

35MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中复合核的激发能与温度*

段利敏 吴和宇 靳根明 王素芳 李祖玉 魏志勇 张保国
王宏伟 肖志刚 柳永英 胡佩钢 卢朝晖 田文栋 苟全补

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用大面积位置灵敏气体探测器对 35MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中形成的裂片进行了符合测量, 由此得到了裂变复合核的速度分布. 在大质量转移假设下扣除前平衡发射粒子的影响, 得到复合核的激发能. 另外利用望远镜探测器对反应中出射的轻带电粒子也进行了符合测量, 并由后角 α , p, d, t 的能谱提取了复合核的温度. 温度与激发能的关系没有表现出理论预言的相变特征.

关键词 复合核 核温度 激发能

1 引言

核温度与激发能的关系一直是中能重离子碰撞研究的重要内容, 对它的研究可以帮助我们认识极端条件下核物质的性质. 近十多年来国内外的一些核物理实验室都投入很大的精力对其进行研究, 一些核理论也进一步发展并用来描述处于高激发态的复合核性质, 预言了核物质液气相变的存在^[1-4]. 文献[5]中利用 He/Li 双同位素产额比的方法提取了 600MeV/u $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 反应中类弹核的核温度, 在单核子激发能 3—10MeV 的区域, 温度基本保持在 5MeV, 温度随激发能的变化显示出了一些相变的特性. 但在 52—95MeV/u $^{36}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$ 的反应中^[6] 温度则随着激发能的增加而一直在增加, 没有显示出与文献[4]类似的特征. 这种差异有可能来源于激发核核子数的不同. 对于原子核这样一个由相对较少核子构成的系统, 相变是否发生以及相变所表现出来的特征应当是与核子数相关的. 另外, 边馈效应^[7], 即处于激发态的粒子的二次发射, 也会对温度的提取带来很大的影响, 特别是在激发能较高的情况下, 激发态粒子的发射几率大大增强, 它甚至可以改变温度的变化趋势^[8]. 基于以上情况, 更多以及更精确的实验数据有助于我们对这一问题的清楚认识.

本文对 35MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中形成的复合核的两个裂变碎片以及发射的轻带电粒子进行了符合测量, 相对独立地得到了复合核的激发能以及在不同激发能下的温度.

2 实验布局

实验是在兰州近代物理研究所重离子回旋加速器(HIRFL)的通用散射室上完成的. 所用束流为 35MeV/u ^{40}Ar , 束流强度为 1—2pnA, 自支撑的 ^{197}Au 靶厚度为 600 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. 6 块双向位置分辨都为 4mm, 灵敏面积为 25cm \times 20cm 的平行板雪崩计数器(PPAC)放置在靶周围用来测量裂变碎片, 探测器中心距到靶的距离为 27cm, 中心角度 (θ, φ) 分别为 $(130^\circ, 0^\circ), (130^\circ, 180^\circ), (50^\circ, 0^\circ), (50^\circ, 90^\circ), (50^\circ, 180^\circ), (50^\circ, 270^\circ)$ (z 轴沿束流方向). 在 $\theta = 9^\circ, 15^\circ$ 的两个环形区域各放置了 6 套望远镜探测器, 每个望远镜由 100 μm 厚的 Si 与 5cm 厚的 BGO 晶体组成, 用来测量类弹碎片与中等质量碎片, 它可以鉴别出 $Z = 2—18$ 的粒子. 在 $\theta = 44^\circ—158^\circ$ 的位置放置了 6 套望远镜探测器, 用来测量中后角发射的带电粒子, 其中 $\theta = 80^\circ, 127^\circ, 158^\circ$ 的 3 套望远镜是由 Si (50 μm), Si (400 μm), CsI (5cm) 3 层探测器组成, 它可以鉴别出

2002-03-11 收稿

* 中国科学院百人计划, 国家自然科学基金(10175081)和国家重点研究发展规划基金(G2000077401)资助

Z = 1—4 的同位素, $\theta = 44^\circ, 59^\circ, 155^\circ$ 的 3 套望远镜是由 Si(50 μ m) 与 CsI(5cm) 探测器组成, 它可以鉴别出 Z < 10 的元素. CsI 的信号由光二极管读出, 与光电倍增管相比它大大提高了信号长时间工作的稳定性^[9].

