

$25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中热核的 激发能和核温度*

段利敏 王素芳 张保国 文万信 靳根明 郑纪文
贺智勇 李祖玉 谭继廉 肖志刚 王宏伟 吴和宇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用半导体望远镜探测器和 PPAC 对 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中的带电粒子和余核进行了关联测量. 对所得 α 粒子能谱用三源模型进行了拟合, 并由余核飞行时间和粒子多重性得到热核激发能. 通过对温度的修正, 发现在本实验中有激发能 E^*/A 为 4.3MeV , 温度 T_{init} 为 6.9MeV 的热核形成. 通过与其它实验结果的对比可以看出核物质在轻系统和重系统中行为的差异.

关键词 热核 核温度 激发能

1 引言

近年来, 国际上许多核物理实验室投入很大的精力对中高能重离子核反应形成的热核性质进行了研究. 一些核理论也得到发展, 并用来描述该激发能区的核物质性质^[1-3]. 在低激发能区, 核温度和激发能关系可以写成 $T = \sqrt{E^*/a}$, 能级参数 a 近似与激发能无关. 随着激发能的增加, 能级参数 a 随 E^* 而改变^[4]. 当激发能大于 3MeV/u 后, 许多实验显示出温度 T 与 E^* 的关系与 $T = \sqrt{E^*/a}$ (a 为常数) 有较大的偏离. 特别是文献 [5] 给出的 $\text{Au} + \text{Au}$ 反应中形成热核 (类炮弹源) 的温度 T 与激发能 E^* 的关系图, 似乎显示出该反应中液汽相变的存在. 但是对 $\text{Ar} + \text{Ni}$ 这一轻反应系统中形成的类炮弹源^[6] 的观察, 并没有发现预计的一级相变. 核物质的压缩、膨胀和转动等集体运动模式会将部分激发能转变为集体运动能, 使核内激发能降低, 这也会产生上述 T 与 E^* 的关系的偏离. 另外库仑排斥也会导致热核的不稳定与解离以及相应的极限核温度. 所有这些使得这一能区的热核性质变得极其复杂.

为了进一步认识热核激发能与核温度的关系, 本实验组对 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中带电粒子和余核进行了关联测量, 通过对 α 粒子能谱及余核飞行时间谱的分析, 相对独立地得到了类熔合核的温度和激发能.

1997-09-26收稿, 1998-03-21收修改稿

* 国家自然科学基金(19775054)资助

2 实验布局

实验是在近代物理研究所重离子回旋加速器(HIRFL)的大型通用散射室上完成的. 选用的束流为 25MeV/u ^{40}Ar , 靶为 ^{93}Nb , 厚度为 $612\mu\text{g}/\text{cm}^2$. 两块灵敏面积为 $25\text{cm} \times 20\text{cm}$ 的 PPAC 放置于束流两侧, $\theta = \pm 12.6^\circ$ 用来测量蒸发余核, 其中心距靶 73cm, 每块覆盖的角度为 $\Delta\theta = 15.6^\circ$. 6 套半导体望远镜对称地放置在后角 $\theta = \pm 110^\circ, \pm 133^\circ, \pm 156^\circ$, 与靶相距 10cm, 望远镜由厚度为 $30\mu\text{m}, 400\mu\text{m}, 400\mu\text{m}$ 3 层 Si 半导体组成, 可以清晰地对氢同位素进行鉴别, $Z \geq 2$ 的元素可以全阻止. 一个 13 单元的望远镜阵列中心角位于 $\theta = 30^\circ$, 距离靶 68cm, 它的每个单元由厚度 $200\mu\text{m}$ 的 Si 半导体和 5cm 厚的 BGO 晶体组成, 对于氢同位素以及所测量到的其它元素可以清楚地分开. 在 $\theta = 90^\circ$ 的平面内各放置了 2 套 $\phi 75 \times 100$ BGO 晶体探测器和 $\phi 100 \times 100$ NaI 晶体探测器, 用来测量热核巨共振的退激 γ 射线. 另外还有 9 套 $\phi 35$ NaI 晶体探测器放置于距离靶 8cm 处, 用于提供核反应的 γ 多重性. 实验中高频信号的时间分辨为 3ns, 用来作为测量余核飞行时间的起始信号.

