第 46 卷 第 1 期 1997 年 1 月
1000-3290/97/46(1)/0035-07

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 46, No. 1, January, 1997
©1997 Chin. Phys. Soc.

态布居测热核的核温度及其与碰撞参数的关系*

贺智勇 李祖玉 段利敏 靳根明 吴和宇
张保国 文万信 漆玉金 罗清政 戴光曦
(中国科学院近代物理研究所,兰州 730000)
(1996 年 3 月 18 日收到)

测量了 25 MeV/u ^{40}Ar + ^{197}Au 反应中两裂片符合下的小角 α-α 关联. 由 α-α 关联函数提取了 ^{8}Be 核的相对态布居和热核的核温度. 实验测得发射温度随碰撞参数而稍有变化, 从中心碰撞的 4 MeV 变化至周边碰撞的 3.8 MeV. 在周边碰撞中, 观察到发射温度随着粒子能量的增加而升高.

PACC: 2570; 2585

1 引 言

热核性质研究是目前核物理研究中的前沿课题, 利用中高能重离子碰撞可以成功地形成高度激发的热核. 热核性质研究中的最关键问题之一是: 核可以加温到多热, 即核内的激发能有多少可以转化成热能. 这个问题可以通过测量热核的激发能和核温度来解决. 热核的激发能测量是通过总能量守恒来实现[1,2]的, 即求出热核衰变的全部产物的动能之和, 再考虑衰变前后的质量守恒来得到. 核温度的提取通常是通过测量后角发射的轻粒子能谱来得到, 这种方法适应于较低能区[3], 但在中能区, 粒子动能中除了热能部分外, 还包括有膨胀能、集体转动能及集体边流等能量, 从动能谱提取出的核温度将远远高于真实核温度.

与此同时发展了一种态布居测核温度的方法, 它是通过测量复杂粒子处于不同激发态的概率(态布居)来实现的. 人们利用这种方法进行了大量实验, 研究了不同束流能量和不同反应系统组合下的核温度变化规律(例如文献[4,5]). 由于这些实验几乎都是采用简单的单举测量, 得到的核温度是各种碰撞参数和各种发射源的核温度的平均值, 无法了解得到的核温度是否为热平衡核的核温度, 更无法进一步研究热核内部热激发的规律. 因此, 迫切需要人们进行符合的有碰撞参数分类的态布居提取核温度的实验研究. 我们利用多重探测系统进行的四重符合测量, 进行了此项研究, 并观察到核温度值随碰撞参数和复杂碎片能量的变化.

* 国家自然科学基金资助的课题.

2 实验概况

实验是在中国科学院近代物理研究所兰州重离子加速器(HIRFL)的大散射靶室上进行的.采用25 MeV/u的^{40}Ar束轰击^{197}Au靶.实验中束流强度为10 nA.在前角区安装一组由13套ΔE-E望远镜组成的探测器阵列,用以关联测量不稳定复杂碎片衰变成的两个粒子.该阵列距靶心为580 mm,阵列中心与束流方向夹角为20°,最大夹角为27°,最小夹角为13°.阵列中心方位角处于0°.其中每一套望远镜均由一块300 μm厚度的硅片作ΔE测量,加一块50 mm厚度的BGO做E测量,有效探测面积为ϕ17 mm.相邻两套探测器的夹角(相对于靶子)为3°,最远两套的夹角为13°.实验中采用ΔE-E方法鉴别粒子,结果表明,该阵列能分辨出p,d,t,α等轻粒子和Li,Be,B,C等轻碎片.

此外在中角$\theta_{Lab}=30°$至90°处围绕靶对称地安装了四块大面积的位置灵敏型平行板雪崩气体探测器(PPAC),探测反应中出射的两裂片.四块PPAC几乎包围了方位角φ从0°到360°,其中1号为52°至128°,2号为147°至210°,3号为232°至308°,4号为334°至26°.PPAC能对碎片进行精确的时间和位置(r, θ, φ)测量,并能探测碎片的能损ΔE.实验中只记录和分析四体事件:两个轻粒子和两个裂变碎片.

3 实验数据分析

3.1 碰撞参数的确定

在中高能重离子碰撞中,有多种确定碰撞参数b的方法[6],例如:事件多重性方法、探测总电荷方法、总横向动量方法、平均平行速度方法等.我们选用线性动量转移(LMT)方法:周边碰撞中LMT较小并趋于0,中心碰撞中LMT较大并趋于1.有几种可能的反应机制可以给出LMT与b的关系表达式.在一种简单的非完全融合模型近似下,丢失的线性动量由束流方向具有束流速度的轻粒子或类弹碎片带走.LMT与b有近似关系

$$<\mathrm{LMT}>=\left(1-\frac{b}{b_{\max}}\right)^2\exp\left[0.125\left(\frac{E_P}{37A_P}\right)^2\right], \tag{1}$$

式中的A_P和E_P(MeV)分别为弹核的质量数和能量.

