

5.5 到 21.7 MeV/A $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 系统的裂变测量*

(I) 线动量转移和偏离反应平面分布

戴光曦 漆玉金 郑纪文 刘希明

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

陈源达 R. STOKSTAD J. POULIOT A. HARMON D. DIGREGORIO

(劳伦兹伯克利实验室, 美国)

摘 要

用 5.5 到 21.7 MeV/A 的 ^{28}Si 打 ^{197}Au , 测量关联裂片的速度及角分布. 实验表明: 入射能超过 10 MeV/A 时, 出现非完全熔合裂变 (ICF); $E_{cm} > 200$ MeV 时, 伴随 ICF 又出现跟随裂变 (SF). 从线性动量转移 (LMT) 分布中, 提取了 SF 产额对总裂变产额的比值. 从关联裂片偏离反应平面的分布中, 给出了分布宽度与单核子激发能的线性关系式.

一、引 言

单核子能量 10—22 MeV/A, 是低能到中能的过渡能区. 在此能区, 尚未对 $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 的裂变反应做过系统研究, 由于非完全熔合裂变 (ICF) 与跟随裂变 (SF) 共存, 使出射裂片的总动能 (TKE)、角分布等, 比纯粹的全熔合裂变 (CF) 的情况要复杂得多. 过去对 ICF/CF 的研究较多, 在 20—30 MeV/A 的 ^{58}Ni 和 31—40 MeV/A 的 ^{40}Ar 打 ^{232}Th 实验中, 发现弹核每核子转移给靶核的线动量上限为 $180 \pm 20 \text{ MeV}/CA^{1/3}$, 在 $^{14}\text{N} + ^{232}\text{Th}$ 的实验中得到支持^[2]. 但是, 对 SF 的研究却较少, 要使 SF 同 ICF/CF 分开, 是比较困难的. 在 GSI, 曾用 ^{238}U 打 ^{16}O 到 ^{89}Y 一系列靶, 采用二体事件 (对应 CF 和快裂变) 同三体事件 (对应 SF) 分离的方法, 对 SF 做过研究, 测出了 SF 的绝对截面, 得到了该截面下限与库仑参数成简单的线性关系^[3,4].

本实验对裂变碎片做了近乎全角范围 ($5^\circ - 169^\circ$) 的关联探测, 得到了线性动量转移 (LMT) 分布, 采用双高斯曲线拟合的方法, 提取出了 SF 产额对裂变总产额的比值, 即 SF 的相对截面, 给出了 SF 的相对激发函数曲线.

本文 1989 年 5 月 29 日收到.

* 本工作为国家自然科学基金资助项目, 实验是在美国 LBL 88 英寸回旋加速器上完成.

裂变伴随的粒子蒸发,使裂片反冲而偏离另一关联裂片同束流轴构成的反应平面. 在 $^{14}\text{N} + ^{238}\text{U}$ 的实验中,得到了关联裂片偏离反应平面的分布^[5]. 这个分布宽度是描述粒子蒸发多重性的重要参量,应当与裂变核的激发能相关. 本实验也测出了 $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 反应裂片偏离反应平面的分布. 发现该分布的宽度随入射能的增高而变宽,得到了分布宽度与新形成的复合核单核子激发能间的线性关系,还用简化的蒸发模型做了估算和拟合.

二、实验方法

本实验是在美国劳伦兹伯克利实验室的 88 英寸回旋加速器上完成的. 是以单核入射能为: 5.5、6.18、7.0、10.0、15.0 和 21.7 MeV/A 的 ^{28}Si 束, 轰击 ^{197}Au 箔靶, 靶厚度为 $270\mu\text{g}/\text{cm}^2$. 关联裂片用六块灵敏面积均为 $25 \times 20\text{cm}^2$ 的双栅位置灵敏雪崩室 (PPAC),^[6] 作位置和飞行时间测量, x 和 y 位置分辨均为 4 mm. 这六块 PPAC 分成前后两组, 每组三块, 两组间作符合测量. 前角三块 PPAC 置于活动转臂上, 可做整体转动, 距靶心约 60cm, 覆盖的角范围为 $5^\circ - 74^\circ$; 后角三块 PPAC 固定, 距离靶心约 40cm, 覆盖的角范围从 $-60^\circ - 169^\circ$. 另外, 还有一台气体电离室 (ΔE) 加位置灵敏半导体 (E) 组成的望远镜系统, 置于 -14° 到 -30° 的可变范围内, 距离靶心约 31cm, 张角约 10° , 测量与裂片符合的带电粒子能量、发射角及电荷鉴别.