3 数据分析

3.1 余核的鉴别

本实验组分析了 PPAC 与带电粒子探测器共同触发的符合事件, 各个角度的粒子能谱由两组望远镜提供, 而与此相关的余核信息由 PPAC 给出. 图 1 是用 PPAC 测量到的离子的飞行时间 (TOF) 与能量损失 (ΔE) 的散点图, 图中用折线围起来的部分是余核. 从 PPAC 几何位置来看, 它所能接收到的离子除余核外还有弹性散射离子和裂片, 但后两种离子在 PPAC 中的能损较小. 实验中选择较高的触发阈, 使得 $A \approx 40$ 的弹散离子及裂片不能触发 PPAC, 因此在散点图中看不到这一部分. 另外大部分裂片的飞行时间小于余核飞行时间, 只有线性动量转移 (LMT) $< 40\%$ 时产生的裂片, 其飞行时间才会和余核重叠, 但在此条件限制下的裂片截面远小于余核截面. 因此通过 PPAC 所测量到的散点图可以将余核鉴别出来, 并由飞行时间得出余核的速度 v_r .

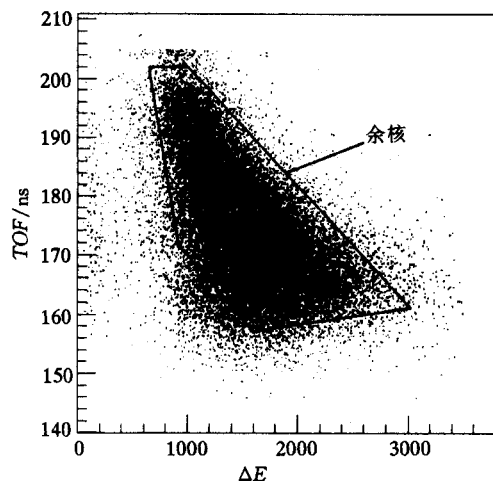
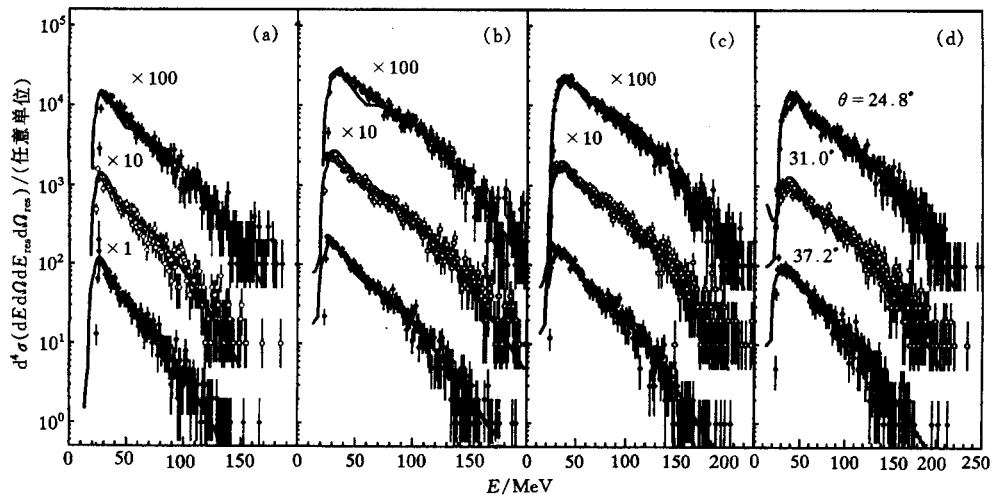


