

## 46.7 MeV/u $^{12}\text{C}$ 轰击 $^{159}\text{Tb}$ 、 $^{197}\text{Au}$ 和 $^{209}\text{Bi}$ 的裂变测量及分析\*

罗清政 戴光曦 漆玉全 阎德宏 吴和宇 新根明

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘 要** 用 46.7 MeV/u  $^{12}\text{C}$  轰击  $^{159}\text{Tb}$ 、 $^{197}\text{Au}$ 、 $^{209}\text{Bi}$ , 测量关联裂片的速度和角度, 研究了线性动量转移(LMT)、质量和出平面角分布, 提取了核温度. 应用级联两体统计衰变理论进行了拟合与解释, 结果表明: 在  $\sim 50\text{MeV/u}$  入射能的中能重离子碰撞中, 以非完全熔合方式形成了核温度高达 4~5 MeV 的类复合核, 其后通过裂变、蒸发级联统计两体衰变而退激.

**关键词** 线性动量转移(LMT), 级联两体统计衰变, 非完全熔合, 核温度.

### 1 引言

低能重离子反应中全熔合截面随轰击能增加而减少, 出现了深部非弹, 进入中能区后, 全熔合截面进一步减少直至消失, 代之而起的是非完全熔合; 深部非弹也逐渐被耗散碎裂所代替; 能量进一步增加时, 对于中心碰撞是多重碎裂或者是统计两体衰变尚处于争论与研究之中. 中能重离子反应中, 由于靶核未能将炮弹全俘获, 弹核不能将全部线性动量转移给靶核, 从而产生的热核温度不能径直而上.

LMT 的研究为核温度测量和认识此能区核反应机制提供了新方法. LMT 的研究依靠两类实验技术: (1) 反冲余核的收集测量; (2) 裂变碎片角关联(折叠角分布)选择 LMT. 对前者要测出反冲余核的速度分布, 这种方法适宜于研究轻系统的线性动量转移.

对于重体系的全熔合(CF)与非完全熔合(ICF), 过去几年, 用裂片角关联技术进行了一些研究, 在 20~30 MeV/u 的  $^{58}\text{Ni}$  和 31~40 MeV/u 的  $^{40}\text{Ar}$  轰击  $^{232}\text{Th}$  实验中<sup>[1]</sup>, 发现弹核每核子转移给靶核的线动量上限为  $180 \pm 20\text{MeV/c} \cdot \text{u}$ ; 在  $^{14}\text{N} + ^{232}\text{Th}$ <sup>[2]</sup> 和  $^{86}\text{Kr} + ^{232}\text{Th}$ <sup>[3]</sup> 等实验中得到支持. 戴光曦小组用 5.5~21.7 MeV/u 的  $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$  反应, 系统地研究了非完全熔合与跟随裂变, 提取的单核子 LMT 为

$165\text{MeV/c} \cdot \text{u}$ <sup>[4]</sup>, 线性动量转移的极限大约为  $180\text{MeV/c} \cdot \text{u}$ .

迄今, 尚未对单核子能量  $\sim 50\text{MeV/u}$  的  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}$ 、 $^{197}\text{Au}$ 、 $^{209}\text{Bi}$  裂变反应做过系统研究. 反应机制如何? 衰变性质如何? 有待探索.

