

$^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$, $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 和 $^{14}\text{N} + \text{Pb}$ 反应全熔合截面测量

孙其昌 何易 沈菊生 陈厚 陈克良
(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

本文叙述了用云母径迹探测器分别探测复合核蒸发余核和裂变碎片的实验,从而测出了 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$, $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 和 $^{14}\text{N} + \text{Pb}$ 反应的全熔合截面和激发函数. 并用锐截止模型由全熔合截面导出了临界角动量. 实验结果和当前有关的理论计算进行了比较,在实验误差范围内基本相符.

一、前 言

在重离子核反应的理论和实验研究工作中,复合核的形成条件是个很重要的课题. 复合核形成截面的测量揭示了重离子和靶核全熔合的制约条件. 特别是在宽能量范围内全熔合激发函数的测量是很重要的,一般说来,其低能部分可直接确定全熔合反应的位垒参数,而高能部分则揭示出全熔合过程的限制条件.

采用云母径迹探测器测量全熔合截面见 L. Kowalski 和 J. Natowitz 等人的工作^[1-3], 他们用云母探测器测量了重离子引起的全熔合反应的复合核蒸发余核. 云母径迹探测器之所以能用来记录反冲的蒸发余核,是因为它记录重离子时,有个一定的电离损耗率的较高的阈值,这就形成某一质量阈,当离子质量低于此值时,就不能被记录下来. 这样当入射离子不很重(Ne 以下)时,就完全排除了散射离子的干扰.

当全熔合反应中形成的复合核不很重,轨道角动量不很高时,在复合核退激过程中,裂变竞争是可以忽略的. 这样生成蒸发余核的截面就等于全熔合截面. 当复合核退激过程中有裂变竞争时,全熔合截面中还必须包括复合核裂变截面. 我们用云母径迹探测器测量了 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$, $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 和 $^{14}\text{N} + \text{Pb}$ 反应的全熔合截面,对 Al 靶测量了蒸发余核截面,对 Bi 和 Pb 靶除蒸发余核外还测量了裂变截面.

二、实验方法

实验是在 1.5 米迴旋加速器上进行的,加速器引出的 ^{12}C 离子能量为 73.0 MeV, ^{14}N 离

子能量为 96.6 MeV. 用已知厚度的铝箔降能来改变离子能量. 实验包括测量三个反应的蒸发余核在 0° — 30° 角范围内的角分布和 Bi 与 Pb 靶裂变反应的 90° 角微分截面及某些能量的裂变碎片角分布. 实验布局见图 1. 记录蒸发余核的云母片平面与束流方向夹 45° 角, 与束流轴线的交点距靶中心 5 cm. 记录裂变碎片的云母片在 80° — 170° 角内照射, 距靶子 10 cm. 束流准直器光栏直径是 3 mm, 距靶子 6 cm.

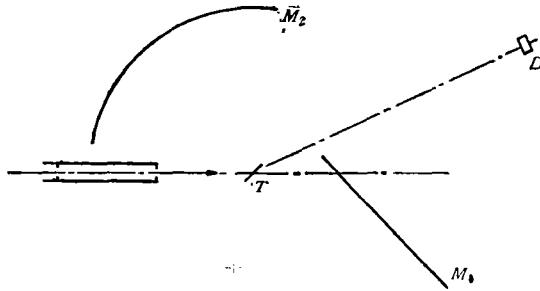


图 1 实验布局示意图

T—靶子 M₁—测蒸发余核的云母片 M₂—测碎片的云母片 D—半导体探测器

径迹探测器材料是质量好的天然白云母, 选择表面损伤少的大片云母作探测器, 厚度约为 0.02 mm. 测量表明, 本底径迹密度小于 10 条/cm², 照射前未做予腐蚀处理. 靶子材料是铝、铋和铅的天然元素, 真空蒸发制成无衬底靶, 厚度为 100—200 μg/cm². 对 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 和 $^{14}\text{N} + \text{Pb}$ 反应用库仑散射截面来归一截面, 对 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 反应是用仔细测量靶厚和积分束流来计算截面的.