图1 PPAC测量到的余核飞行时间与能损散点图

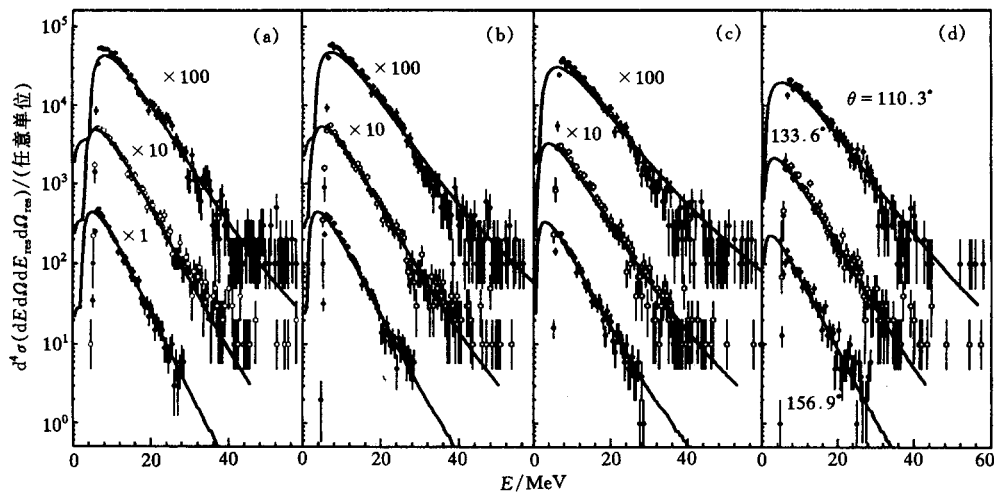
3.2 α 粒子能谱的拟合与发射源参数

图 2 和图 3 给出了中前角和后角两组望远镜测到的 α 粒子能谱. 通过对余核速度开

图 2 中前角 α 粒子能谱

探测器角度为 $\theta = 24.8^\circ, 31.0^\circ, 37.2^\circ$. 点为实验测量值, 实线为三源模型拟合值.

(a) $LMT = 54\%$; (b) $LMT = 71\%$; (c) $LMT = 86\%$; (d) $LMT = 100\%$.

图 3 后角 α 粒子能谱

探测器角度为 $\theta = 110.3^\circ, 133.6^\circ, 156.9^\circ$. 图(a—d)说明同图 2.

窗(为了得到较高的统计, 仅将余核速度分为 4 个区段), 我们得到了对应于 4 组 v_r 的 α 粒子能谱. 为了获得不同激发能下的发射源信息, 用三源模型对能谱进行了拟合.

在源静止坐标系中, 发射的轻粒子能谱采用面源发射公式为:

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} = \frac{N}{4\pi T^2} (E - E_C) \exp\{- (E - E_C) / T\}, \quad (1)$$

其中 T 为发射源温度, E_C 为发射粒子的库仑能. 利用关系式

表1 三源模型拟合 α 粒子能谱的发射源参数值

v_r/v_c	参数	类弹源	中速源	类熔合源
95%	<i>Mult</i>	0.1 ± 0.05	0.8 ± 0.2	3.2 ± 0.3
	β	0.98 ± 0.05	0.57 ± 0.04	0.29 ± 0.02
	<i>T/MeV</i>	5.0 ± 1.0	12.5 ± 0.5	5.8 ± 0.2
83%	<i>Mult</i>	0.1 ± 0.05	0.9 ± 0.2	2.6 ± 0.2
	β	0.98 ± 0.05	0.50 ± 0.04	0.25 ± 0.02
	<i>T/MeV</i>	5.0 ± 1.0	12.5 ± 0.5	5.5 ± 0.2
70%	<i>Mult</i>	0.05 ± 0.03	0.8 ± 0.2	1.8 ± 0.2
	β	0.98 ± 0.05	0.50 ± 0.04	0.21 ± 0.02
	<i>T/MeV</i>	4.7 ± 1.0	11.5 ± 0.5	5.0 ± 0.2
58%	<i>Mult</i>	0.03 ± 0.02	0.5 ± 0.1	1.3 ± 0.1
	β	0.98 ± 0.05	0.42 ± 0.04	0.17 ± 0.01
	<i>T/MeV</i>	4.6 ± 1.0	9.6 ± 0.5	4.6 ± 0.2