### 2 实验及数据处理

实验在 HIRFL 上完成. 46.7 MeV/u 的  $^{12}\text{C}$  束, 电荷态为 6+ 态, 流强为 3~10 nA. 选用的靶是  $^{159}\text{Tb}$ 、 $^{197}\text{Au}$ 、 $^{209}\text{Bi}$ , 靶厚分别为 311、445 和  $464\mu\text{g/cm}^2$ . 用四块平行板雪崩电离室(DGAC)对关联裂片作位置和飞行时间测量, 每块 DGAC 灵敏面积为  $250 \times 200\text{mm}^2$ , 距靶心约 54.5 cm, 在平面覆盖  $26^\circ$ , 出平面覆盖  $22^\circ$ , X、Y 位置分辨均 4 mm, 相应的角分辨好于  $0.5^\circ$ . 这四块 DGAC 分成两组, 每组两块做符合测量; 一组在束流方向左右对称放置, 另一组在束流方向上下对称放置, 各 DGAC 中心极角为  $67.5^\circ$  是为了使每组 DGAC 在裂片质心系成约  $180^\circ$ . 关联裂片的飞行时间测量中, 采用加速器高频信号作起始信号, 束流相位对应的时刻  $T_0$  用对比法确定.

实验数据的在线获取由 HIRFL 的 Macro-VAX II 上的 GOOSY 数据获取系统完成, 数据以事件方式记录在磁带上, 实验数据的离线分析在近代物理所的 VAX-11/8350 机上用

\* 国家自然科学基金资助课题.

WC 软件分析完成.

### 3 统计模型理论

根据级联两体统计衰变的思想,编写了程序 SAGEE 模拟对重离子核反应中的裂变和轻粒子蒸发进行了计算. 该程序应用 Monte - Carlo 技术跟踪所有可能的两体出射道直到子核激发能耗尽为止. 同时考虑了衰变产物的质量、速度及角分布.

#### 3.1 蒸发轻粒子宽度描述

蒸发轻粒子 (n, p, d, t, <sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He, <sup>5</sup>He) 的宽度用 Hauser - Feshbach 理论<sup>[5]</sup>, 对复合核 (A<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>, J<sub>0</sub>, E\*) 发射粒子 (A<sub>1</sub>, Z<sub>1</sub>, J<sub>1</sub>, ε) 形成余核 (A<sub>2</sub>, Z<sub>2</sub>, J<sub>2</sub>, U<sub>2</sub>) 的衰变宽度为

$$\Gamma_{J_2}(Z_1, A_1, Z_2, A_2) = \frac{2J_1 + 1}{2\pi\rho_0} \sum_{l=|J_0-J_2|}^{J_0+J_2} \int_0^{K^* - B - E_{rot}(J_2)} T_l(\epsilon) \rho_2(U_2, J_2) d\epsilon \quad (1)$$

其中, ρ<sub>0</sub> 为复合核能级密度, ρ<sub>2</sub> 为余核能级密度, ε 是粒子动能, l 是粒子出射的轨道角动量, B 是结合能, U<sub>2</sub> = E\* - B - E<sub>rot</sub>(J<sub>2</sub>) - ε 是余核激发能, E<sub>rot</sub>(J<sub>2</sub>) 是余核的转动加形变能. 穿透系数 T<sub>l</sub>(ε) 用锐截止近似, 库仑能 E<sub>c</sub> 见文献<sup>[6]</sup>的表述, 能级密度采用自旋相关费米气体能级密度表达式.

#### 3.2 裂变的竞争

裂变的竞争裂变-中子宽度比表达式<sup>[7]</sup>予以考虑

$$\frac{\Gamma_f(J_0)}{\Gamma_n} = 5(TA_0^{2/3})^{-1} \exp\{[B_n - B_f(J_0)]/T\} \quad (2)$$

$$T = (E^*/\alpha)^{1/2}$$

其中, B<sub>n</sub> 是母核中子结合能, B<sub>f</sub>(J<sub>0</sub>) 是母核裂变位垒, 用 RFRM 计算<sup>[8]</sup>, 裂片质量用高斯分布抽样从而避免了非对称裂变位势的计算.