关联裂片的飞行时间测量中, 采用加速器的高频信号做起始信号, 束流相位对应的时刻 T_0 , 用对比法确定. 从关联裂片的飞行时间差 (不依赖于 T_0), 可得到质心系中两裂片的相对速度 v_r ; 同时, 给定一个 T_0 初始值, 用绝对飞行时间也可得出两裂片的相对速度 v_g , 调节 T_0 , 使 $v_r = v_g$, 则可定出 T_0 来.

三、实验结果及其讨论

测出关联裂片速度 v_1 、 v_2 及其发射角 θ_1 、 θ_2 , 由两体运动学的动量守恒, 可直接定出 LMT 与入射初始动量的比值 lmt:

$$\text{lmt} = \frac{v_1 \cdot v_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)}{V_{cm} \cdot (v_1 \sin \theta_1 + v_2 \sin \theta_2)}, \quad (1)$$

式中 V_{cm} 是系统的质心速度.

从图 1 可见, 当入射能超过 10 MeV/A 时, lmt 分布出现两个峰, 用双高斯曲线进行拟合 (图中虚点表示), 得到这两个峰的最可几值 $\langle \text{lmt} \rangle$. $\langle \text{lmt} \rangle$ 值大的峰对应于中心碰撞的 ICF, 10.0、15.0 和 21.7 MeV/A 三个入射能下, 对应的 $\langle \text{lmt} \rangle$ 值分别为: 0.97、0.92 和 0.82, 随入射能增高而逐渐减小, 在 21.7 MeV/A 时, 降为 0.82, 对应的单核子 LMT 为 165 MeV/C · A. 另一个 $\langle \text{lmt} \rangle$ 值小的峰, 对应于周边碰撞, 随入射能的增高, $\langle \text{lmt} \rangle$ 值几乎不变. 约为 0.33, 即入射弹核转移约 1/3 的初始线动量给靶核, 相当于深部非弹性碰撞后类靶碎片的跟随裂变 (SF).

3.1 $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 系统的跟随裂变

用双高斯曲线拟合 lmt 分布, 得到 SF 和 ICF 在曲线下所占的面积, 给出 SF 产

额对裂变总产额的比值. 由于本实验对裂片进行了近似于全角范围探测, 对 SF 和 ICF 的探测几何是一样的, 因此, 可将这个产额之比近似地当作截面之比: $\sigma_{SF}/(\sigma_{SF} + \sigma_{ICF})$. 图 2 中给出了该比值随质心系入射能 E_{cm} 的曲线, 即 SF 的相对激发函数曲线.

从图上可见, 对于 $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 系统, 产生 SF, 存在一个能量阈值, 约为 200 MeV. 入射能超过这个阈值之后, SF 截面迅速上升, 在 21.7MeV/A 时, 该比值达到 17.6%. SF 可平均地看成, 在入射道全阻尼下, ^9Be 进入 ^{197}Au , 形成 ^{206}Bi 后的裂变. ^{206}Bi 裂变位垒较高, 约 20MeV. 在入射能 $E_{cm} = 200\text{MeV}$ 时, 形成的 ^{206}Bi 激发能够为 80MeV. 从 $^9\text{Be}-^{197}\text{Au}$ 系统质量弛豫到对称系统的裂变鞍点, 存在阻尼效应. 可采用去窗项的单体耗散公式来估算这个阻尼耗散能^[7,8]:

$$\Delta E = 2.5 \times 10^{-22} \frac{1}{2\tau A^{2/3}} \left[\left(\frac{A}{A_1} \right)^{2/3} + \left(\frac{A}{A_2} \right)^{2/3} \right] \cdot (\Delta A_{\max})^2. \quad (2)$$

