

25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}, ^{209}\text{Bi}$ 反应中热核的 温度和激发能测量*

尹淑芝 金卫阳 张 纯 靳根明 郑纪文 邬恩九
谭继廉 李祖玉 王素芳 宋明涛 吴和宇 贺智勇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

江 栋 兴 钱 兴

(北京大学技术物理系 北京 100871)

1996-08-20 收稿

摘 要

在 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}, ^{209}\text{Bi}$ 反应中, 用 4 个 PPAC 和 11 组望远镜完成了关联裂变碎片与发射轻粒子的符合测量. 角关联描绘为两个被探测到碎片折叠角 θ_{ff} 的函数, 线性动量转移 (LMT) 由测量到的角关联推出. 将符合测量得到的对应于不同 $\langle \text{LMT} \rangle$ 窗的后角轻带电粒子能谱用 Maxwell 分布来拟合其谱的后沿, 经过一些修正, 由能谱得到热核的初始温度 T_{in} , 在考虑反应 Q 值和预平衡发射的修正之后, 可以得到不同 $\langle \text{LMT} \rangle$ 窗所对应的激发能. 实验结果表明, 在 $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}, ^{209}\text{Bi}$ 反应的中心碰撞中激发能分别为 4.2、2.4MeV/u, 而温度达 6.1、5.5MeV, 在半中心碰撞中激发能为 3.5、1.9MeV/u, 温度可达 5.8、4.8MeV.

关键词 热核, 核温度, 激发能.

1 引 言

热核的性质及形成的极限条件是重离子反应的重要研究方向之一. 大量的理论描述热核的性质已经预言, 在高激发能时, 会出现相位转移和核碎裂过程, 但随着激发能的升高, 实验上鉴别热核以及确定退激系统的激发能和核温度变得非常困难.

本实验采用裂变碎片角关联, 带电粒子、复杂碎片与关联裂变碎片再次关联的三重符合的办法鉴别来自热核的信息. 由分析裂变碎片之间的关联和带电粒子与碎片关联的数据, 得到线性动量转移和热核系统的表观温度.

* 国家自然科学基金资助.

2 实 验

实验是在中国科学院近代物理研究所 HIRFL 上完成的, 靶的束流斑点为 $6 \times 6\text{mm}^2$, 束流强度保持在大约 50nA, ^{nat}Ag 和 ^{209}Bi 靶的厚度约为 $1\text{mg}/\text{cm}^2$, 实验装置如图 1 所示.