#### 3.3 出射产物方向、速度、自旋及激发能

轻粒子发射的方向几率为<sup>[9]</sup>

$$P_\theta = 2\sin\theta / \sqrt{\sin^2\theta - \cos^2\theta_l} \quad (3)$$

其中, θ 是发射方向与束流方向的夹角. θ<sub>l</sub> 是发射粒子自旋与母核自旋的夹角. 在衰变过程中, 自旋的退极化方式的处理见文献<sup>[10]</sup>, φ

方向随机均匀抽样. 出射产物的动能由库仑能提供, 余核的自旋从分宽度 Γ<sub>J<sub>2</sub></sub> 的计算中用 Monte - Carlo 方式选取.

裂变碎片的方向及速度计算参考文献<sup>[6]</sup>的角关联及角分布的平衡理论.

#### 3.4 关于复合体系 Z<sub>0</sub>, A<sub>0</sub>, J<sub>0</sub> 和 E\* 的计算

由于中能区核反应非完全熔合的介入, 用线性动量转移 (LMT) 分布对入射道行为作修正成为必须, 这时需知道实验测得的 LMT 分布. 根据 LMT 分布抽样得到类复合核的 Z<sub>0</sub>, A<sub>0</sub> 和 E\*, 角动量仍假设满足锐截止近似, 最大角动量 J<sub>max</sub> 由熔合模型给出<sup>[11]</sup>. 总类熔合截面为

$$\sigma' = \sum_i \langle \text{lmt} \rangle_i \pi \lambda_i^2 \sum_{l=0}^{J_{\max}^{(i)}} l(l+1) \quad (4)$$

某一产物 K 的截面为

$$\sigma_k' = \frac{N_k}{N_{\text{total}}} \cdot \sigma' \quad (5)$$

其中, N<sub>total</sub> 是模拟的复合核总数目, N<sub>k</sub> 是得到的产物 K 的数目.

### 4 实验结果及其分析

#### 4.1 线性动量转移 (LMT) 分布

测出关联裂片速度及发射角, 由两体运动学可直接定出 LMT 与入射初始动量的比值 ⟨lmt⟩<sup>[4]</sup>. 图 1 给出了三种反应系统的线性动量转移分布情况, 实线是对实验统计结果的高斯拟合. C+Au 和 C+Bi 的平均最可几线性动量转移值 ⟨lmt⟩ = 0.65, C+Tb ⟨lmt⟩ 为 0.67. 这个结论同线性动量转移系统学结论一致<sup>[12]</sup>

$$\langle \text{lmt} \rangle = 1.273 - 0.092 \sqrt{E/A} \quad (6)$$

即 ⟨lmt⟩ 仅与入射炮弹能量有关, 而与靶核无关. 对 46.7 MeV/u <sup>12</sup>C 束其估计值约为 0.64, 实验结果 ⟨lmt⟩ 为 0.65 表明单核子线性动量转移值为 195 MeV/c · u, 与 LMT 的系统性规律即单核子线性动量转移上限为 180 ± 20 MeV/c · u 相一致<sup>[1]</sup>. 同时从该分布也可看到靶核越轻, LMT 分布变得越宽, 这可能是反冲方向上的弥散造成的.