式中, τ 是质量弛豫的特征时间, 取为 5.3×10^{-21} 秒; A 为复合系统的质量数, ΔA_{\max} 为从非对称到对称时最大质量弛豫数值, 即为 $\frac{1}{2}(A_1 - A_2)$. 在 $A_1 \gg A_2$

时, (2) 式可简化为: $\Delta E = 0.0059 \left(\frac{A_1}{A_2^{1/3}} \right)^2 (\text{MeV})$. 这样算出 ΔE 为 55MeV, 即 ^{206}Bi 的 80MeV 激发能将用 55MeV 来克服质量弛豫的耗散, 而剩下的 25MeV, 用于越过裂变位垒, 产生 SF.

3.2 伴随裂变的轻粒子发射及其对裂片共面性的干扰

在入射能为 21.7MeV/A 时, 置于 -17° 的 $\Delta E-E$ 望远镜系统, 探测到的与裂片符合的 α 粒子能谱, 见图 3 从图上可见, α 粒子按能量分为两组: 低能组最可几能量约 12MeV, 对应于裂后的碎片蒸发; 高能组 α 能量分布很宽, 到 70MeV 时, 已穿透了半导体 E 探测器而折回, 在高能尾端凸起, 最可几能量为 38MeV, 与裂前的复合核蒸发及预平衡发射过程相关.

裂变伴随的粒子蒸发, 使关联裂片出射的共面性受到干扰. 在质心上看, 关联裂片偏

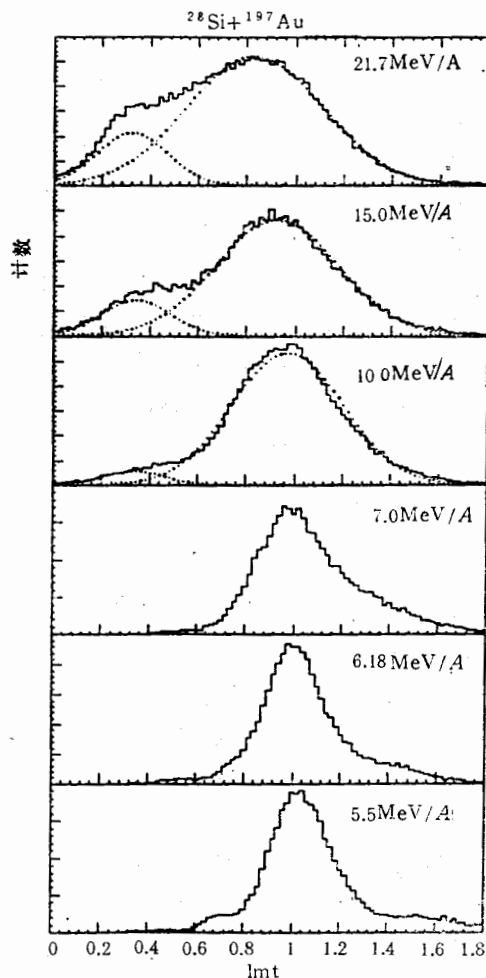


图 1 $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 反应, 在 5.5、6.18、7.0、10.0、15.0 和 21.7MeV/A 下, 从关联裂片给出的线性动量转移分布. 图中虚点为双高斯拟合曲线.

