面和反冲射程. 由余核的生成截面得到描述重离子核反应特征之一的质量产额分布, 通过和理论模型计算结果的比较, 可以了解重离子碰撞中形成的热核的衰变过程. 由反冲射程可以得到重离子碰撞的初始阶段从炮弹转移给复合体系的线性动量. 研究线性动量转移及其与入射弹核速度以及弹、靶质量依赖关系, 不仅能得到重离子反应在过渡能区演化的特征, 而且还能得到有关热核的形成、最高激发能及其与入射道的依赖关系等重要资料.

迄今, 大量的放射化学工作致力于研究较轻的中能重离子 ^{12}C 、 ^{14}N 、 ^{20}Ne 和 Cu 的相互作用^[1-9]. 本工作使用放射化学方法研究了较重的中能重离子 ^{40}Ar 和 Cu 相互作用中靶余核的质量产额分布、线性动量转移 (LMT), 拓广了以往的研究. 重点考察了相

* 国家自然科学基金部分资助.

应于中心碰撞的最大线性动量转移和组成核的激发能与入射炮弹质量之间可能存在的依赖关系.

2 实 验

靶子为 $18.0\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚的天然铜箔, 铜箔前后分别覆盖两片厚度为 $14.0\text{mg}/\text{cm}^2$ 的铝收集箔. 实验是在日本理化学研究所 (RIKEN) 的 Ring Cyclotron 上, 分长照射和短照射两次进行. 长照射时间为 60.2min , 积分束流为 $40.2\mu\text{C}$; 短照射时间为 5.2min , 积分束流为 $7.8\mu\text{C}$.

照射结束后, 靶子通过落球系统快速传送到测量室. 每次照射过的铜靶及前向和后向反冲收集箔分别用效率刻度过的高纯锗探测器进行 γ 活性的跟踪测量. 获取的 γ 谱在日本理化学所的 FACOM 1800 计算机上用 BOB 程序分析^[10], 随后的数据处理和分析均在近代物理研究所的 VAX-8350 上进行. 放射性核素的鉴别和截面计算的详细过程见文献 [11]. 计算中所采用的核数据来自文献 [12].

3 结 果

3.1 生成截面

除了可能是 ^{40}Ar 离子与铝收集箔相互作用的产物如 ^{22}Na 、 ^{24}Na 、 ^{28}Mg 等外, 本工作中共鉴别了 43 个放射性靶余核. 计算生成截面时假设 ^{40}Ar 离子的全部电子被剥离, 得到的生成截面和标准偏差列在表 1 中.

3.2 电荷分布

为了从余核的生成截面计算质量产额分布, 假定同量异位素的独立产额 $\sigma(A, Z)$ 可以用宽度参数为 σ_z 的高斯函数描述:

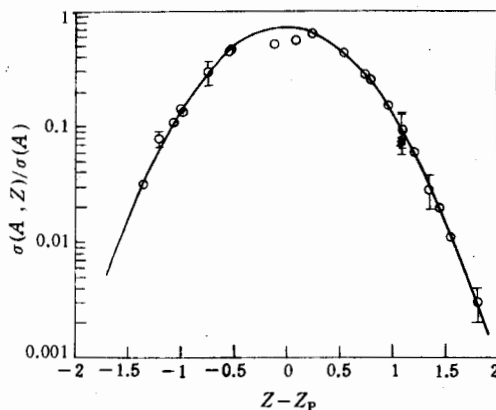


图 1 $40\text{MeV}/\text{u}$ $^{40}\text{Ar} + \text{Cu}$ 反应中的电荷分布

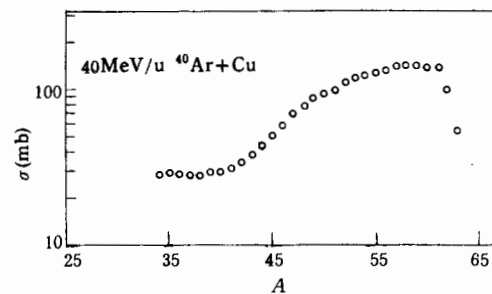


图 2 $40\text{MeV}/\text{u}$ $^{40}\text{Ar} + \text{Cu}$ 反应中的质量产额分布

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

这里 $\sigma(A)$ 为质量产额, Z_p 为核质量链最可几电荷, 并假定为质量数 A 的线性函数. 将实验鉴定的核素按质量数分为 5 个质量区间, 每个区间的 σ_z 值均为常数 0.54. 根据文献 [6] 描述的方法使用迭代计算程序计算得到这些核素的相对独立产额和与之相符合的高斯电荷分布曲线给出在图 1 中. 从电荷分布积分得到的质量产额分布给出在图 2 中.