#### 4.2 质量分布

实验得到的三种反应系统的裂变碎片产

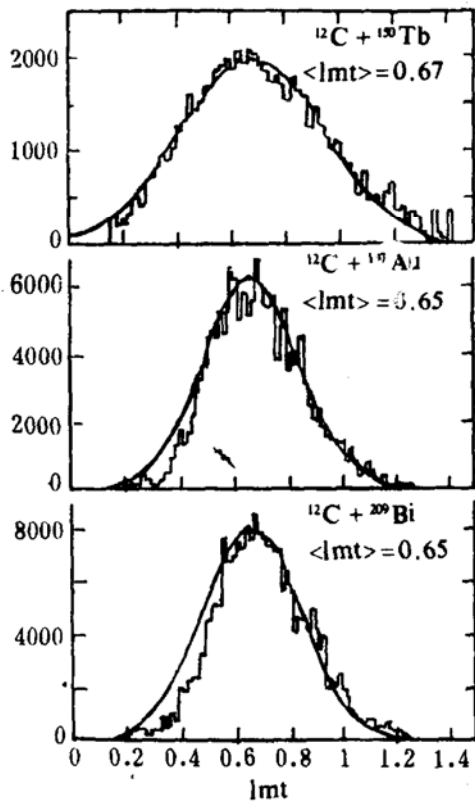


图 1 实验所测线性动量转移分布(直方图)实线为 GAUSSIAN 拟合

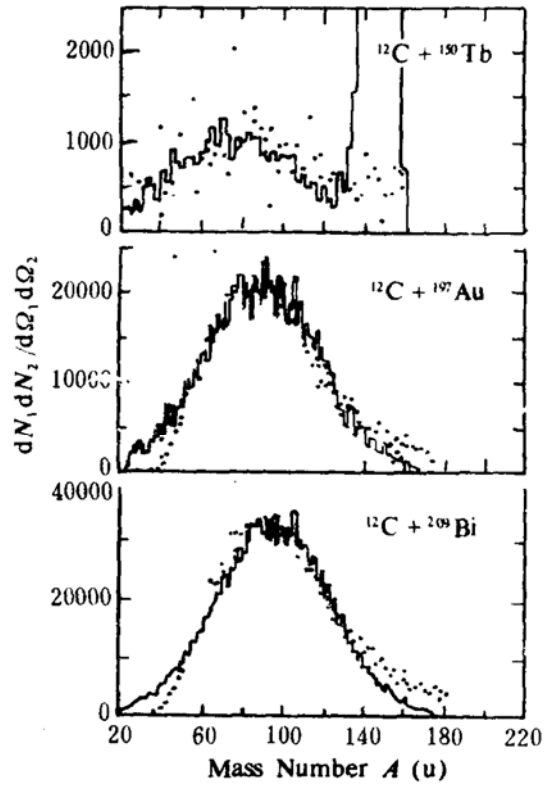


图 2 实验测得的质量分布(实点)与统计模型理论 SAGEE 计算(直方图)的比较

物质质量分布见图 2 中实点所示,直方图为 SAGEE 理论计算结果. 计算中使用的最大角动量由 BASS 模型估计,其分别为  $51\hbar$ 、 $56\hbar$  和  $56\hbar$ ,最大激发能分别为  $353\text{MeV}$ 、 $354\text{MeV}$  和  $342\text{MeV}$ . 由于 DGAC 的探测几何及阈值限制,质量数较小 ( $A < 20$ ) 的轻粒子与质量数大的蒸发余核不能被记录(DGAC 在质心系  $90^\circ$  对称放置测关联裂片,因而测不到蒸发的轻粒子和约  $0^\circ$  出射的蒸发余核,再者,轻粒子不能触发 DGAC). 因此,图中没有给出  $A < 20$  的区域. 对 C+Tb 系统,理论计算还给出了蒸发余核峰,而 C+Au/Bi 只有裂变峰. 这是因为复合核越重,可裂变参数越大,裂变几率越大所至. 理论与实验的拟合说明:中能区重离子核反应入射能直到约  $50\text{MeV/u}$  仍然以非完全熔合方式进行,可以用线性动量转移加以描述与分析,其后以级联的统计两体衰变而退激.