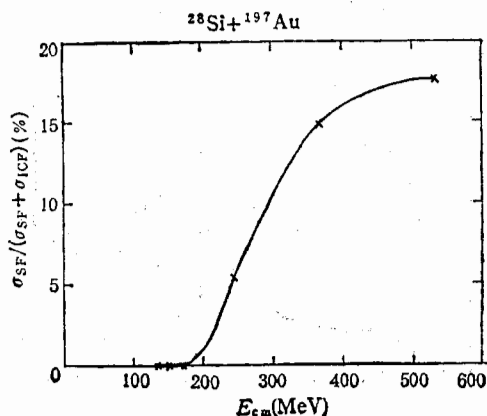


图2 $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 系统跟随裂变的相对截面
激发函数曲线

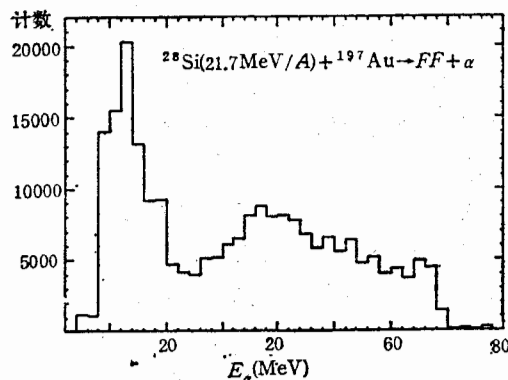


图3 在21.7MeV/A时,在 -17° 探测到的
与裂片符合的 α 粒子能谱

离反应平面出射的角度 $\Delta\phi$ (注意它不是 $\varphi_1 - \varphi_2$), 可由下式给出:

$$\sin(\Delta\phi) = \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \cdot \sin\theta_{cm}. \quad (3)$$

式中 φ_1 和 φ_2 分别是测到的裂片1和裂片2的幅角, θ_{cm} 是裂片在质心系中的发射角. 图4给出了关联裂片偏离反应面的 $\Delta\phi$ 分布. 从图上可见, 随着入射能的增高, $\Delta\phi$ 分布变宽, 反映出蒸发变得愈强烈.

考察 $\Delta\phi$ 分布宽度对裂片发射角 θ_{cm} 的依赖性, 发现它与裂片发射角 θ_{cm} 无关, 这表明 $(\varphi_1 - \varphi_2)$ 与 θ_{cm} 有关联, 也表明裂变过程, 主要是内部激发能达到平衡的复合核裂变, 而不是快裂变. 用高斯曲线拟合 $\Delta\phi$ 分布, 得到 $\Delta\phi$ 分布的标准宽度(偏差) $\sigma_{\Delta\phi}$, 考察它随所形成的复合核单核子激发能 E^*/A 的依赖关系, 显示于图5. 从图上可见, $\sigma_{\Delta\phi}$ 对 E^*/A 有单调上升的趋势, 在 E^*/A 大于 $1.5\text{MeV}/A$ 时, 上升渐缓. 为了便于比较, 图中也给出了 $^{14}\text{N} + ^{238}\text{U}$ 反应^[5]和 $^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}/^{209}\text{Bi}$ 反应^[9]的结果, 发现它们与本实验的结果, 都落在相同的曲线上. 在 $E^*/A \leq 1.5\text{MeV}/A$ 下, 实验数据点可同直线拟合, 其结果为:

$$\sigma_{\Delta\phi} = 2.8 \cdot (E^*/A) + 1.10 \text{ [度]}. \quad (4)$$

对于 E^*/A 大于 $1.5\text{MeV}/A$, 实验点落在该直线之下, 可能是由于 lmt 小于1, 而实际激发能低于计算值所致.

由于 $\sigma_{\Delta\phi}$ 是垂直于反应平面的反冲分量的量度, 而自旋又与反应平面垂直, 因此裂后碎片蒸发轻粒子, 对 $\sigma_{\Delta\phi}$ 的贡献是主要的. 因为裂前裂变核自旋高, 对于粒子发射方向限制在赤道面的效应很强, 故沿自旋方向发射几率小; 但裂后碎片的自旋仅为 $1/7$ 裂变核的自旋. 故方向限制效应大为减弱.