注: β 为发射源速度与弹核速度之比, v_r/v_c 为余核速度与反应系统质心速度之比. α 粒子的库仑位垒 E_c 对所有发射源都假定为 10MeV.

$$\left[\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} \right]_{\text{lab}} = \left[\frac{E_{\text{lab}}}{E'} \right]^{1/2} \left[\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} \right]_{E=E'} \quad (2)$$

将能谱由静止坐标系转变为实验室坐标系. 这里

$$E' = E_{\text{lab}} + E_s - 2(E_{\text{lab}}E_s)^{1/2}\cos\theta, \quad (3)$$

式中, E_{lab} 是粒子实验室系动能, E_s 是粒子以源速度运动时所具有的能量, θ 为源运动方向与粒子观测方向的夹角.

本实验组采用的三组源为: 类弹源, 它的速度接近弹核, 温度较低; 中速源, 速度约为弹核的一半, 温度很高; 类熔合源, 速度较慢, 温度较高. 表 1 给出了拟合 α 能谱得到的对应于不同 v_r 窗的发射源参数, 其中类熔合源的速度是由 v_r 求平均得到的. 对于后角能谱, 类弹源的贡献可以忽略. 图 2 和图 3 中的实线是表 1 参数所对应的拟合结果.

3.3 热核激发能

本工作感兴趣的热核为类熔合核. 它的形成可以看作是经历了两个阶段: 弹核与靶核相碰后, 它的一部分与靶核形成一个非平衡的复合核体系, 另外一部分则以接近弹核的速度飞离; 弹核与靶核相碰撞后会形成一个局部的热斑, 非平衡的复合核体系在向平衡过渡时会产生前平衡发射, 最终形成一个热平衡的类熔合核. 相应于此, 在我们的三源模型中, 类弹源对应于弹靶碰撞后飞离的部分弹核, 类熔合源对应于热平衡后的类熔合核, 而中速源则用来描述非平衡系统的前平衡发射. 同样基于这种对热核形成过程的认识, 我们在随后确定其激发能时也分为两步: 首先确定出碰撞发生后非平衡复合核体系中沉积的总激发能; 其次确定出前平衡发射粒子带走的能量. 最终的激发能由这两部分能量之差来定出.

非平衡复合核体系的质量、速度和激发能与 LMT 的关系为:

$$A_i = A_t + A_p \cdot LMT, \quad (4)$$

$$v_1 = p_p \cdot LMT / (A_t + LMT \cdot A_p), \quad (5)$$

$$E_1 = \frac{A_t E_p}{A_p + A_t / LMT} + Q_1, \quad (6)$$

其中 E_p, p_p 为弹核在实验室系中的能量和动量, A_t, A_p 为靶核与弹核的质量数, Q_1 为反应能. 经过前平衡发射后, 类熔合核的质量、速度和激发能为:

$$A_{cn} = A_1 - \sum_i (M^i - A^i)_{int}, \quad (7)$$

$$v_{cn} = \frac{A_1 v_1 \sum_i (M^i A^i)_{int} V_{int}^i}{A_1 \sum_i (M^i A^i)_{int}}, \quad (8)$$

$$E_{cn} = E_1 - \sum_i (M^i \langle E^i \rangle)_{int} + \frac{1}{2} m_0 (A_1 v_1^2 - A_{cn} v_{cn}^2) + Q_2. \quad (9)$$

