

非全熔合反应裂变角分布*

刘国兴 陈克良 于 暹 戴光曦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1996-09-17收稿

摘 要

采用核固体径迹探测器测量了 $^{16}\text{O} + ^{159}\text{Tb}$ 、 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$ 反应碎片角分布.扣除中等质量碎片(IMF)的贡献,用过渡态统计模型(TSM)和单个自旋标准理论拟合实验的裂变角分布,提取裂变核的自旋.讨论了它随质心系入射能量的变化.

关键词 非完全熔合裂变, 跟随裂变, 裂变核自旋.

1 引 言

在重离子引起的核碰撞实验中,测量碎片角分布是研究核反应机制的一个重要手段.很多年以来,人们对碎片角分布进行了广泛的实验和理论研究.弹核能量小于 10MeV/u ,碎片角分布的大多数实验,包括轻粒子和较轻重离子引起的裂变反应,在角动量和激发能不很高时,测量的碎片角分布能够用统计鞍点模型描述^[1].但是弹核能量在位垒附近或在垒下时,实验上发现裂变角分布有反常大的各向异性^[2].实验中使用更重的离子以后,例如 $^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}$ 、 $^{32}\text{S} + ^{232}\text{Th}$ 、 $^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{32}\text{S} + ^{248}\text{Cm}$,实验的碎片角分布也有反常大的各向异性^[3],这是难以用复合核过渡态理论来解释的.这种反常大的各向异性可能与某种特殊的裂变过程有关.

进入八十年代,人们对中能区重离子核碰撞产生了很大的兴趣.高温核的形成,鉴别和衰变性质的研究是当今中能重离子核碰撞的前沿.实验上测量中能重离子核反应碎片角分布对了解核反应特性和考察产生碎片的反应机制是很重要的.但是到目前为止,这方面的工作还很少.由于从低能到中能的过渡区域出现了全熔合裂变(CF)、非完全熔合裂变(ICF)和跟随裂变(SF)共存现象,使得对碎片角分布的分析更加困难.

迄今,已经发表了的工作有 $86\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}$ ^[4]、 $16\text{MeV/u } ^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}$ ^[5]和 32 、

*国家自然科学基金资助.

44MeV / u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ ^[6]反应碎片角分布测量,这些工作都是在 4π 立体角范围内收集反应物,用离束 γ 谱学方法获得给定质量数的碎片角分布.戴光曦等^[7]用 6 块灵敏面积为 $20 \times 25\text{cm}^2$ 双栅位置灵敏雪崩室 (PPAC) 对 5.5—21.7MeV / u $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 反应在较大的角度范围内进行了碎片的关联测量,利用线性动量转移分布分开非完全熔合裂变和跟随裂变事件,用过渡态统计模型拟合实验的角分布,提取了裂变核的自旋.

2 实 验

实验是在中国科学院近代物理研究所重离子加速器 (HIRFL) 上进行的. ^{16}O 离子束能量是 50MeV / u. 一个直径为 20cm, 长为 340cm 柱型散射室与加速器管道相连接. 束流经过一个长 15cm 的准直器进入散射室, 准直器内设置两个由石墨做成的光栏, 光栏直径为 6mm, ^{159}Tb 、 ^{197}Au 和 ^{209}Bi 靶厚度分别为 250.0、275.3 和 250.0 $\mu\text{g} / \text{cm}^2$. 靶子放在靶室中心, 并且与入射束流方向成 45° 角. 散射室末端的法拉第筒与电流积分器相连, 测量束流强度. 靶室中心部位有一个直径为 17.0cm 的圆筒, 其内壁固定天然白云母核径迹探测器, 靶中心到探测器的距离是 8.5cm. 照射后, 云母探测器在恒温水浴中蚀刻, 条件是: 48%HF, 50°C , 45min. 在光学显微镜下可观察到规则的菱形碎片径迹, 用 40.0×12.5 倍光学显微镜扫描与入射束成各种角度的探测器记录的碎片径迹数, 获得在实验室系的碎片角分布.