3.3 前向平均反冲射程 FW

根据 A1 收集箔和靶子中余核的活性, 计算了余核的前向平均反冲射程 FW 值, 其中 F 为余核在前向收集箔中活性占该核素总活性的份数, W 为靶厚. 在后向收集箔中未探测到感兴趣核素的活性. FW 值及其误差也列在表 1 中.

表 1 40MeV/u ^{40}Ar 与 Cu 反应中余核的截面和 FW 值

核素	截面 (mb)	FW (mg/cm ²)	核素	截面 (mb)	FW (mg/cm ²)
$^{34}\text{Cl}^m$	2.69±0.90	5.37±1.94	$^{53}\text{Fe}^g$	3.25±0.95	
^{38}S	0.17±0.04		^{54}Mn	64.0±4.9	2.00±0.56
^{38}Cl	8.83±2.08	4.84±2.18	^{55}Co	2.53±0.25	
^{38}K	1.77±1.18		^{56}Mn	8.90±0.48	1.38±0.25
^{39}Cl	2.29±0.31	4.81±1.35	^{56}Co	20.6±1.3	1.48±0.73
^{40}Ar	3.44±0.19	4.77±0.30	^{56}Ni	0.48±0.29	
^{42}K	16.0±1.6	4.69±1.18	^{57}Co	64.3±3.2	1.26±0.33
^{43}K	5.21±0.30	4.22±0.51	^{57}Ni	1.58±0.17	
^{43}Sc	12.2±1.3	3.89±0.70	$^{58}\text{Co}^m$	51.7±4.0	
^{44}K	1.28±0.42		$^{58}\text{Co}^g$	26.6±3.1	
$^{44}\text{Sc}^m$	33.7±1.4	3.96±0.26	^{58}Co	80.7±4.0	0.94±0.08
$^{44}\text{Sc}^g$	10.1±1.0	3.25±0.48	^{59}Fe	4.62±0.33	
^{46}Sc	26.5±1.6	3.06±0.45	^{60}Co	24.2±2.5	
^{47}Sc	10.3±0.5	2.96±0.49	^{60}Cu	8.30±0.69	
^{48}Sc	2.08±0.16	3.30±1.10	^{61}Cu	40.0±2.0	0.66±0.39
^{48}V	35.6±1.8	3.02±0.19	^{62}Zn	3.79±0.18	
^{48}Cr	0.89±0.06	3.24±0.53	$^{62}\text{Co}^m$	1.41±0.12	
^{49}Cr	8.28±3.30	2.57±1.84	^{63}Zn	10.8±0.7	
^{51}Cr	73.3±3.6	2.45±0.41	^{64}Cu	81.8±24.4	
$^{52}\text{Mn}^m$	3.26±0.72	1.60±1.10	^{65}Ni	1.17±0.50	
$^{52}\text{Mn}^g$	25.9±0.43	2.40±0.12	^{65}Zn	14.0±3..6	
^{52}Fe	0.31±0.06				

4 讨 论

4.1 线性动量转移

从实验测定的 FW 值提取线性动量转移的方法已在我们的前一个工作中描述了 [8]. 这个方法的近似性和适用程度已在文献 [5, 7] 中做了详细讨论, 这里仅作扼要叙述.