3 复合核激发能

为了得到复合核激发能与温度的关系, 我们对复合核的裂变碎片与发射的轻带电粒子进行了符合测量. 利用加速器的高频信号作为反应发生的起始时间, 由 PPAC 给出的时间以及位置信号就可以得到裂片的速度矢量. 假设复合核的运动方向与入射束流相同, 就可以计算出复合核的速度. 最后需要对轻粒子的反冲效应给予修正. 图 1(a) 给出了修正后的与 $\theta = 158^\circ$ 的轻带电粒子符合的复合核速度分布. 竖线对应于 V_{cn} 窗的边界值, 这些窗作为计算复合核的激发能与温度的限制条件.

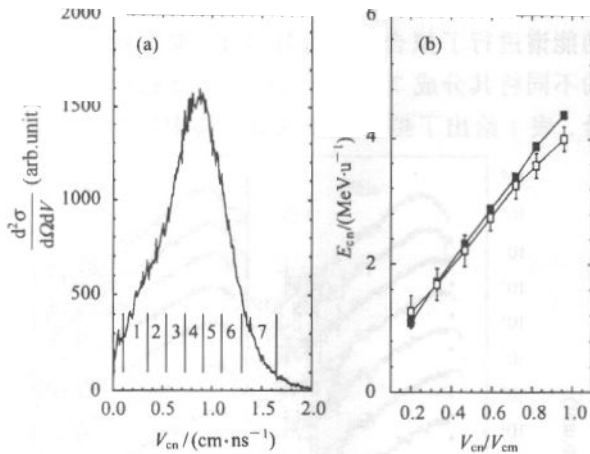


图 1 (a) 与后角轻粒子关联的复合核速度分布; (b) 复合核激发能与其速度的关系

■ 未修正的值, □ 考虑了前平衡粒子发射修正后的值.

由复合核的速度可以计算出复合核的激发能. 我们引入大质量转移假设, 即弹核与靶核碰撞后, 弹核的一部分转移到靶核中, 与靶核形成复合核, 而弹核的剩余部分以入射速度飞离. 由这一假设就能够得到以下关系式:

$$A_1 = A_t + A_p \cdot lmt, \quad (1)$$

$$V_1 = P_p \cdot lmt / (A_t + A_p \cdot lmt), \quad (2)$$

$$E_1 = \frac{A_t E_p}{A_p + A_t / lmt} + Q_1, \quad (3)$$

其中 E_p, P_p 为弹核的总能量和总动量, lmt 为线形动量转移, A_1, V_1, E_1 分别表示复合核的质量数、运

动速度和激发能. 图 1(b) 中的实心点给出了由以上方法计算得到前平衡粒子发射后的复合核激发能 E_{cn} 随其速度 V_{cn} 的变化关系.

弹核将部分核子转移到靶核, 在这个复合系统达到平衡之前, 会有部分的粒子发射出来, 即前平衡发射, 此后, 复合核的质量、速度和激发能变为:

$$A_{cn} = A_1 - \sum_i (M^i A^i)_{int}, \quad (4)$$

$$V_{cn} = \frac{A_1 V_1 - \sum_i (M^i A^i)_{int} V_{int}^i}{A_1 - \sum_i (M^i A^i)_{int}}, \quad (5)$$

$$E_{cn} = E_1 - \sum_i (M^i \langle E^i \rangle)_{int} + \frac{1}{2} m_0 (A_1 V_1^2 - A_{cn} V_{cn}^2) + Q_2, \quad (6)$$

以上各式中求和是对中速源放出的各类粒子进行的, 其中 M^i 为粒子多重性, A^i 为粒子质量数, V_{int}^i 为发射源速度, $\langle E^i \rangle$ 为粒子的平均动能. 定义 $A_{pre} = \sum_i (M^i A^i)_{int}$ 为发射源发射粒子的总质量数, $M_{pre} = \sum_i (M^i)_{int}$ 为发射源发射粒子的总多重性.