3 实验结果和讨论

3.1 碎片角分布

图 1 给出 35.9、41.0、45.6、50.0MeV / u $^{16}\text{O} + ^{159}\text{Au}$, 50.0MeV / u $^{16}\text{O} + ^{159}\text{Tb}$, 50.0MeV / u $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$ 反应在实验室系的碎片角分布. 观测角度的范围是 $7^\circ - 165^\circ$, 3 个反应在实验室系角分布的形状是相同的, 即在向前方向成峰. 在 $\theta_{\text{Lab}} < 30^\circ$ 时有较大的微分截面, 随着角度增加, 微分截面按指数规律下降. 当 $\theta_{\text{Lab}} > 90^\circ$, 随着角度的增加微分截面缓慢地减少. 微分截面比 $\theta_{\text{Lab}} < 90^\circ$ 时要小很多. 图 2 给出这些反应在质心系的碎片角分布, 可以看出有相同形状, 是关于 $\theta_{\text{cm}} = 90^\circ$ 非对称的, 在小角区 $\theta_{\text{cm}} < 30^\circ$ 有较大的微分截面. 对 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应, 其角分布各向异性随炮弹能量增加略有增加.

3.2 碎片角分布的理论模型分析

根据以前的工作知道^[8], 我们观测的碎片有两种类型: 中等质量碎片和裂变碎片. 在质心系中等质量碎片主要是在向前方向, 裂变碎片 (包括非完全熔合裂变和跟随裂变) 其角分布都是关于 $\theta_{\text{cm}} = 90^\circ$ 对称的. 由裂变角分布这一特性可以对图 2 给出的质心系角分布进行分解, 扣除中等质量碎片的贡献, 提取裂变反应角分布并且用 90° 的微分截面归一, 结果如图 3 中的实验点所示. 裂变碎片主要来自非完全熔合裂变和跟随裂变两个反应道的贡献.

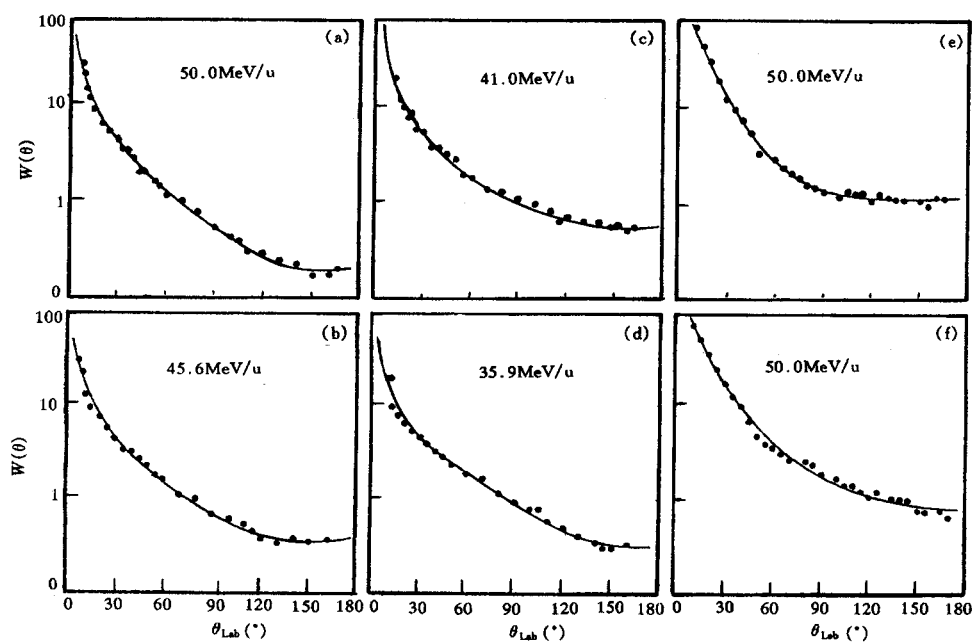


图 1 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ (a—d)、 $^{16}\text{O} + ^{159}\text{Tb}$ (e)和 $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$ (f)反应在实验室的碎片角分布
实线是连接实验点的趋势线。