### 4.3 出反应平面角分布 ( $\Delta\varphi$ ) 及核温度研究 裂变过程中的粒子发射,使关联裂片出射

的共面性受到破坏.  $\Delta\varphi$  (关联裂片出射时一块与束流共面,另一块与此平面的夹角)的分布  $\sigma_{\Delta\varphi}$  越宽,反映出蒸发越强烈. 因此复合体系激发能越高,核温度就愈高. 图 3 中直方图是实验测到的出反应平面角分布,实线为高斯拟合,虚线是理论计算结果. 由图可见,  $\Delta\varphi$  分布均在  $0^\circ$  成峰,用高斯分布拟合(实线所示)得到的标准偏差  $\sigma_{\Delta\varphi}$  分别为  $7.35 \pm 2.98\text{E}-02^\circ$ 、 $6.68 \pm 8.17\text{E}-02^\circ$  和  $6.42 \pm 5.35\text{E}-02^\circ$ , 根据文献[4]中总结的  $\sigma_{\Delta\varphi}$  与单核子激发能的关系,用  $\langle lmt \rangle$  对弹核进行修正得到复合体系的单核子激发能分别为  $2.12 \pm 0.09$ 、 $1.72 \pm 0.23$  和  $1.60 \pm 0.21\text{MeV/u}$ , 由  $E^* = aT^2$  ( $a = A/10$ , 为能级密度参数)提取的核温度各为  $4.6 \pm 0.09$ 、 $4.2 \pm 0.28$  和  $4.00 \pm 0.18\text{MeV}$ . 蒸发反冲效应解释  $\Delta\varphi$  分布(虚线)给出的  $\sigma_{\Delta\varphi}$  小于实验值,并且系统越轻,差别越大. 这可能是因为 LMT 的不完全性反映在入射道两体运动学上

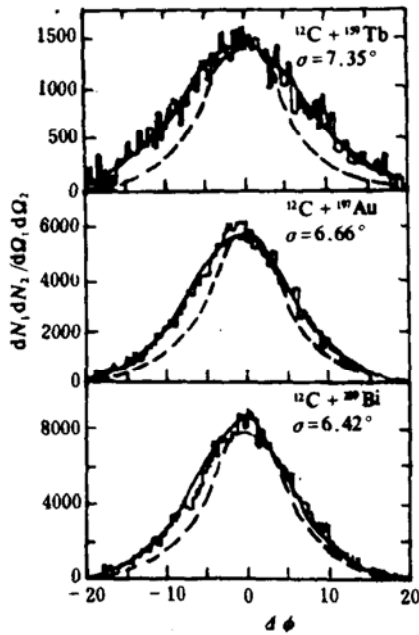


图 3 出反应平面角分布  $\Delta\phi$ , 直方图是实验结果, 实线为 GAUSS 拟合, 虚线为统计理论计算

对共线性的干扰, 靶越轻, 共线性干扰越大, 即初态类复合核偏离束流方向越杂乱, 但理论的假设初态类复合核在  $0^\circ$  方向.

### 5 结 论

对 46.7 MeV/u  $6+$  态  $^{12}\text{C}$  束轰击  $^{159}\text{Tb}$ 、 $^{197}\text{Au}$  和  $^{209}\text{Bi}$  在大筒形散射室测了裂变事件并作了理论分析, 研究了线性动量转移分布、质量分

布、出反应平面角分布和核温度. 平均线性动量转移值分别为 0.67、0.65、0.65, 与线性动量转移研究系统性一致; 从出平面角分布宽度提取的核温度各为 4.60、4.15、4.00 MeV.

本文分析讨论了两裂实验结果与非完全熔合复合核统计衰变机制. 理论计算拟合实验结果表明: 非完全熔合是中能区主要的反应过程, 其两体裂变与蒸发是热核衰变的主要方式; 在这些非对称核反应中, 比炮弹更重的复杂碎片主要来源于复合核发射, 同时较轻的粒子和余核也主要来自复合核蒸发, 这种高角动量、高激发能的复合核是以类熔合反应方式而形成的, 类熔合系统的形成及统计蒸发、裂变在中能重离子碰撞中占有重要的地位.