记录蒸发余核的云母片的腐蚀条件是: 40% HF, 20°C, 30 分钟. 处理后蒸发余核和裂变碎片事件都显现为反差很强的线状径迹, 长度决定于离子射程, 宽度小于 0.5μ . 同时, H. Blok 等人的工作^[4]指出, 在这种处理条件下, 径迹密度随腐蚀时间的变化已经到达坪区, 即充分显影了记录的反冲余核. 使用光学显微镜观测云母片, 放大倍数为 40×12.5 . $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 反应的余核径迹较长, 易于观测. 对于 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 和 $^{14}\text{N} + \text{Pb}$ 反应, 径迹短, 观测是困难的, 因此需要特别仔细. 长度小于 1μ 的径迹观测中容易丢失, 因此对短径迹我们进行了反复的寻找和鉴别, 使扫描阈达到 0.5μ .

记录裂变碎片的云母片腐蚀条件是: 40% HF, 50°C, 50 分钟. 显影的碎片径迹呈现为规则的菱形, 使用光学显微镜观测, 放大倍数为 40×12.5 .

三、实验结果和讨论

1. 裂变激发函数

实验中测量了 90° 角裂变微分截面, 根据裂变角分布实验数据^[5,6]计算了裂变总截面 σ_f . 对于 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 和 $^{14}\text{N} + \text{Pb}$ 反应实验的能量范围分别为 57.6—73.0 MeV 和 67.7—96.6 MeV. 裂变截面误差为 6—10%. 实验结果见图 2. 图中还给出了用抛物线近似计算的反应总截面 σ_R , 核势取为^[7]:

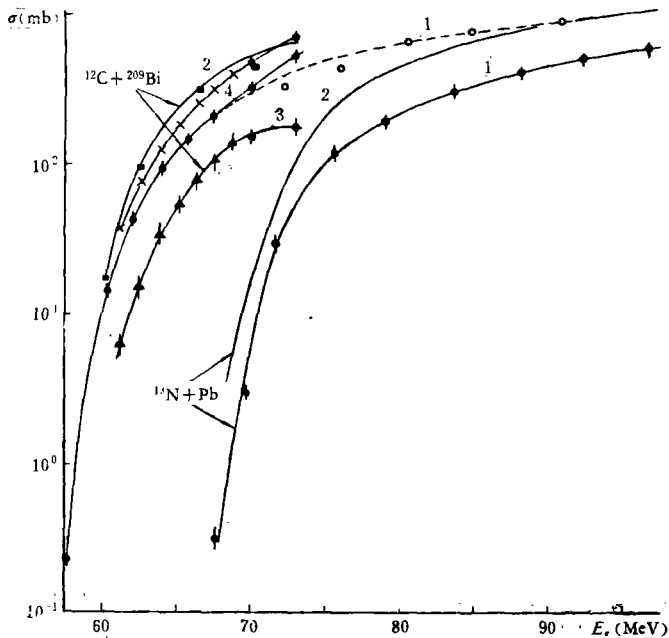


图 2 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 和 $^{14}\text{N} + \text{Pb}$ 反应截面

- 1. σ_f ● 本实验结果 ○ H. Britt^[9] ■ С. Поликонов^[8]
- 2. σ_R 抛物线模型计算反应总截面
- 3. σ_{ER} ● 本实验结果 σ_{ev} ▲ 郭俊盛^[10]
- 4. σ_{CF} ● 本实验结果 $\sigma_f + \sigma_{ER}$ × $\sigma_f + \sigma_{ev}$

$$V_N = -V_0 \exp \left[-\frac{r - r_0 \left(A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}} \right)}{d} \right],$$

$$V_0 = 70\text{MeV}, \quad r_0 = 1.24\text{fm}, \quad d = 0.48\text{fm}.$$

对于 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 反应, 图中还给出了 С. Поликонов 等人^[8]和 H. Britt 等人^[9]的实验结果. С. Поликонов 的实验能区为 60—70MeV, 其截面值偏高, 比本结果要大 30—50%, 约等于计算的反应总截面. H. Britt 的实验能区在 72MeV 以上, 和我们的实验结果大体上能相衔接 (见图 2 中虚线). $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 的裂变激发函数和计算的反应总截面随能量变化的行为是一致的, 裂变截面约为反应总截面的 65%. 在 $^{14}\text{N} + \text{Pb}$ 反应中, 裂变激发函数和反应总截面随能量的变化也是一致的, 裂变截面约为反应总截面的 55%, 低于在 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 反应中的比例.