在文献[10, 11]中, 证实发射源发射粒子的能量分布符合 Maxwell 体发射的分布. 考虑发射源速度, 在实验室系下发射粒子的平均动能为

$$\langle E^i \rangle = \frac{1}{2} A^i m_0 V_{int}^2 + \frac{3}{2} T^i + E_c^i, \quad (7)$$

m_0 是核子质量, E_c^i 是源发射粒子的库仑位垒, 由于发射源的质量较低, 库仑位垒会降得较低, 在以后的公式推导以及计算中, 我们将 E_c^i 忽略.

在费米能区核碰撞中, 实验数据^[12, 13]显示出, 中速源的速度约为入射弹核速度的 1/2, 单核子的激发能约为入射弹核能量的 1/4. 碰撞区域所具有的温度 $T_{int} = \sqrt{E^* / a}$, E^* 为单核子激发能, 取能级密度参数 $a = 1/9 - 1/13 \text{ MeV}^{-1}$, 在我们的入射能量下得到的温度为 $T_{int} = 9 - 11 \text{ MeV}$, 这一数值与实验提取出的中速源的温度^[12-14]相符合. 在以后计算中我们选定 $T_{int} = 10 \text{ MeV}$.

在计算 A_{pre} 与 M_{pre} 的求和式中, 由于 $A > 4$ 的粒子的多重性较低, 求和可以只对 ^4He 以及比其轻的粒子进行. 在文献[12]中, 提取了入射能量为 30MeV/u 的 ³²S + ^{nat}Ag 及 ¹⁶O + ^{nat}Ag 反应中源发射的 p, d, t, α 的多重性, 在假定源发射的中子与质子数之比等于系统的中子与质子比后, 可以定出中子的多重性, 对这 5 种粒子积分后, 就确定出 A_{pre} 和 M_{pre} . 图 2 给出了该文献中的两个反应系统的 A_{pre} 及其与

V_{cn} 的关系. 我们对 $^{32}\text{S} + ^{nat}\text{Ag}$ 反应系统的实验点进行了拟合, 实线是拟合的结果, 点线是拟合函数乘以 $1/2$ 后得到的. 可以看到 $^{16}\text{O} + ^{nat}\text{Ag}$ 反应系统的 A_{pre} 分布基本与点线相符合, 这样我们就能够得到前平衡发射带走的粒子质量数 A_{pre} 与入射弹核的质量数 (基本) 成正比, 它与 V_{cn} 的关系相同, 而与弹核无关. 作为以上结论的外推, 在 35MeV/u 的 ^{40}Ar 引起的反应中, 我们用到了这一结论. 图 2 中的虚线是 ^{32}S 反应系统的拟合函数乘以 $40/32$ 得到的, 我们用这个函数来给出由 ^{40}Ar 引起的反应中 A_{pre} 的大小及其与 V_{cn} 的关系.

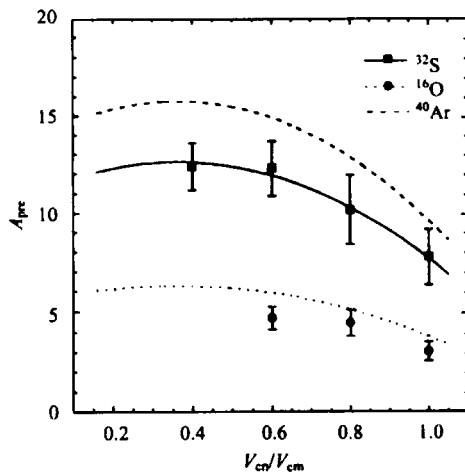


图 2 前平衡发射带走的粒子质量数与复合核速度以及入射粒子的关系
详细说明见正文.

利用该文献, 还可以得到 A_{pre} 与 M_{pre} 的比值, 在 $V_{cn}/V_{cm} = 100\%$ 时, $A_{pre}/M_{pre} = 1.7$, 这一比值随着 V_{cn} 的减小而增加, 在 $V_{cn}/V_{cm} = 40\%$ 时, $A_{pre}/M_{pre} = 2.1$. 我们也利用这一组比例关系来计算 M_{pre} .