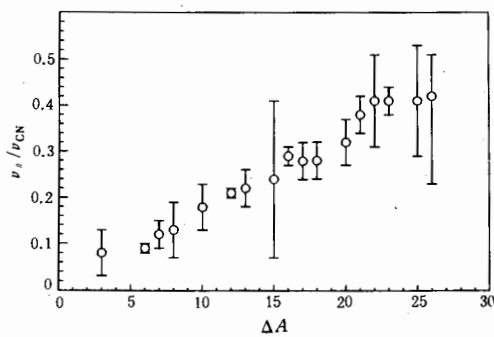


图 3 余核的相对速度转移 $v_{//}/v_{CN}$ 与余核质量损失 ΔA 的依赖关系

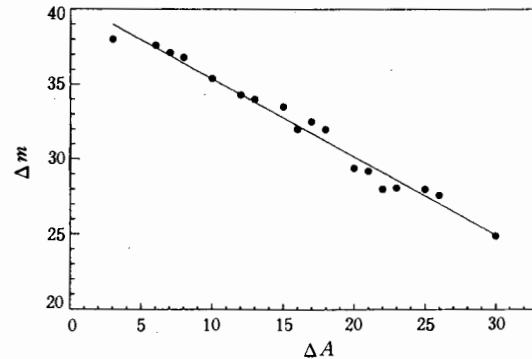


图 4 作为余核质量损失 ΔA 函数的逃逸质量 Δm

在中能重离子和铜相互作用中, 平均前向射程 FW 值对应的速度就是余核在束流方向反冲速度 $v_{//}$ 足够好的近似^[2,5,7]. 因此, 通过射程 - 能量转换就能从 FW 值得到余核的 $v_{//}$ 值. 以往的工作中^[4,9] 我们采用的是 Northcliffe 和 Schilling 的能量 - 射程表. 这里我们用由 Ziegler, Biezack 和 Littmark (ZBL) 发展起来的更精确近似的 TRIM 程序进行能量 - 射程转换. 图 3 给出了计算结果, 这里 $v_{//}/v_{CN}$ 为相对转移速度, $v_{CN} = 3.44 (\text{MeV}/\text{u})^{1/2}$ 为假设复合核的反冲速度; 余核的质量损失 ΔA 定义为靶质量 A_T 与余核质量 A_R 之差.

在中能重离子碰撞中, 类似于图 3 的 $v_{//}/v_{CN} \sim \Delta A$ 的关系已多次观察到^[4,5,7,9]. 产生于周边碰撞的近靶余核有最低的反冲速度, 反冲速度随 ΔA 而增加, 最后, 对于质量数远离靶质量的轻余核, $v_{//}/v_{CN}$ 达到最大, 并形成一坪, 坪上余核起源于具有相同反冲速度的类复合核, 它们的形成不再与碰撞参数有关, 显然与中心碰撞有最紧密的联系. 因此, 图 3 的 $v_{//}/v_{CN} \sim \Delta A$ 关系犹如裂变碎片角关联测量获得的折选角分布一样, 可用作一个“过滤器”, 区分并提取相应于中心碰撞中余核得到的最大反冲速度 $v_{//}^{\max}$ 和经质量产额权重的平均反冲速度 $\langle v_{//} \rangle$ ^[5,7,9]. 需要指出, 正如所预言的那样, $v_{//}/v_{CN} \sim \Delta A$ 关系图中, 坪的长度取决于碰撞体系的不对称性^[13]. 本工作在 $^{40}\text{Ar} + \text{Cu}$ 反应中获得的坪与 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 和 $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$ 相比为最短, 但并不妨碍提取 $v_{//}^{\max}$ 值.

根据简单的非完全熔合模型, 并进一步假定初始碰撞中产生的复合系统的动量正比于炮弹中和靶核熔合的那部分质量. 这样, 炮弹中未和靶核熔合并以束流速度逃逸的那部分质量 Δm 可从下式计算:

$$\Delta m = \frac{A_p v_p - v_{//} (A_T + A_p)}{V_p - v_{//}}, \quad (2)$$

这里, A_T 和 v_p 分别为炮弹的质量和速度. 计算得到相应于生成不同反冲速度余核时, 从炮弹中逃逸质量 Δm 值作为余核质量损失 ΔA 的函数指出在图 4 中. 从图 4 可以看到处于坪区的轻余核生成时, Δm 值高达 28, 表明在 ^{40}Ar 离子和铜的中心碰撞中, 有 12 个炮弹核子和靶核熔合. 而对于周边碰撞, ^{40}Ar 离子中只有 2 ~ 3 个核子和靶核熔合.