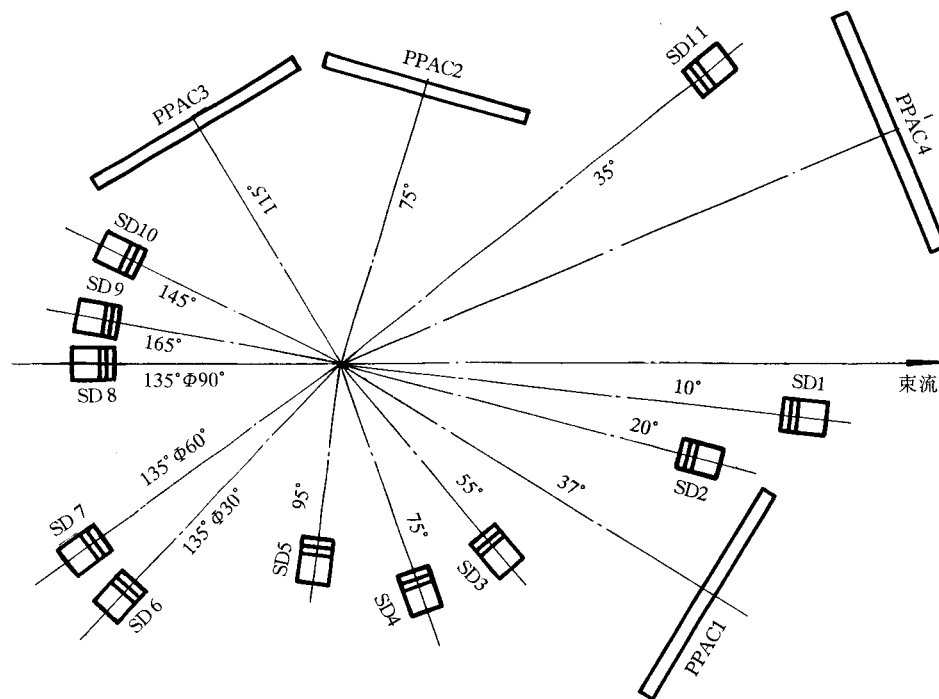


图 1 25MeV/u $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ 靶的实验装置图

主裂变碎片探测器 PPAC1 放置在 37° , 相关联的裂片探测器 PPAC2、PPAC3 (对 Bi 靶和 Ag 靶) 分别放置在 -75° 、 -115° 和 -40° 、 -60° . PPAC 的工作气压为 4.5mb. 11 组 $\Delta E-E$ 望远镜放置在靶室周围从 10° — 155° , 用来测量三重关联的轻粒子和复杂碎片, 它是由两片厚度为 $50\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ 的硅片和光二极管输出的 CsI(Tl) 晶体组成的, 另有 3 套 NaI 是用来测量反应中产生的 γ 射线, 可作为粒子飞行的时间起始信号. 每一组望远镜系统具有很好的能量分辨和质量分辨, 在实验中半导体硅片的能量采用 Thc' α 源和精密脉冲产生器来刻度, 刻度结果表明, 用标准源和用精密脉冲产生器刻度都吻合得很好, 误差小于 5%. 由于不同带电粒子在晶体中的能量响应是非线性的, CsI(Tl) 的刻度采用能损反推的方法, 即在 $\Delta E-E$ 双维谱上, 首先确定一事件对应的粒子种类, 然后找出该粒子在已知厚度的 Si 半导体中的能量损失 E_{loss} , 则由能损表或能损曲线可以得出入射粒子的总能量, 由此可以得出该粒子在 CsI(Tl) 中沉积的能量 $E_t = E_{\text{tot}} - E_{\text{loss}}$, 从而实现 CsI 闪烁体的能量刻度. 用此种方法得到的结果, 其误差主要来自半导体硅片的厚度, 总的来说, CsI 晶体的能量不确定性大约为 8%—10%. 裂片探测器 PPAC 的位置刻度对本次实验也是很重要的, 它的位置坐标是以本体坐标系为标准的, 为了数据处理的方便, 将

其转换到实验室坐标系中.

3 实验结果

3.1 碎片的角关联与系统的线性动量转移

图 2 给出了 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 和 ^{209}Bi 靶时裂变碎片的角关联分布, 由图中可以看到, 对 Ag 靶和 Bi 靶, 中心碰撞的最可几折叠角分别为 76° 和 115° , 所不同的是, Bi 靶存在着周边组份, 而 Ag 靶中的 $\theta_{\text{ff}} = 110^\circ$ 附近的小峰不是周边组份, 而是由于 PPAC1 和 PPAC2 之间有 5° 的死区造成的.

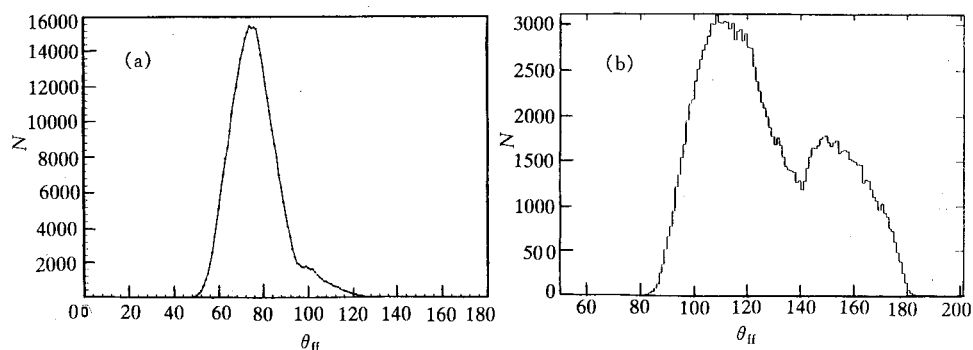


图 2 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 、 ^{209}Bi 靶产生的裂变碎片角关联分布

(a) $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$; (b) $^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}$.