通过以上的分析确定出 V_{in} , T_{in} , A_{pre} , M_{pre} 4 个量, 这样就可以对方程(1)–(7)联立进行求解. 图 1 (b) 中的空心点给出了由以上方法修正后得到的激发能.

4 温度的提取

在中能核碰撞中, 粒子发射源可以分成 3 个部分: 慢速源、中速源、高速源. 其中慢速源为我们研究的弹靶非完全融合形成的复合核. 由于反冲效应, 高速源与中速源发射的粒子主要集中在中角与前角区, 在后角区的截面较小, 因此在提取复合核的温度时, 采用放置于 $\theta = 158^\circ$ 的一套望远镜探测器的

轻粒子能谱, 以此来减小其它发射源对它的影响.

为保证这两个裂片来源于一次两体裂变, 限制反应平面角为 $-30^\circ < \Delta\varphi < 30^\circ$, 相对速度为 $1.5 < V_r < 3.5 (\text{cm/ns})$. 另外为了减小裂后粒子发射的影响^[15], 对裂变质量非对称性限制为: $-0.4 < \eta < 0.4$, 其中 $\eta = (A_n - A_d)/(A_n + A_d)$. 作出以上限制后, 对与其关联的后角轻粒子能谱进行拟合, 所用的公式为 Maxwell 面源发射公式

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} = \frac{N}{4\pi T^2} (E - E_c) \exp\left[-(E - E_c)/T\right], \quad (8)$$

其中 T 为发射源温度, E_c 为发射粒子的库仑能. 由质心坐标系转变为实验室系坐标利用关系式

$$\left[\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}\right]_{\text{lab}} = \left[\frac{E_{\text{lab}}}{E}\right]^{1/2} \left[\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}\right]_{\text{c.m.}}, \quad (9)$$

这里 $E = E_{\text{lab}} + E_s - 2(E_{\text{lab}} E_s)^{1/2} \cos\theta$. 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 为发射源运动方向与粒子观测方向的夹角.

利用这一关系式对 $\theta = 158^\circ$ 测量到的 p, d, t, α 的能谱进行了拟合. 对每种粒子, 按其复合核速度的不同将其分成 7 个部分, 对每部分都分别进行拟合. 表 1 给出了拟合温度参数. 其中发射源的速度

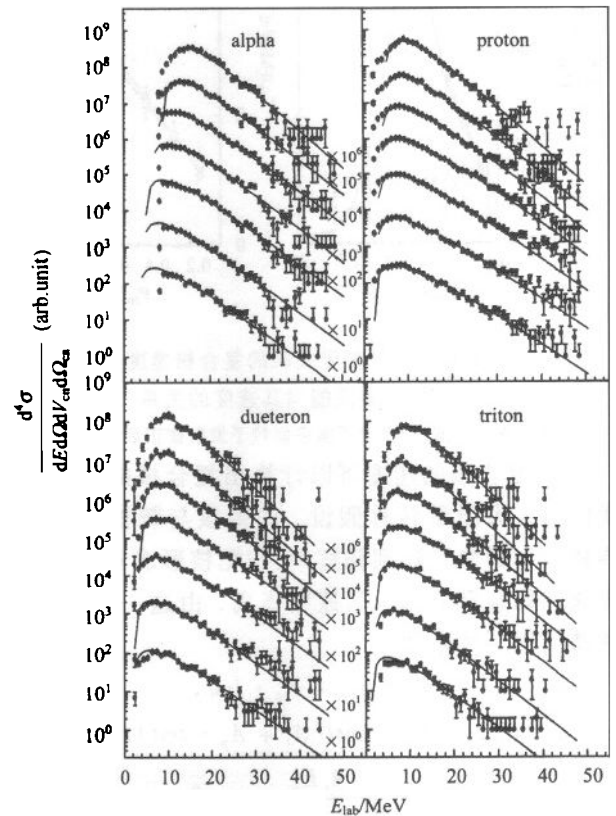


图 3 $\theta = 158^\circ$ 的轻带电粒子在不同 V_{cm} 条件下的能谱以及拟合结果

V_n 是对 V_{cn} 的每个窗求平均得到的, 只有 V_{cn} 最高的 7 号窗将其固定在全融合核速度的 93%, 以满足前平衡粒子发射带走系统总动量的要求. 对粒子发射的库仑位垒, 忽略它与激发能的联系, 对所有 V_{cn} 的窗固定为同一个值, α, p, d, t 的库仑位垒分别为 13.5, 6.0, 7.0 和 7.5 MeV. 图 3 分别给出了 4 种粒子的拟合结果, 每个图中由高到低的 7 组数据对应于 V_{cn} 由低到高的各个窗.