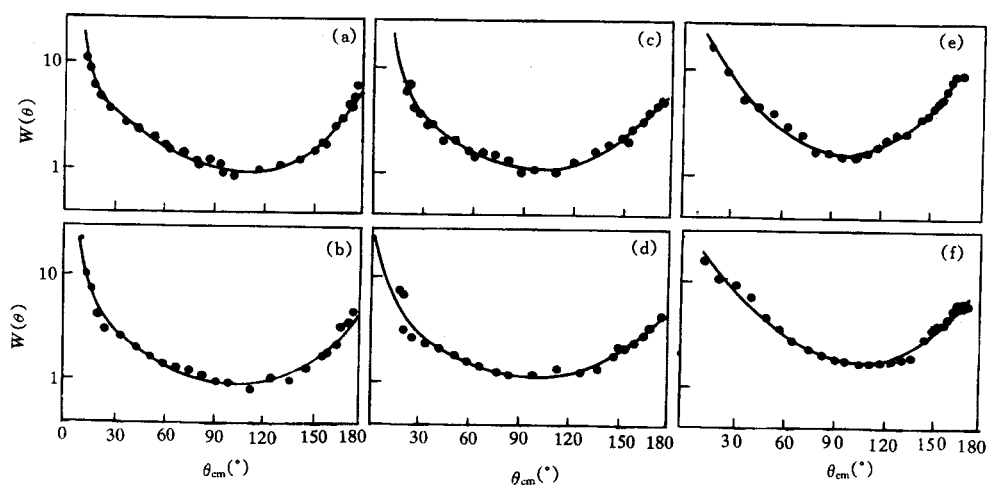


图 2 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ (a—d)、 $^{16}\text{O} + ^{159}\text{Tb}$ (e)和 $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$ (f)反应在质心系的碎片角分布
实线是连接实验点的趋势线。

跟随裂变对应于周边碰撞, 裂变核自旋主要是入射道擦边角动量区域内角动量分波的贡献. 用单个自旋的标准理论计算跟随裂变角分布, 假设跟随裂变母核是在锐半径 $R = r_0 A_t^{1/3}$ 处俘获 $\langle lmt \rangle_{\text{SF}}$ A_p 弹核部分而形成的, 这样给出的自旋 I_{SF} 是

$$I_{\text{SF}} = 0.2187 A_t^{1/3} \langle lmt \rangle_{\text{SF}} A_p (E_{\text{Lab}} / A_p)^{1/2}. \quad (1)$$

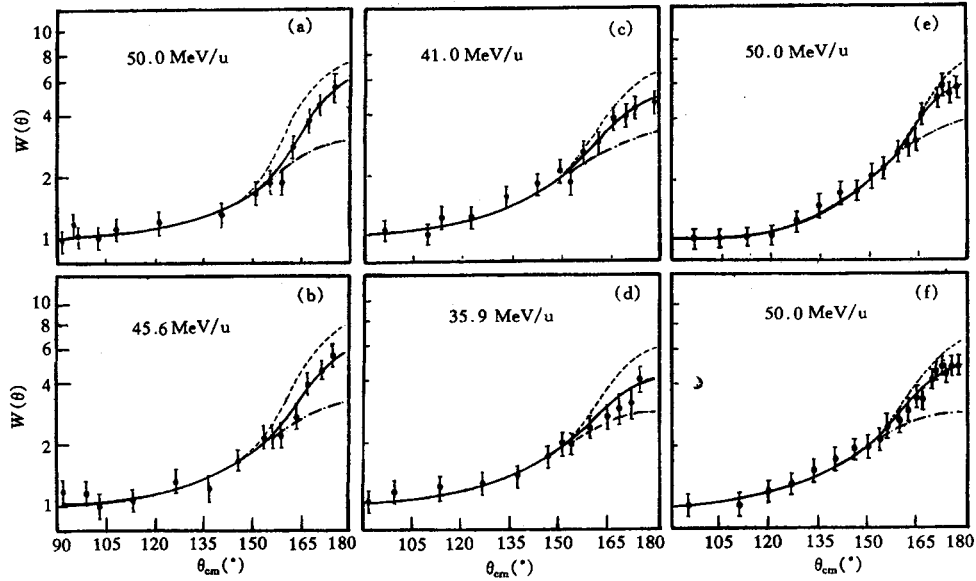


图 3 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ (a-d)、 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Tb}$ (e)和 $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$ (f) ICF、SF 反应在质心系的碎片角分布
——ICF + SF; - - - - ICF; - · - SF.