由碎片角关联确定 LMT , 依据碎片的运动学, 可得裂变碎片的反冲速度为

$$v_{\text{cn}} = \frac{v_1 v_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{v_1 \sin\theta_1 + v_2 \sin\theta_2} \quad (1)$$

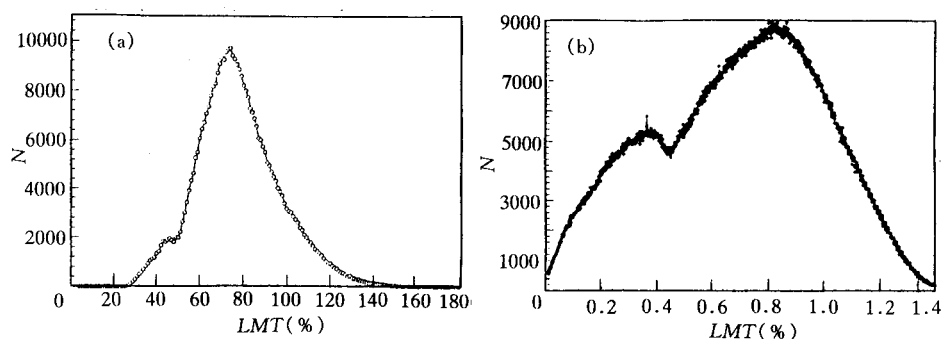
在本实验中, NaI 探测器给出的零信号的计数太少, 不能很好地给定碎片的速度, 假定反应中大部分裂片来自对称裂变, 两碎片质心系中的速度相等, v_{1c} 约为 1.2cm/ns , 有:

$$v_{\text{cn}} = \frac{v_{1c}}{\sqrt{1 + \frac{\sin^2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{4\sin\theta_2 \cos\theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}}} \quad (2)$$

线性动量转移为:

$$LMT = \frac{A_t}{A_p} \frac{v_{\text{cn}}}{(v_p - v_{\text{cn}})} \quad (3)$$

其中 A_p 、 A_t 分别表示弹核和靶核的质量数, v_p 是炮弹的速度, 图 3 中的 LMT 的分布呈高斯型, 对 Ag 靶和 Bi 靶最可几线性动量转移 $\langle LMT \rangle$ 分别为 0.76 和 0.8. Viola 线性动量转

图 3 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + \text{nat}\text{Ag}$, ^{209}Bi 靶产生的裂变碎片线性动量转移 LMT 分布(a) $^{40}\text{Ar} + \text{nat}\text{Ag}$; (b) $^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}$.移系统学研究给出的 $\langle LMT \rangle$ ^[1] 为

$$\langle LMT \rangle = 1.273 - 0.092\sqrt{E/A}. \quad (4)$$

对于 25MeV/u 的 ^{40}Ar 轰击不同靶, 上式计算值为 0.813, 与实验结果基本一致, 但比 Ag 靶的实验结果大. 对 Ag 靶, 由于气体探测器角关联的覆盖范围小, LMT 分布仅得到较大的中心碰撞部分, 而没有观察周边碰撞的组份, 是否存在周边碰撞部分, 有待于实验上进一步研究.