由于在三源模型中我们用中速源来描述前平衡粒子的发射, 因此以上求和是对中速源放出的各类粒子进行的. M^i 为粒子多重性, A^i 为粒子质量数, V_{int}^i 为中速源速度, $\langle E^i \rangle$ 为粒子的平均动能, Q_2 为反应能. 由于 $A > 4$ 的粒子的多重性较低, 实际计算中的求和只对 α 、p、d、t、n 5 种粒子进行. α 粒子的多重性和发射源参数在表 2 中给出. 对 p、d、t 同样的能谱也用三源模型进行了拟合, 得到其多重性和发射源参数, 并假设中子发射源参数与 p 相同, n、p 多重性之比等于整个系统的 N/Z .

类熔合核发射一个 α 粒子后, 剩余子核的质量数 $A_{cn}^\alpha = A_{cn} - 4$, 激发能为

$$E_{cn}^\alpha = E_{cn} - S_\alpha - \langle E_\alpha \rangle - \hbar^2 J^2 / 2I, \quad (10)$$

其中 S_α 是 α 粒子分离能, $\langle E_\alpha \rangle$ 是质心系中 α 平均动能, 在此取 $\langle E_\alpha \rangle = 2T + E_C$, T 为发射 α 粒子的核温度, 最后一项为子复合核转动能, 随着 v_r 的增加而减少, 在此取 8—12 MeV. 由以上关系式得到的对应于不同 v_r 窗的激发能在表 2 中给出.

表2 对应于不同 v_r 窗下的热核激发能及核温度

v_r / v_c	LMT	E_1 / MeV	E_{cn} / MeV	A_1	A_{cn}	$(E_{cn}^\alpha / A_{cn}^\alpha) / \text{MeV} \cdot \text{u}^{-1}$	\bar{T} / MeV	M_α	T_{int} / MeV
95%	100%	655	543	133	126	4.3 ± 0.2	5.8 ± 0.2	3.2 ± 0.3	6.9 ± 0.6
83%	84%	584	468	127	119	3.7 ± 0.2	5.5 ± 0.2	2.6 ± 0.3	6.5 ± 0.5
70%	69%	508	400	121	113	3.3 ± 0.2	5.0 ± 0.2	1.8 ± 0.2	6.0 ± 0.5
58%	53%	412	340	114	110	2.8 ± 0.2	4.6 ± 0.2	1.3 ± 0.1	5.4 ± 0.5

3.4 热核温度

由 α 粒子提取的对应于不同激发能的类熔合核温度在表 1 中给出. 在本激发能区, 多重碎裂所占比例很小, 轻粒子主要以级联方式蒸发, 即系统在一次蒸发后会重新达到平衡, 下一次粒子发射是在系统重新平衡后进行的. 这样由粒子能谱得到的量并不是平衡系统的初始信息, 而只是该量在整个级联蒸发链上的加权平均值, 这就说明表 1 中由类熔合源发射的 α 粒子能谱的拟合得到核温度只给出了对应于不同激发能下热核温度的平均值, 还需要将平均温度进一步转变为粒子发射之初的热核温度. 利用表 1 中给出的类熔

合源发射的 α 粒子的多重性 M , 可以求出热核的初始温度 T_{init} , 关系式为^[7]:

$$T_{\text{init}} = \frac{M_1 \bar{T}_1 - M_2 \bar{T}_2}{M_1 - M_2}, \quad (11)$$

式中 \bar{T}_1 和 \bar{T}_2 是两相邻激发能区($E_1^* > E_2^*$)所对应的 α 粒子能谱拟合温度, M_1 和 M_2 分别对应于这两个激发能下的 α 粒子多重性(类熔合源). 利用此关系式, 在表 2 中给出了达到热平衡时类熔合核的初始温度 T_{init} .