跟随裂变角分布的表达式是

$$\frac{W(\theta)}{W(90^\circ)} = \frac{\exp(x \cos^2 \theta) J_0(ix \sin^2 \theta)}{J_0(ix)} \quad (2)$$

式中 $x = [(I_{\text{SF}} + 1/2) / 2K_0]^2$. 根据方程(1)和(2)计算跟随裂变角分布.

非完全熔合裂变角分布由过渡态统计模型^[9]计算,

$$W(\theta) = \sum_{l=0}^{l_m} \frac{(2l+1)^2 T_l \exp[-(l+1/2)^2 \sin^2 \theta / 4K_0^2] J_0[i(l+1/2)^2 \sin^2 \theta / 4K_0^2]}{\text{erf}[(l+1/2) / (2K_0)^{1/2}]}, \quad (3)$$

其中 T_l 是透射系数, 在此取 $T_l = 1.0$, $\text{erf}(x) = (2/\pi^{1/2}) \int_0^x \exp(-t^2) dt$ 是误差函数, J_0 是带有虚自变量的零级贝塞尔函数.

$$K_0^2 = T(I) \mathcal{J}_{\text{eff}} / \hbar^2, \quad (4)$$

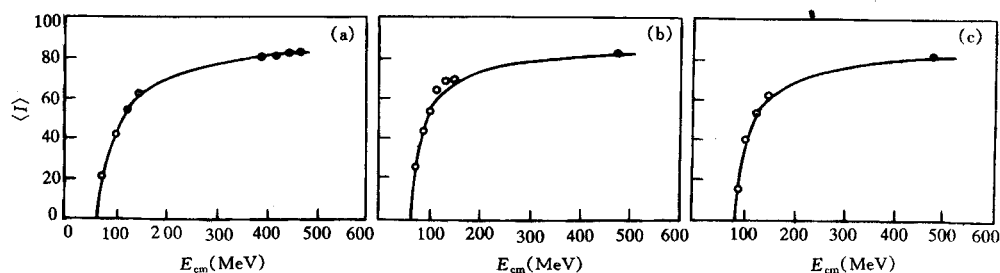
式中 \mathcal{J}_{eff} 是核在鞍点的有效惯性矩, $\mathcal{J}_{\text{eff}}^{-1} = \mathcal{J}_{\parallel}^{-1} + \mathcal{J}_{\perp}^{-1}$, \mathcal{J}_{\parallel} 和 \mathcal{J}_{\perp} 分别是平行和垂直于空间固定轴 (z 轴) 的惯性矩, 它们由卡西尼亚卵形体算出^[10]. 鞍点核温度

$$T(I) = [(E_{\text{cm}} + Q - E_{\text{rot}} - B_f) / a]^{1/2}, \quad (5)$$

对于非完全熔合反应 $E_{\text{cm}} = E_{\text{Lab}} \langle lmt \rangle A_p / A_{\text{CN}}$, $A_{\text{CN}} = \langle lmt \rangle A_p + A_t$, A_p 和 A_t 分别是入射炮弹和靶核质量数, Q 是熔合反应热能, B_f 是裂变位垒高度, E_{rot} 是转动能, $E_{\text{rot}} = \hbar^2 I(I+1) / 2\mathcal{J}_{\perp}$, 能级密度参数取 $a = A_{\text{CN}} / 8.5$. 改变 l_m , 用方程(2)和(3)计算跟随裂变和非全熔合裂变角分布之和并与实验的角分布获得最佳符合, 提取 l_m . 非全熔合反应裂变核平均自旋

$\langle l \rangle = \frac{2}{3} l_m$. 符合角分布的各种参数和提取的 l_m 列在表 1 中.

对于 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应, 从实验的角分布中提取的非完全熔合裂变核平均自旋 $\langle l \rangle$ 随入

图 4 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ (a)、 $^{16}\text{O} + ^{159}\text{Tb}$ (b)和 $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$ (c)反应裂变核平均自旋 $\langle I \rangle$ 和质心系能量的关系

●本工作; ○数据取自文献 [11].