现在采用裂片级联蒸发轻粒子的简化模型来估算实验结果. 仅考虑蒸发中子、质子和 α 粒子(分别以 1、2、3 作标号), 则蒸发质子和 α 粒子对蒸发中子的几率比 P_{i1} 为:

$$P_{i1} = \Gamma_i/\Gamma_n = \exp[(B_n - B_i - W_i)/T_0], \quad (i = 2, 3) \quad (5)$$

式中 B_n 和 B_i 分别为蒸发中子、质子或 α 粒子的结合能, W_i 为质子或 α 粒子的库仑

位垒; T_0 为核温度, 它等于 $\left[\frac{8}{A}(E_{cm} + Q + Q_f - \text{TKE})\right]^{1/2}$. 轻粒子蒸发使裂片受到反冲, 其反冲速度令为 v_{Ri} , 则造成裂片偏离反应平面分布的宽度为:

$$\sigma_i^2(\Delta\phi) = \frac{2}{3} \left(\frac{v_{Ri}}{v_f}\right)^2 (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

式中, v_f 是裂片的平均速度 (取为 1.2cm/nc), 乘以 2 的因子是考虑两裂片各自蒸发的

效果. 这样总的分布宽度为: $\sigma_{\Delta\phi}^2 = \sum_{i=1}^3 N_i \sigma_i^2(\Delta\phi)$.

其中 N_i 是蒸发 i 粒子的平均数目. 对于 ²⁸Si + ¹⁹⁷Au 系统, 其熔合 Q 值为 -85.4MeV, 而裂变 Q_f 值与总裂变总动能 (TKE) 的差值为 29MeV, 令平均结合能 B_n 、 B_p 和 B_α 分别取为 8.5、7.5 和 3.5MeV, 由此估算出的 $\sigma_{\Delta\phi}$ 随 E^*/A 变化的曲线, 显示于图 5 中(虚点线表示). 可见, 它与实验

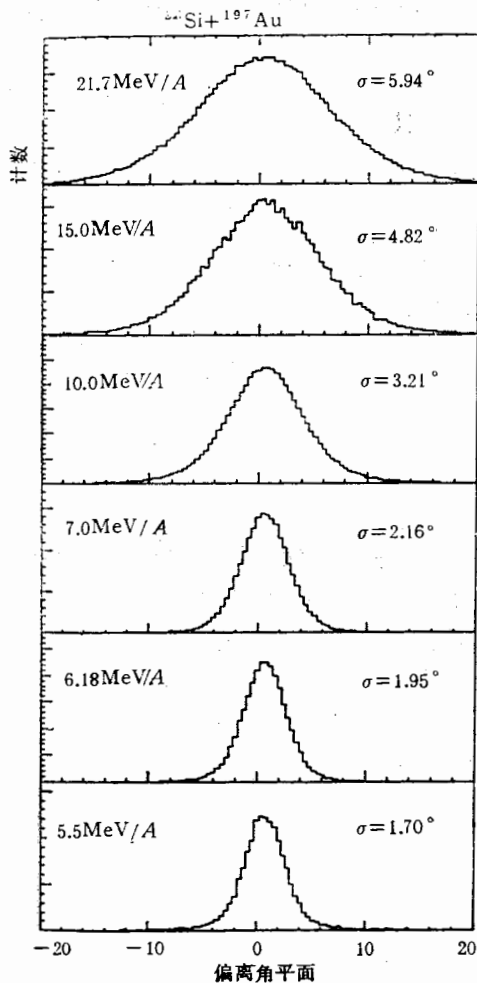


图 4 在不同入射能下, 测到的关联裂片偏离反应平面的分布

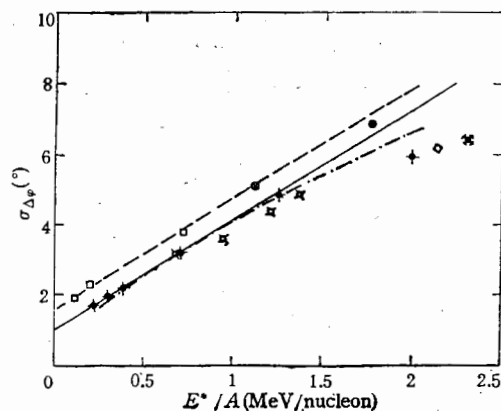


图 5 裂片偏离反应平面分布宽度 $\sigma_{\Delta\phi}$, 随复合核单核子激发能 E^*/A 的关系
实线为拟合直线, 虚点线为蒸发理论估算结果
◆ ²⁸Si + ¹⁹⁷Au □ ¹⁴N + ²³⁸U ⊗ ²⁸Si + ²³⁸U
□ ⁴⁸Ca + ²⁰⁸Pb ◇ ¹⁰Ne + ²⁰⁹Bi ⊗ ¹⁰Ne + ¹⁹⁷Au