3.2 反应系统的温度 T 与激发能的提取

对于一个核温度为 T 的热源, 发射粒子的最小库仑位垒为 B_C , 轻粒子的发射能谱在源的静止质心系中呈 Maxwell 型分布, 源的表面发射满足于下式^[2]:

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} = \frac{N}{4\pi T^2} (E - B_C) \times \exp[-(E - B_C)/T], \quad (5)$$

体发射满足^[2]

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} = \frac{N}{2(\pi T)^{3/2}} (E - B_C)^{1/2} \times \exp[-(E - B_C)/T], \quad (6)$$

N 为归一化系数, E 是粒子在发射源框架下能量, 由于发射源的前平衡轻粒子是朝前发射, 而平衡后的蒸发是各向同性, 因此对发射源质心系而言, 探测器的位置接近 180° 所提取的温度为平衡后的温度. 在不同线性动量转移窗下用上述公式拟合能谱, 得到核温度参数 T , 由于热源的发射过程是统计的级联衰变过程, 而我们提取的表观温度 T_{app} 仅代表了级联过程的平均值, 为把能谱转移到

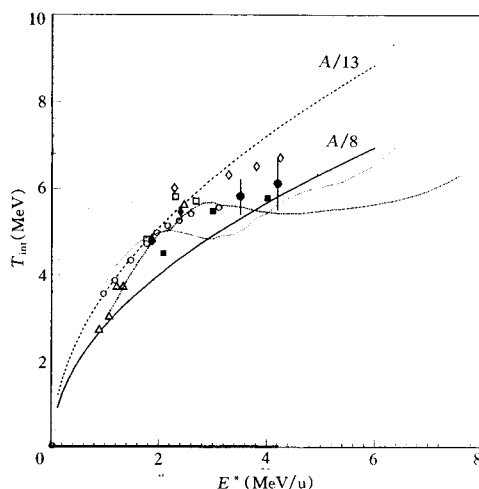


图 4 初始温度和激发能的关系

\triangle N + Sm; \diamond S + Ag; \square O + Ag; \circ Ar + Au;
 \bullet Ar + Ag(α); \blacksquare Ar + Ag(p); \blacklozenge Ar + Bi(α).
 - · - · Bondorf 计算的 $A = 100$ 的结果^[3];
 ····· Gross 计算的 Xe 核 ($A = 131$) 的结果^[4].

质心系中, 首先假定这些轻粒子来自关联两体碎片的发射(在数据处理过程中已证实), 拟合能谱得到表观温度 T_{app} , 而初始温度 $\langle T_{int} \rangle = (r_2 T_2 - r_1 T_1) / (r_2 - r_1)$, T_1 和 T_2 代表激发能为 E_1 和 E_2 时的表观温度, r_1 和 r_2 为所对应的多重性, 经过修正的温度 T_{int} 和表观温度 T_{app} 连同激发能一起给出在图 4 和表 1 中.

在 ICF 大质量转移框架中, 全熔合和非全熔合反应生成的类熔合核的激发能满足关系

$$E^* = \frac{m_t}{m_p + m_t / \langle LMT \rangle} E_{lab} + Q + E_{rod}, \quad (7)$$

m_t 和 m_p 分别为靶和弹的质量, Q 为反应 Q 值, E_{rod} 为类熔合核的转动能, 假定转移的核子数 $m_{tr} = \langle LMT \rangle \times m_p$, 则形成类熔合核 $m_{cn} = m_t + m_{tr}$, 在公式 (7) 中, 后两项的贡献较小, 若忽略不计时, 带来的误差小于 8%.

表1 25MeV/u Ar+Bi, Ag反应中的线性动量转移
 $\langle LMT \rangle$ 、热核的激发能和核温度

靶	LMT 窗	$E^*/u(\text{MeV})$	粒子	θ	$T_{app} (\text{MeV})$	$T_{int} (\text{MeV})$
Ag	0.50—0.75	3.5	α	95°	5.32 ± 0.36	5.81 ± 0.39
	0.50—0.75	3.5	α	115°	5.29 ± 0.48	5.78 ± 0.52
	0.75—1.00	4.2	α	95°	5.59 ± 0.55	6.10 ± 0.60
	0.75—1.00	4.2	α	115°	5.51 ± 0.47	6.02 ± 0.51
	0—0.33	2.1	p	95°	4.13 ± 0.39	4.51 ± 0.43
	0.33—0.66	3.0	p	95°	5.00 ± 0.31	5.48 ± 0.34
	0.66—1.00	4.02	p	95°	5.29 ± 0.23	5.78 ± 0.25
Bi	0.40—0.75	1.88	α	155°	4.34 ± 0.27	4.77 ± 0.29
	0.75—1.00	2.40	α	155°	4.96 ± 0.28	5.46 ± 0.30