2. 熔合蒸发截面

实验中得到的蒸发余核角分布见图 3. 在所观测的角度范围内, 截面随角度增加呈指数下降. 这表明没有转移反应和弹性散射反冲重核的明显贡献. 因为转移反应反冲重核的角分布应在擦边角附近有峰出现, 这个角度大于本实验观测的角度. 弹性散射反冲靶核也仅在擦边角附近开始有明显增加, 在小角方向迅速下降, 随角度增加而增加. 我们在 70MeV 的 ^{12}C 离子轰击 Bi 靶的余核角分布中观测到, 当角度大于 20° 时, 实验点逐渐变平, 以后又有上升. 这说明弹性散射反冲靶核带来了严重影响, 处理中我们把 20° 角以

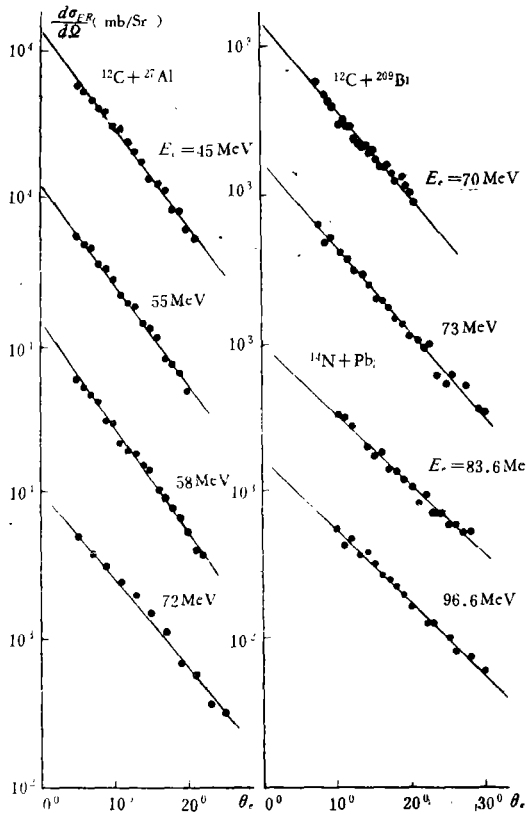


图3 蒸发余核的角分布

后数据丢掉了。在对角分布积分中，我们假设在实验点范围之外角分布仍遵守负指数规律。这样做，在 0° 角附近可能做了过高估计，但因为有效立体角小，对截面值影响不大。蒸发余核截面 σ_{ER} 的实验结果见表 1。

表 1 蒸发余核截面和全熔合截面

反 应	$E_i(\text{MeV})$	$\sigma_{ER}(\text{mb})$	$\sigma_f(\text{mb})$	$\sigma_{CF}(\text{mb})$	$\sigma_R(\text{mb})$	σ_{CF}/σ_R	$l_{cr}(\hbar)$	$l_{CF}(\hbar)$
$^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$	45	1008 ± 151		1008 ± 151	1335	0.75	20	21
	55	979 ± 147		979 ± 147	1454	0.67	22	23
	58	1130 ± 170		1130 ± 170	1480	0.76	24	24
	66	903 ± 135		903 ± 135	1533	0.59	23	26
	72	1046 ± 156		1046 ± 156	1563	0.67	26	27
$^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$	70	153 ± 17	336 ± 21	489 ± 27	521		23	
	73	178 ± 20	555 ± 35	733 ± 41	672		28	25
$^{14}\text{N} + \text{Pb}$	83.6	150 ± 15	313 ± 21	463 ± 26	640	0.724	27	
	92.2	181 ± 18	540 ± 35	721 ± 40	978	0.737	35	
	96.6	248 ± 25	634 ± 42	882 ± 50	1130	0.781	40	