4 结果讨论

本实验所得到的激发能和核温度的关系由图 4 给出. 作为对比, 该图还给出了不同反应系统的一些实验结果. 由于温度的提取依赖于所采用的方法, 在此只选用了与我们提取方法相似的一些实验结果. 从图中可以看出此系统, 当激发能由 2.8MeV/u 增加到 4.3MeV/u 时, 核温度由 5.4MeV 增加到约 6.9MeV. 从图中还可以看到, 轻系统与重系统表现出来的一些差异. 在 Ar + Au 反应中^[8], 激发能大于 2MeV 后, 温度增加变缓, 在 3MeV 时温度有饱和的迹象. 文献 [5] 中给出, 在 Au + Au 反应中激发能达到 3MeV 时, 温度已经饱和, 到 9MeV 后温度重新上升. 对比于轻系统, 如本实验的 Ar + Nb 及 S + Ag 反应^[7], 激发能直到 4.4MeV, 其热核温度并没有显示出坪特性而是达到较高的核温度, 这一温度远高于相同激发能下的重系统. 这些差异可能来源与它们所受库仑力的不同以及激发能在核物质中的沉积方式的不同. 另外在这一激发能区, 中等质量碎片发射以及多重碎裂的产生也与激发能的沉积方式及核温度有关, 因此进一步的与重系统的对比实验以及包括多种反应机制的实验, 有利于我们更详细地了解处于高激发能下的核物质特性.

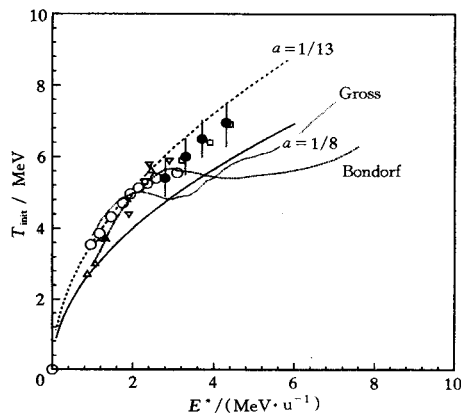


图 4 不同反应系统的核温度与激发能关系

Δ N + Sm, ∇ O + Ag, \circ Ar + Au,
 \square S + Ag, \bullet Ar + Nb.

参 考 文 献

- [1] Bonche P, Levit S, Vautherin D. Nucl. Phys., 1985, A436:265—293
- [2] Gross D H E. Prog Part. Nucl. Phys., 1993, 30:155—167
- [3] Bondorf J B et al. Nucl Phys., 1995, A444:460—476
- [4] Hagel K et al. Nucl. Phys., 1998, A486:429—455
- [5] Pochodzalla J et al. Phys. Rev. Lett., 1995, 75:1040—1043
- [6] Ma Y G, Siwek A, Peter J et al. Phys. Lett., 1997, B390:41—48
- [7] Wada R, Fabris D, Hagel K et al. Phys. Rev., 1989, C39:497—515
- [8] Wu H Y, Jin G M, Li Z Y et al. Nuc. Phys., 1997, A617:385—394

**Excitation Energy and Temperature of Hot Nuclei
in the Reaction of 25 MeV / u $^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ ***

Duan Limin Wang Sufang Zhang Baoguo Wen Wanxin Jin Genming
Zheng Jiwen He Zhiyong Li Zuyu Tan Jilian Xiao Zhigang
Wang Hongwei Wu Heyu

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

Abstract The charged particles and residues were correlatively measured by telescopes and PPACs in the reaction of $^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ at incident energy of 25 MeV / u. Energy spectra of α particles were fitted by three moving sources and the excitation energy of hot nuclei were determined by the TOF of residues and particle multiplicity. Abstracted temperature was correlated thoroughly and the results show that hot nuclei with excitation energy $E^*/A \approx 4.3\text{MeV}$ and temperature $T_{\text{init}} \approx 6.9\text{MeV}$ were formed in the reaction. The behavior of nuclear matter in various systems was compared and the difference can be seen in the light and heavy reaction system.

Key words hot nuclei, nuclei temperature, excitation energy

Received 26 September 1997, Revised 21 March 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19775054)