表 1 后角轻粒子能谱的温度拟合参数

V_{cn}/V_{cm}	T_α/MeV	T_p/MeV	T_d/MeV	T_t/MeV
22 %	3.78 ± 0.15	3.66 ± 0.15	3.61 ± 0.15	3.52 ± 0.20
33 %	4.27 ± 0.15	4.00 ± 0.15	4.05 ± 0.15	3.88 ± 0.20
46 %	4.61 ± 0.15	4.37 ± 0.15	4.49 ± 0.15	4.38 ± 0.20
59 %	4.78 ± 0.15	4.76 ± 0.15	4.95 ± 0.15	4.96 ± 0.20
72 %	5.22 ± 0.20	4.98 ± 0.20	5.23 ± 0.25	5.22 ± 0.25
81 %	5.30 ± 0.20	5.29 ± 0.20	5.30 ± 0.25	5.21 ± 0.25
93 %	5.60 ± 0.20	5.52 ± 0.20	5.64 ± 0.25	5.51 ± 0.25

5 蒸发粒子的多重性与初始温度的修正

通过对粒子发射时间的研究显示, 在我们研究的碰撞能区, 复合核的轻粒子发射是以级联衰变 ($\tau > 200\text{fm}/c$) 的方式进行的, 多重碎裂 ($\tau \approx 50\text{fm}/c$) 的出射道并未开放或者所占的比例较小^[16,17]. 这样复合核的激发能被发射的粒子所带走, 温度也在逐渐降低, 直到激发能低于粒子发射所需要的能量或者复合核发生裂变. 在这种情况下, 我们测量到的粒子包含了整个衰变链所发射出的粒子, 提取出的温度则是这个衰变链的平均温度. 考虑这一因素后, 可以推导复合核的初始温度与平均温度的关系:

$$\frac{1}{2}(T_1^{\text{int}} + T_2^{\text{int}}) = \frac{M_1 \bar{T}_1 - M_2 \bar{T}_2}{(M_1 - M_2)} + \frac{M_1 \bar{E}_{c_1} - M_2 \bar{E}_{c_2} - (M_1 - M_2) \cdot [(E_{c_1}^{\text{int}} + E_{c_2}^{\text{int}})/2]}{2(M_1 - M_2)}, \quad (10)$$

其中 $T_1^{\text{int}}, T_2^{\text{int}}$ 为发射源的初始温度, \bar{T}_1, \bar{T}_2 为平均温度, $E_{c_1}^{\text{int}}, E_{c_2}^{\text{int}}$ 为初始的库仑位垒, $\bar{E}_{c_1}, \bar{E}_{c_2}$ 为平均位垒.

忽略库仑位垒的差别, 由(10)式就可以计算出复合核的初始核温度. 为了减小实验误差的影响, 在代入平均温度与多重性之前, 首先对这两个量进行拟合, 以得到一条光滑的、随复合核激发能而改变的函数, 然后以函数值代替实验值代入公式中计算初始温度. 图 4 给出了 α, p, d, t 的平均温度以及多重性^[9] 的实验值和拟合曲线.