郭俊盛等用反冲气体靶室技术测量了能量在 69MeV 以下的 ^{209}Bi (^{12}C , xn) 反应激发函数^[10], 把各道截面求和, 并加上估计的 α -粒子蒸发截面和 (^{12}C , 2n) 反应截面, 得到了总的蒸发截面 σ_{ev} . 这样得到的 σ_{ev} 和本实验的 σ_{ER} 的比较见图 2. 我们看到, 两种不同的实验技术得到的结果基本上可以衔接起来. 云母记录阈的研究工作指出(见 J. Natowitz 等的工作^[2]), 对于质量阈以上的离子, 当入射能量大于 0.04—0.05MeV/amu 时, 才可靠的有 100% 的记录效率. 在本实验中, Bi 和 Pb 靶两个反应的蒸发余核平均反冲动能仅为 0.02—0.03 MeV/amu, 低于 0.04MeV/amu. 如果的确发生反冲余核不能被完全记录的情况, 再加上扫描阈的影响, 将会使测量截面过低. 从前面的比较我们看到, 似乎没有发生这种情况, 在这样低的反冲能量下, 用云母探测器记录反冲余核还是可能的, 探测效率问题并不严重.

3. 全熔合截面

全熔合截面 σ_{CF} 实验结果见表 1, 对 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 反应, $\sigma_{CF} = \sigma_{ER}$, 对 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 和 $^{14}\text{N} + \text{Pb}$ 反应, $\sigma_{CF} = \sigma_{ER} + \sigma_j$. 在锐截止近似中, 全熔合截面与临界角动量 l_{cr} 的关系为:

$$\sigma_{CF} = \pi\lambda^2(l_{cr} + 1)^2.$$

从实验的全熔合截面导出的临界角动量见表 1. 在理论上为了计算限制全熔合过程的临界角动量提出了各种模型. 吴国华等采用宏观机制计算了全熔合反应的临界角动量^[11]. 在求解的经典动力学方程中, 考虑了相对运动的两个自由度, 在耗散函数中引入了与入射道质量有关的摩擦形式因子. 计算结果见表 1 中的 l_{CF} . 我们看到理论计算与实验结果大体上是符合的.

D. Glas 和 U. Mosel 给出一个全熔合截面的表达式^[12], 其低能和高能部分可以分别简化为:

$$\sigma_{CF} = \pi R_B^2 \left(1 - \frac{V_B}{E}\right) \quad \text{低能部分,}$$

$$\sigma_{CF} = \pi R_{cr}^2 \left(1 - \frac{V_{cr}}{E}\right) \quad \text{高能部分,}$$

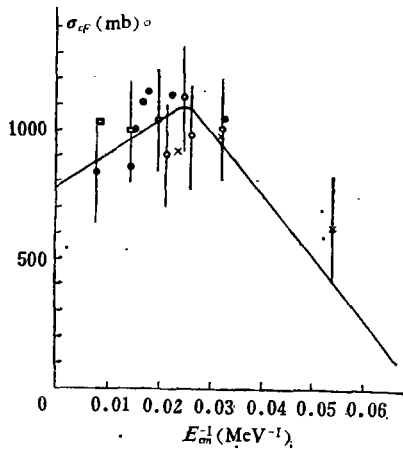
其中 R_B 和 V_B 分别为熔合半径和熔合位垒, R_{cr} 和 V_{cr} 分别为临界半径和临界势. 这样, 应用 σ_{CF} 和 $1/E$ 的直线关系, 可以从实验的全熔合截面的低能部分导出 R_B 和 V_B , 从高能部分导出 R_{cr} 和 V_{cr} . 对于不很重的体系, 在低能区域, 全熔合截面接近反应总截面, 熔合位垒和相互作用位垒参数没有什么差别, 这些参数为:

$$R_B = r_B(A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}}), \quad r_B = 1.4\text{fm},$$

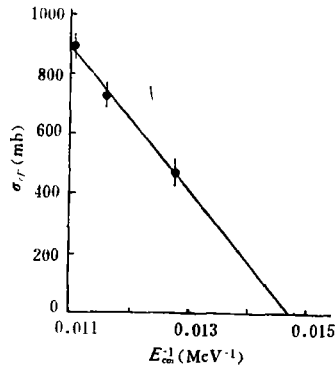
$$V_B = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_c}, \quad R_c = r_c(A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}}), \quad r_c = 1.5\text{fm}.$$

关于全熔合反应的临界半径, J. Galin 等^[13]从早期的全熔合截面实验数据分析得到临界半径参数为 $r_{cr} = 1.0 \pm 0.07\text{fm}$, 徐树威等^[14]从全熔合截面和准裂变截面的数据分析得到的结果为 $r_{cr} = 0.94 \pm 0.08\text{fm}$. 关于临界势, 有人认为近似等于复合核与入射粒子加靶核体系的结合能之差^[12].