根据余核的反冲速度以及 Δm 值, 我们可以得到 40MeV/u ^{40}Ar 和 Cu 相互作用中

从炮弹转移给复合系统的线性动量. 计算中得到的中心碰撞的线性动量转移 $p_{//}^{\max}$ 和相对线性动量转移 $p_{//}^{\max}/p_{\text{beam}}$ 列在表 2 中, 其中 p_{beam} 为 ⁴⁰Ar 入射离子的动量. 为了比较起见, 表 2 中还列出了 40MeV/u ¹²C、²⁰Ne 离子和 Cu 相互作用中的这些物理量, 这些数据是根据有关文献数据内差得到的^[5,7-9].

线性动量转移的系统性主要建立在裂变碎片角关联测量的实验基础上. 按照这个系统性, 相对线性动量转移取决于炮弹和靶子的相对速度, 而与炮弹和靶子的种类无关, 并且可以用如下的经验公式计算^[14]:

$$p_{//}/p_{\text{beam}} = -0.092\sqrt{E/A} + 1.273. \quad (3)$$

表 2 40MeV/u 重离子和 Cu 相互作用的实验结果比较

反 应	平均质 量损失 $\langle \Delta A \rangle$	质量产额 曲线斜率 (\div)	$v_{//}^{\max}$ (MeV) ^{1/2}	$p_{//}^{\max}$ (GeV/c)	$p_{//}^{\max}/p_{\text{beam}}$	E_{cen}^* (MeV)	E_{cen}^*/A (MeV/u)	$\langle E^* \rangle$ (MeV)	$\langle E^* \rangle/A$ (MeV/u)	文献
¹² C+Cu	9.4	17			0.58	230		110		[7]
¹² C+Cu	9.9	15	0.58	1.6	0.49	173	2.5	103	1.5	[4]
²⁰ Ne+Cu	13.5	7.8	0.90	1.9	0.35		2.3	70 ~ 200		[5]
⁴⁰ Ar+Cu	13.5	4.2	1.43	3.3	0.30	300	3.7	190	2.8	本工作

我们曾在 ¹²C+Cu 反应研究中指出线性动量转移与靶质量有关^[9]. 从本工作得到的表 2 可以看到, 在相同的人射弹核速度下, 相对线性动量转移显示了与人射弹核质量的强烈依赖关系, 随着炮弹从 ¹²C 变到 ⁴⁰Ar, 转移的相对线性动量从 0.49 减小到 0.30. 因此, ⁴⁰Ar 离子和 Cu 碰撞中的动量转移明显偏离公式 (3) 的系统性. 本工作得到的这种依赖关系进一步证实了 Stephans 等人在 ¹²C、¹⁶O 和 ²⁰Ne 引起的反应中用飞行时间技术观察到的实验结果^[15], 在他们的研究中, 线性动量转移的靶质量依赖关系可用核内核子的费米运动定性解释.

从炮弹转移到复合系统的线性动量百分数虽然随炮弹质量数的增加而减小, 但是由于炮弹总动量的增加, 正如从表 2 中看到的, 转移到复合系统的线性动量还是随着炮弹质量数增加而增加. 和 ¹²C+Cu、²⁰Ne+Cu 相比, 其结果必然导致热核激发能的增加. 本工作中测定的轻余核的 FW 值明显增大也支持了这个结论.

4.2 热核的激发能

根据实验测定的余核运动学性质和质量产额分布可以估计重离子碰撞的第一阶段形成的平衡的热复合系统的激发能. 与我们前一个工作一样^[9], 由非完全熔合模型假设得到热核的激发能:

$$E^* = 0.5v_{//}v_p A_T + Q. \quad (4)$$

当认为炮弹中未与靶核熔合的质量以非激发的集团逃逸时, 反应 Q 值大致接近零. 用中心碰撞的余核速度 $v_{//}^{\max}$ 代入 (4) 式, 得到中心碰撞的热核的激发能 $E_{\text{cen}}^* = 406\text{MeV}$, 相当于每核子平均激发能为 5.0MeV, 对应的核温度高达 7.1MeV. 用 $\langle v_{//} \rangle$ 值代替公式 (4) 中的 $v_{//}$, 就得到复合系统的平均激发能 $\langle E^* \rangle$ 为 190MeV, 所对应的核温度为 4.7MeV.