### 参 考 文 献

- 1 Mostefa N, et al. J. Phys. Colloque, C4, Supp. 1986, 47 : 361
- 2 Gelbke C K, et al. MSUCL-584, 1986
- 3 Pollacco E C, et al. Nucl. Phys., 1988, A488 : 319C
- 4 戴光曦等. 高能物理与核物理, 1990, 14 : 629
- 5 Charity R J, et al. Nucl. Phys., 1988, A483 : 371
- 6 Vaz L C, Alexander J M. Phys. Rep., 1983, C97 : 1
- 7 Leigh J R, et al. Phys. Rev. Lett., 1982, 48 : 527
- 8 Sierk A J. Phys. Rev. Lett., 1985, 55 : 582
- 9 Ericson T. Nucl. Phys. 1958, 8 : 284
- 10 Schmitt R P, et al. Nucl. Phys., 1982, A379 : 313
- 11 Bass R. Phys. Rev. Lett., 1977, 39 : 265
- 12 Rana G La, et al. Nucl. Phys., 1983, A407 : 233

## Fission Measurement and Analysis on 46.7 MeV/u

### $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}, ^{197}\text{Au}, ^{209}\text{Bi}$ System

Luo Qingzheng    Dai Guangxi    Qi Yujin    Yan Dehong    Wu Heyu    Jin Genming

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

**Abstract** The velocities and angles of fission partners emitted from reactions in  $^{12}\text{C} + ^{159}\text{Tb}, ^{197}\text{Au}, ^{209}\text{Bi}$  systems with bombarding energy of 46.7 MeV/u are measured. The linear momentum transfer from projectile to target, mass and out-of-reaction plane angle distributions of fission fragments are studied, and the temperatures of the target residues are extracted. (下转 35 页)

重余核质量产额分布的结果表明,随着入射能的增加,沉积在复合系统中的激发能也在增加,使得重余核产额分布的宽度增大. 激发能的增加有饱和趋势,这可能使得利用这种入射离子轰击靶核时,不能产生非常高激发能的复合系统. 在我们所使用的入射能量范围内,所得到的重余核产额分布基本可以利用级联两体衰变的模型进行描述,但在最高入射能时,实验数据与理论描述有偏高的迹象. 这是否表明,在这个激发能下,高激发核的衰变过

程开始发生变化,仍需要进一步实验证实.

### 参 考 文 献

- 1 Gross D. H. E., et al. Phys. Lett., 1988, B200: 397
- 2 Bondorf J. Phys. Lett., 1985, B162: 30
- 3 Charity R. J., et al. Nucl. Phys., 1988, A340: 371
- 4 李文新等. 原子核科学技术, 1990, 24: 60
- 5 李文新等. 高能物理与核物理, 1990, 14: 1110
- 6 Durand D. Nucl. Phys., 1992, A541: 266

## Study of Linear Momentum Transfer and Mass Distribution of Residues in Collisions of $^{12}\text{C}$ with $^{\text{Nat.}}\text{Cu}$ at 20~46. 2MeV/u

Jin Genming    Li Wenxin    Sun Tongyu    Wu Dingqing  
Sun Rulin    Zhao Lili    Yin Xinming    Luo Qingzheng

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

Li Ze    Jing Youxing    Li Xinhua

(*Institute of Atomic Energy of China, Beijing 102413*)

**Abstract** The linear momentum transfer (LMT) and mass distribution of the residues in the collisions of  $^{12}\text{C}$  with  $^{\text{Nat.}}\text{Cu}$  in energy region of 20 ~ 46. 2MeV/u were measured by using radiochemical method. Comparing the LMT in this system with that in other systems, linear dependence of the maximum LMT for central collision on geometry of target nucleus was obtained, and the average LMT then depended on the geometry of whole system.

Comparison of the mass distribution measured here with theoretical calculation indicated that the excited nuclei formed in the collisions at this energy region tended to sequential binary decay.

**Key Words** linear momentum transfer, mass distribution, decay.

(上接 42 页)

These results have been explained by statistical binary decay model. It seems that the compound-like system with high temperature about 4~5 MeV has been formed through incomplete fusion with incident energy up to ~50 MeV/u and it decays by fission and light particle emission.

**Key Words** linear momentum transfer, statistical binary decay, incomplete fusion, nuclear temperature.