$^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 反应的 $\sigma_{CF} \sim 1/E$ 关系见图 4. 图中除本实验外还给出了 L. Natowitz 等^[3], E. T. Chulick 等^[15]和 Nguyen Van Sen 等^[16]的实验结果. 几组实验结果在误差范围内是符合的. 但由于误差大, 实验点离散大, 尽管在高能部分有较多的数据, 还是不能从实验

图4 C + ²⁷Al 反应全熔合截面

○ 本实验 ● Natowitz^[3] □ E. T. Chalick^[13]
 × Nguyen Van Sen^[16]

图5 ¹⁴N + Pb 反应全熔合截面

数据准确地确定出临界参数 R_{cr} 和 V_{cr} 。低能部分的实验数据是不够的。为了与 Glas-Mosel 模型进行比较,我们取 $r_B = 1.4\text{fm}$, $r_c = 1.5\text{fm}$, $r_{cr} = 0.94\text{fm}$, $V_{cr} = -17\text{MeV}$ (复合核与入射粒子加靶核的结合能之差), 计算了 Glas-Mosel 模型曲线, 见图 4。它和实验结果在误差范围内的符合是较好的。

¹⁴N + Pb 反应的 $\sigma_{CF} \sim 1/E$ 关系见图 5。这里全熔合截面仅有低能三个实验点, 由此导出的位垒参数为: $r_B = 1.27\text{fm}$, $V_B = 68\text{MeV}$ 。

参 考 资 料

- [1] L. Kowalski et al., *Phys. Rev.*, **169**(1968), 894.
- [2] J. Natowitz et al., *Phys. Rev.*, **C1**(1970), 623.
- [3] J. Natowitz et al., *Phys. Rev.*, **C6**(1972), 2133.
- [4] H. Blok et al., *N. I. M.*, **100**(1972), 403.
- [5] V. E. Viola, *UCRL*—9619(1961).
- [6] 刘国兴等, 待发表。
- [7] T. D. Thomas, *Phys. Rev.*, **116**(1959), 703. V. E. Viola et al., *Phys. Rev.*, **128**(1962), 767.
- [8] С. Поликонов и др., *ЖЭТФ.*, **36** (1959), 745.
- [9] H. Britt et al., *Phys. Rev.*, **120**(1961), 1768.
- [10] 郭俊盛等, 本期, 143.
- [11] 吴国华等, 未发表。
- [12] D. Glas and U. Mosel, *Nucl. Phys.*, **A237**(1975), 429.
- [13] J. Galin et al., *Phys. Rev.*, **C9**(1974), 1018.
- [14] 徐树威等, 未发表。
- [15] E. T. Chulick et al., *Proc. IAEA Symp. Phys. Chem. Fission Third, Vol. II* p. 379, IAEA, Vienna.
- [16] Nguyen Van Sen et al., *European Conference on Nuclear Physics with Heavy Ions* (Caen, 6—10, Sept., 1976).

THE MEASUREMENT OF COMPLETE FUSION CROSS-SECTIONS FOR THE REACTIONS $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$, $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ AND $^{14}\text{N} + \text{Pb}$

SUN CHI-CHANG HE YI SHEN JIU-SHENG

CHEN HOU CHEN KE-LIANG

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Mica track detectors were used for the measurement of evaporation residues and fission fragments of compound nuclei formed in $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$, $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ and $^{14}\text{N} + \text{Pb}$ reactions. The complete fusion cross-sections and excitation functions were then obtained. By using the sharp cut-off model approximation, the values of the critical angular momenta were extracted from the complete fusion cross-sections. The results obtained were compared with the calculations based on current theories for critical angular momentum; they were found to agree within experimental uncertainties.