现有的中能 ¹²C 和 ²⁰Ne 与 Cu 相互作用的研究中得到的有关激发能的资料不多, 而且数据分散缺乏系统性. 这和实验误差、数据处理分析以及所采用的一系列假设都有关

系. Pienkowski 等人指出在实验误差范围内, ^{12}C 、 ^{14}N 和 ^{20}Ne 与 Cu 相互作用中, 中心碰撞激发能和平均激发能均无大的差别, 并给出一个相当宽松的上限: 平均激发能不超过 3MeV/u ^[5]. 本工作把入射离子拓广到更重的 ^{40}Ar 离子, 比较表 2 的数据, 特别是和我们以前的 $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 数据比较^[9], 仍可以看到在相同的单核子入射能量下, 无论是中心碰撞形成的复合体系激发能还是平均激发能都随入射弹核质量增加而增加. 因此, 为了研究热核的形成和衰变, 探索原子核在极端条件下的稳定性, 看来使用较重的中能重离子碰撞是更为可取的.

感谢矢野安重、俊藤彰、加濑昌之博士, 感谢 RIKEN 加速器研究装置的全体运行人员对本工作的支持并有效地提供了 ^{40}Ar 离子束, 以及王引书提供的 TRIM 程序.

参 考 文 献

- [1] T. Lund et al., *Z Phys.*, **A306** (1982) 43.
- [2] S. Y. Cho, Y. H. Chang, N. T. Porile et al., *Phys. Rev.*, **C36** (1987) 2347.
- [3] S. Y. Cho, N. T. Porile, D. J. Morrissey, *Phys. Rev.*, **C39** (1989) 2227.
- [4] 李文新、孙彤玉、戚大海等, 高能物理与核物理, **14** (1990) 745.
- [5] L. Pienkowski, J. Jastrzebski, W. Kurcewicz et al., *Phys. Rev.*, **C43** (1991) 1331.
- [6] 孙彤玉、李文新等, 核化学与放射化学, **15** (1993) 65.
- [7] J. P. Whitfield, N. T. Porile, *Phys. Rev.*, **C47** (1993) 1636.
- [8] 孙彤玉、李文新、吴定清等, 核化学与放射化学, **16** (1994) 109.
- [9] 吴定清、李文新、孙彤玉等, 核化学与放射化学, **17** (1995) 73.
- [10] H. Baba, T. Sekine, S. Baba et al., Japan Atomic Energy Research Institute Report JAERI, (1972) 1227.
- [11] 李文新、孙彤玉, 原子能科学技术, **24** (1990) 60.
- [12] U. Reus, W. Westemeies, *At Data Nucl. Data Tables*, **29** (1983) 2.
- [13] Li Wenxin Proc. Second IN2P3-RIKEN Symposium on Heavy Ion Collision, Obergnai, France, April, 1990, p. 263.
- [14] E. Tomasi et al., Proc. Second Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collision, V. I, p. 60.
- [15] G. S. F. Stephans et al., *Phys. Lett.*, **161B** (1985) 60.

Target Residues from the Interaction of Copper with 40MeV/u ^{40}Ar Ions

Yin Xinmin¹⁾ Li Wenxin²⁾ Zhang Xiang¹⁾ Sun Tongyu¹⁾

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

2) (Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Shizuko Ambe Yoshitaka Ohkubo Masako Iwamoto

Yoshio Kobayashi H. Maeda Fumitoshi Ambe

(The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama 351-01)

Received 19 October 1994

Abstract

Cross Sections and average forward recoil range FW were measured for target residues from the interaction of Cu with 40MeV/u ^{40}Ar ions using off-line γ -ray spectroscopy. The mass yield distribution was obtained with assumption of charge distribution. The linear momentum transfer was calculated from FW values. A comparison with similar results of $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ and $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$ reactions indicates that the fractional linear momentum transfer, corresponding to central collisions, decreases with increasing projectile mass at the same energy per nucleon. However, the excitation energy of the composite system created from the collisions of Cu with ^{40}Ar ions reached the value of 5.3MeV/u and was higher than those from the collisions with ^{12}C and ^{20}Ne ions.

Key words $^{40}\text{Ar} + \text{Cu}$, FW (average forward recoil range), mass yield distribution, linear momentum transfer.