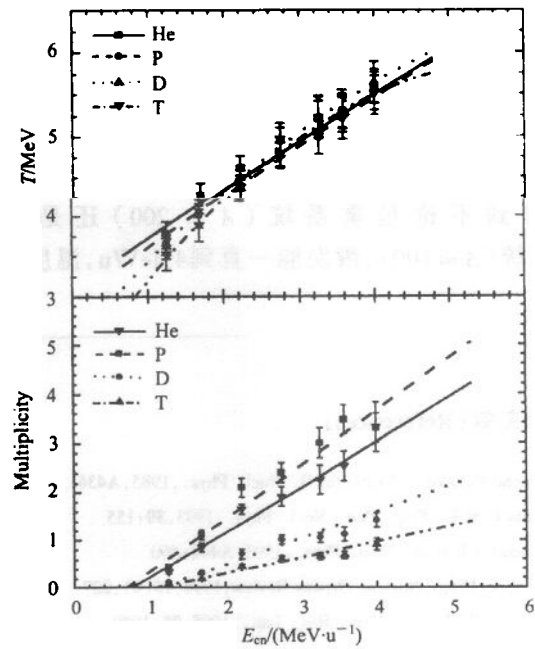


图 4 α, p, d, t 4 种粒子的平均温度和多重性随复合核激发能的变化关系

表 2 给出了由以上方法计算得到的各种粒子的初始温度. 另外表中还给出了复合核的质量数、单核子激发能以及平均温度. 在确定复合核的热激发能时, 我们在总激发能中减去 10—20 MeV 的集体转动能, 这相当于 20—30 \hbar 的角动量.

表 2 复合核发射粒子时的激发能和初始核温度

$E_{cn}/(\text{MeV} \cdot \text{u}^{-1})$	A_{cn}	T_α/MeV	T_p/MeV	T_d/MeV	T_t/MeV	T_{av}/MeV
1.25	197	4.19 ± 0.3	4.19 ± 0.3	3.8 ± 0.3	3.72 ± 0.3	3.97 ± 0.3
1.68	200	4.72 ± 0.3	4.67 ± 0.3	4.54 ± 0.3	4.47 ± 0.3	4.60 ± 0.3
2.21	205	5.35 ± 0.3	5.40 ± 0.3	5.33 ± 0.4	5.41 ± 0.4	5.37 ± 0.4
2.74	210	5.95 ± 0.3	5.95 ± 0.3	6.01 ± 0.4	5.96 ± 0.4	5.97 ± 0.4
	216	6.51 ± 0.4	6.58 ± 0.4	6.53 ± 0.5	6.48 ± 0.5	6.52 ± 0.5
	220	6.85 ± 0.4	6.85 ± 0.4	6.79 ± 0.5	6.54 ± 0.5	6.76 ± 0.5
4.00	227	7.29 ± 0.5	7.36 ± 0.5	7.10 ± 0.6	6.78 ± 0.6	7.13 ± 0.6

6 结果与讨论

由表 2 的温度数据可以看出,由不同质量数的粒子得到的温度基本一致,这说明在该入射能下,复合核的形成没有经历明显的压缩与膨胀过程.如果膨胀能比较明显,它就会改变发射粒子能谱形状,破坏温度的一致性.

图 5 中给出了在各个激发能下由 4 种粒子求平均后得到的初始核温度.另外图中还标出了由 ^{40}Ar 引起的反应中,在其它的人射能与靶系统下形成的复合核的温度与激发能的关系,包括 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}^{[18]}$ 和 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}^{[14]}$.其它一些实验的结果也在图中给出,包括 $30\text{MeV/u } ^{32}\text{S} + \text{Ag}$ 与 $30\text{MeV/u } ^{16}\text{O} + \text{Ag}^{[12]}$, 19MeV/u 与 $35\text{MeV/u } ^{14}\text{N} + ^{154}\text{Sm}^{[19,20]}$.以上的数据都是由拟合能谱的方法提取的温度.可以看到不论是重系统 ($A \approx 200$) 还是较轻的系统 ($A \approx 100$),激发能一直到 4MeV/u ,温度依然

在上升,还没有显示出相变的特征

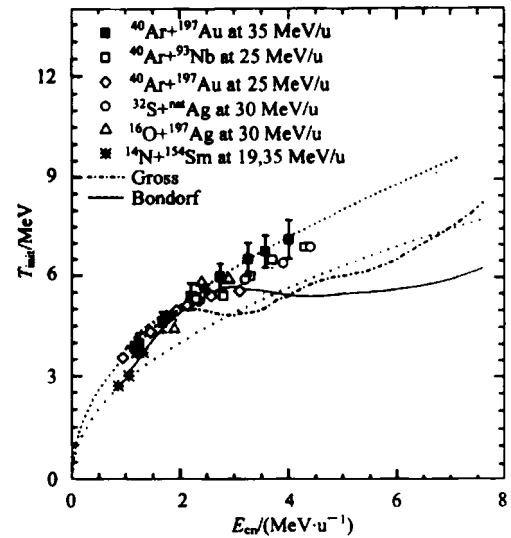


图 5 不同反应系统的初始核温度随复合核激发能变化的关系

参考文献 (References)