值的拟合较好. 对 21.7MeV/A 的入射能, 估算出的中子数约 25 个, 质子与 α 粒子数分别约 6 和 2 个, 蒸发中子数偏大. 对 18MeV/A 的 ²⁰Ne + ¹⁹⁷Au 裂变反应, 中子多重性测量给出: 中子数分布的最可几值为 15^[10]. 可见, 前面的简单估算是合理的.

四、结 束 语

在 10—22MeV/A 的 ²⁸Si + ¹⁹⁷Au 裂变反应中, 由于 ICF 和 SF 同时出现, 使裂变

测量及其分析变得复杂。利用 SF 和 ICF 在 lmt 分布中,对应的 lmt 值的差别,提取了 SF 的相对截面,发现对该系统的 SF, 存在一个反应阈能, 用去窗项的单体耗散质量弛豫过程进行了解释。LMT 的不完全性, 反映在二体运动学上, 是对共线性的干扰。同时, 反映在关联裂片出射共面性的干扰上, 可用蒸发反冲效应来解释, 其偏离反应平面分布的宽度, 与单核子激发能间似乎有一线性规律。

参 考 文 献

- [1] N. Mostefa et al., *J. Phys. Colloque*, **C4**, supp. 47 (1986), 361.
- [2] C. K. Gelbke et al., MSUCL-584, 1986.
- [3] J. Toke, B. Bock, G. Dai et al., *Nucl. Phys.*, **A440**(1985), 327.
- [4] G. Dai et al., Proc. of Tsukuba Int. Symp. on HI Fusion Reaction 1984, 205.
- [5] L. G. Tsang et al., *Phys. Lett.*, **134B** (1984), 169.
- [6] J. Tang, X. Liu et al., *Nucl. Elect. & Det. Tech.*, **8**(1988), 145.
- [7] J. Randrup et al., *Nucl. Phys.*, **A429** (1984), 105.
- [8] W. Shen et al., *Phys. Rev.*, **C36** (1987), 115.
- [9] G. La. Rana et al., *Nucl. Phys.*, **A407** (1983), 233.
- [10] U. Jahnke et al., *J. Phys. Colloque*, **C4**, supp. 47 (1986), 317.

FISSION MEASUREMENT ON 5.5 TO 21.7 MeV/A $^{28}\text{Si}+^{197}\text{Au}$ SYSTEM (I) LINEAR MOMENTUM TRANSFER AND DISTRIBUTION OF OUT-OF-REACTION PLANE

DAI GUANGXI QI YUJIN ZHENG JIWEN LIU XIMING

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

Y. CHAN R. STOKSTAD J. POULIOT A. HARMON D. DIGREGORIO

(Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, CA-94720, U.S.A.)

ABSTRACT

The velocities and angular distributions of fission partner emitted from reaction in $^{28}\text{Si}+^{197}\text{Au}$ system with energies from 5.5 up to 21.7 MeV/A are measured. These results show that when the incident energies are larger than 10 MeV/A, the incomplete fusion-fission (ICF) associated with incomplete linear momentum transfer (LMT) appears. Furthermore, when $E_{cm} > 200$ MeV, as a companion of ICF, the sequential fission (SF) with lower LMT than that of ICF, has apparent yields. By the difference of LMT for ICF and SF, the ratio of SF over total fission cross-section has been obtained. Meanwhile, the distribution around the reaction plane of one fragment with a standard deviation has been obtained. It seems that there is a simple linear global relationship between the deviation and excitation energy per nucleon in heavier composite systems.