4 讨 论

本工作的激发能和初始温度以实心点描述于图 4 中, 在图中还给出了 19.35MeV/u $^{14}\text{N}+^{154}\text{Sm}$ 的结果^[5]以及 30MeV/u ^{16}O 和 ^{32}S 轰击 ^{nat}Ag ^[6]、25MeV/u $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$ 的单核子激发能与初始温度的数据^[7]. 激发能与核温度是由能级密度参数联系起来的, 它由低能费米气体模型得到 $a = E^*/T^2$, 在 $E^* < 1\text{MeV}$ 时 $a = A/8$, 但是随着激发能的增加, a 值减小, 趋向于 $A/13$, 当激发能高于 3MeV 时, a 有增大的趋势, 逐步靠近 $A/8$. 由图中可以看出本实验给出的结果逐步接近 $A/8$, 实验得到的轻粒子能谱统计较低, 尤其是轻粒子能谱的高能端的计数, 致使我们不可能对轻粒子能谱根据不同的 LMT 分成足够多的块数, 因此造成得到的结果的平均效果较强, 给出的温度偏低. 另外, 激发能也来自两个不确定的因素: 一是在核中心碰撞中, 并不是所有激发能都转化为热激发能, 而与温度相关的仅是热激发能, 尽管我们对激发能进行了修正, 但带来了一定的不确定性. 二是前平衡粒子也带走相当部分的能量, 诸多的不定因素给我们的实验结果带来相当大的不确定性.

参 考 文 献

- [1] V. Z. Viola, *Phys. Rev.*, **C31**(1985)1550.
- [2] A. S. Goddhaber, *Phys. Rev.*, **C17**(1978)2247.
- [3] J. Bondorf *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A444**(1985)460.
- [4] D. Gross, *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986)1544.
- [5] K. Hagel *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A486**(1988)429.
- [6] D. Fabris *et al.*, *Phys. Lett.*, **B196**(1987)429.
- [7] Wu Heyu *et al.*, IMP Annual Report (1993)12.

Temperatures and Excitation Energies of Hot Nuclei in Reactions of $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$, ^{209}Bi at 25 MeV/u

Yin Shuzhi Jin Weiyang Zhang Chun Jin Genming Zheng Jiwen
Wu Enjiu Tan Jilian Li Zuyu Wang Sufang Song Mingtao
Wu Heyu He Zhiyong

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

Jiang Dongxing Qian Xing

(*Department of Technical Physics, Beijing University, Beijing 100871*)

Received 20 August 1996

Abstract

Coincidence measurements of fission fragment and light charged particle have been performed for the reactions of $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$, ^{209}Bi at $E/A=25\text{MeV}$ using 4 PPAC and 11 sets of $\Delta E-E$ telescopes. Angular correlations of fission fragment were plotted as a function of the folding angle between the two detected fission fragments. The linear momentum transfer distributions were derived by measuring angular correlations. The backward spectra of light particles detected in coincidence with fission fragments having different average $\langle LMT \rangle$ are analyzed with Maxwell distribution. After some corrections the initial temperatures of the hot nuclei are determined from the energy spectra. The excitation energies corresponding to the different average $\langle LMT \rangle$ are obtained considering the reaction Q values and pre-equilibrium emission. In the central collision of the $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$, ^{209}Bi reactions, excitation energies are measured to be about 4.2MeV/u , 2.4MeV/u and temperatures about 6.1MeV , 5.5MeV , respectively. In semi-central collision, excitation energies are measured to be about 3.5MeV/u , 1.9MeV/u and temperatures about 5.8MeV , 4.8MeV respectively.

Key words hot nuclei, nuclear temperature, excitation energy.