- Bonche P, Levit S, Vautherin D. Nucl. Phys., 1985, **A436**:265
- Gross D H E. Prog. Part. Nucl. Phys., 1993, **30**:155
- Bondorf J B et al. Nucl. Phys., 1995, **A444**:460
- JIN Gen-Ming. Nuclear Physics Review, 1998, **15**(4):227
- Pochodzalla J et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:1040
- MA Y G, Siwek A, Peter J et al. Phys. Lett., 1997, **B390**:41
- DUAN Li-Min, LI Zu-Yu, JIN Gen-Ming et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1995, **19**:215
- Siwek A, Durand D, Gulminelli F. J Peter Phys. Rev. 1998, **C57**:2507
- DUAN Li-Min. Study on Reaction Mechanisms and Highly Excited Nuclei Properties in $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}/^{197}\text{Au}$ Reactions at 35 A MeV. Ph. D thesis. Institute of Modern Physics, CAS 2002 (in Chinese)
(段利敏. $35\text{A}\cdot\text{MeV } ^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}/^{197}\text{Au}$ 反应中高激发核性质与反应机制研究. 博士论文, 中国科学院近代物理研究所, 2002)
- Hilcher D, Tossner H, Camp A et al. Phys. Rev., 1987, **C36**:208
- Borderie B, Rivet M F, Cabot C et al. Z. Phys., 1984, **A318**:315
- Wada R, Fabris D, Hagel K et al. Phys. Rev., 1989, **C39**:497
- Benrachi F, Chambon B, Cheynis B et al. Phys. Rev., 1993, **C48**:2340
- DUAN Li-Min, WANG Su-Fang, ZHANG Bao-Guo et al. HEP & NP, 1998, **22**:780 (in Chinese)
(段利敏, 王素芳, 张保国等. 高能物理与核物理, 1998, **22**:780)
- GUI M, Hagel K, Wada R et al. Phys. Rev., 1993, **C48**:1794
- HE Zhi-Yong, DUAN Li-Min, JIN Gen-Ming et al. Nucl. Phys. 1997, **A620**:214
- HE Zhi-Yong, JIN Gen-Ming, LI Zu-Yu et al. Chinese Physics Letter, 1996, **V13**:168
- WU H Y, JIN G M, LI Z Y et al. Nucl. Phys., 1997, **A617**:385
- Nebbia G, Hagel K, Fabris D et al. Phys. Lett., 1986, **B176**:20
- Hagel K, Fabris D, Gonthier P et al. Nucl. Phys., 1988, **A486**:429

Excitation Energy and Temperature of Compound Nuclei in the Reaction of $35\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}^*$

DUAN Li-Min WU He-Yu JIN Gen-Ming WANG Su-Fang LI Zu-Yu WEI Zhi-Yong
ZHANG Bao-Guo WANG Hong-Wei XIAO Zhi-Gang LIU Yong-Ying HU Pei-Gang
LU Zhao-Hui TIAN Wen-Dong GOU Quan-Bu

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

Abstract The fission fragments in the reaction of $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ have been measured coincidentally with light charged particles at 35MeV/u by using large area position sensitive detectors and Si-detectors. The velocities of the fissioning compounds are deduced based on the fragments and the excitation energies of the compounds calculated with a hypothesis of massive transfer and taking into account the influence of pre-equilibrium emission of light particles. As the same time, the temperatures of the compounds are extracted by using the energy spectra of the backward light charged particles measured coincidentally with fission fragments. The temperature-excitation energy curve does not present the behaviour predicted by the theories.

Key words compound nuclei, nuclei temperature, excitation energy

Received 11 March 2002

* Supported by 100 Talents Programme of CAS, NSFC (1017508) and Major State Basic Research Development Program (G2000077401)