表1 裂变核平均自旋及其拟合碎片角分布各种参数

反应体系	E_{Lab} (MeV/u)	A_{CN}	$\langle l_{\text{mt}} \rangle$	Q (MeV)	J_0/J_{eff}	K_0	T (MeV)	l_m (\hbar)	$\langle I \rangle$ (\hbar)	
$^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$	ICF	50.0	207	0.622	-1.97	1.267	18.54	4.19	126	84
	ICF	45.6	207	0.651	-1.97	1.436	17.49	4.18	121	80
	ICF	41.0	208	0.684	-5.03	1.399	17.32	4.09	115	76
	ICF	35.9	209	0.722	-18.12	1.388	16.29	3.89	110	74
	SF	50.0	201	0.25	-1.48	1.546	13.12	2.71	36	24
	SF	45.6	201	0.25	-1.48	1.546	13.01	2.64	34	22
	SF	41.0	201	0.25	-1.48	1.546	12.47	2.41	33	22
	SF	35.9	201	0.25	-1.48	1.546	11.99	2.21	30	20
$^{16}\text{O} + ^{159}\text{Tb}$	ICF	50.0	160	0.622	2.89	1.68	14.16	4.39	110	73
	SF	50.0	163	0.25	-0.74	1.761	10.63	2.89	33	22
$^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$	ICF	50.0	219	0.25	-15.5	1.289	19.01	4.05	120	80
	SF	50.0	213	0.25	-9.25	1.544	13.89	2.73	37	25

射的质心系能量 E_{cm} 变化如图 4 所示, 从图 4 看出, 在 $E_{\text{cm}} < 150\text{MeV}$ 时, 发生全熔合反应裂变核的平均自旋以 $0.70\hbar / \text{MeV}$ 的斜率很快增加, 当 $E_{\text{cm}} > 150\text{MeV}$ 时出现非全熔合反应, 随轰击能量的增加非全熔合所占的比例愈来愈大. 反映在裂变核 $\langle I \rangle$ 上仅以 $0.05\hbar / \text{MeV}$ 的斜率缓慢增加, 对于 $^{16}\text{O} + ^{159}\text{Tb}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$ 反应, 在 $E_{\text{cm}} > 150\text{MeV}$ 时, 尽管仅有一个实验点, 但是整个数据趋势是和 $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应一致的, 我们的结果和戴光曦等^[7] 关于 $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 反应的结果也是一致的. 不难看出, 非全熔合不仅丢失了一些线性动量, 而且也丢失了一些角动量, 从而降低了裂变核的自旋. 从图 4 还可以看到一个更有趣的现象, 就是当 $E_{\text{cm}} > 200\text{MeV}$ 时, 3 个反应的非完全熔合裂变核的平均自旋 $\langle I \rangle$ 趋于饱和值, 这个饱和值大约为 $80\hbar$.

参 考 文 献

- [1] L. C. Vaz, J. M. Alexands, *Phys. Rep.*, 97(1983)1.
 [2] Zhang Huangqiao *et al.*, International Symposium on Heavy Ion Physics and Its Application, Lanzhou, 8-12 Oct. 1990, P.369.

- [3] B. B. Back *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **46**(1981)1068.
- [4] K. Aleklett *et al.*, *Phys. Rev.*, **C33**(1986)885.
- [5] R. H. Kraus *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A342**(1985)525.
- [6] W. Loveland *et al.*, *Phys. Rev.*, **C41**(1990)973.
- [7] 戴光曦等, 高能物理与核物理, **14**(1990)739.
- [8] 刘国兴等, 高能物理与核物理, **19**(1995)305.
- [9] R. Vandenbosh, J. R. Huizenga, *Nuclear Fission*, Academia, New. York. 1973.
- [10] 戴光曦、刘希明、刘国兴、高能物理与核物理, **11**(1987)515.
- [11] V. E. Viola *et al.*, *Phys. Rev.*, **129**(1963)1710.

Fission Angular Distributions for the Incomplete Fusion Reactions

Liu Guoxing Chen Keliang Yu Xian Dai Guangxi

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

Received 17 september 1996

Abstract

The fragment angular distributions for $^{16}\text{O} + ^{159}\text{Tb}$, $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ and $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$ reactions have been measured by the solid state track detectors. After subtraction of the contribution of intermediate mass fragment (IMF), the fission angular distributions have been fitted by the transitional state statistical model (TSM) and the single spin standard theory to extract the spins of the fission nuclei. The relation between spins and bombarding energies is discussed.

Key words incomplete fusion fission, sequential fission, fission nuclei spin.