在实验中,我们精确地探测了两裂变碎片的位置和速度.与文献[7]相同,LMT由两裂变碎片的信息来确定,即:将两碎片的角度和速度转换成反冲核的速度(v_{cn})

$$<\mathrm{LMT}>\approx\frac{v_{cn}}{v_{cm}}=\frac{v_1v_2\sin(\theta_1+\theta_2)}{v_{cm}(v_1\sin\theta_1+v_2\sin\theta_2)}, \tag{2}$$

其中v_{cm}为反应系统质心的速度;v_1, v_2为两裂片在实验室系的速度;θ_1, θ_2为在实验室系出射的极角.图1显示了实验中测到的总的LMT谱(实心圆点)及有α-α关联事件的LMT谱(空心圆点).我们均匀地把数据分为三组:中心碰撞事件(LMT≥0.65),半中心碰撞事件(0.5≤LMT≤0.65)和周边碰撞事件(LMT≤0.5),如图1中虚线所示.

3.2　粒子-粒子关联和非稳态复杂碎片的衰变

实验中无法直接探测非稳态复杂碎片,只有通过关联测量其衰变出的两个稳定粒子来进行.两粒子关联函数 $R(q)$定义为

$$\sum Y_{12}(q) = C_{12}(1 + R(q))\sum Y_1(P_1)\,Y_2(P_2), \tag{3}$$

其中 $q=\mu|P_1/m_1 - P_2/m_2|$为两个关联粒子间的相对动量, $Y_{12}(q)$表示两个关联粒子相对动量为 q 的符合产额, $Y_i(P_i)$表示单举产额, $\sum Y_1(P_1)\,Y_2(P_2)$表示归一化函数, C_{12}为归一化系数,保证在较大的 q 值(无关联)时 $R(q)=0$.图 2 为中心碰撞下(LMT≥0.65)测到的 α-α 关联函数.其中最高的峰对应于 ^{8}Be 基态($J=0^+$, $\Gamma=6.8$ eV, $\Gamma_\alpha/\Gamma=1.00$)的衰变; $q\approx100$ MeV/c 处的峰对应于 ^{8}Be 的 3.04 MeV 激发态($J=2^+$, $\Gamma=1.5$ MeV, $\Gamma_\alpha/\Gamma=1$)的衰变.这些不稳定轻核的产额可以通过扣除本底来得到,

$$Y_c = Y_{12}(q) - C_{12}\,Y_1\,Y_2[1 + R_b(q)], \tag{4}$$

式中 $R_b(q)$为本底关联函数.为了准确地提取产额 Y_c,应用了三体弹道理论 MENEKA[8] 来得到 R_b.本底关联函数 $R_b(q)$与粒子的发射时间有关,在 25 MeV/u Ar+Au 反应中轻粒子的发射时间 $\tau\approx200$—300 fm/c(1 fm/$c=3.3\times10^{-24}$s)[9].图 2 中的实线和虚线分别为 $\tau=100$ fm/c(实线)和 500 fm/c(虚线)时的 α-α 本底关联函数.

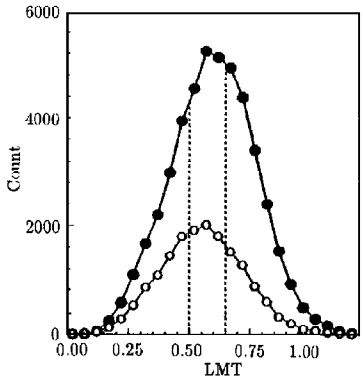

图 1　实验得到的线性动量转移 LMT 谱

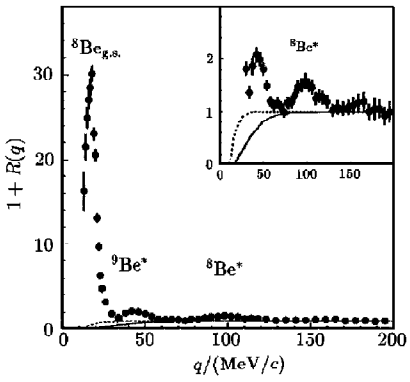

图 2　中心碰撞中的 α-α 关联函数

3.3　态布居提取核温度

当热核系统达到热平衡和化学平衡后,热核发射出某一复杂碎片的概率正比于玻耳兹曼因子 $e^{-E/T}$:

$$Y(E) = Ne^{-E/T}\sum_i \frac{(2J_i+1)\,\Gamma_i/2\pi}{(E-E_i)^2+\Gamma_i^2/4}\,\frac{\Gamma_{c,i}}{\Gamma_i}, \tag{5}$$

此处 $\Gamma_{c,i}/\Gamma_i$ 为衰变道 C 的分支比, E 为该激发态的激发能.则复杂碎片处于两个激发态 E_1 和 E_2 的相对态布居 f_{12}为

$$f_{12} = \frac{2J_2+1}{2J_1+1}e^{-(E_2-E_1)/T}. \tag{6}$$

即通过测量布居比 f_{12}可得到核温度 T. 处于激发态的复杂碎片(如$^8Be^*$)测量是通过关联测量其衰变出的两个粒子(如 $\alpha+\alpha$)进行的,激发态不同,其探测效率不同. 我们用 Monte-Carlo 方法计算了效率函数 $\varepsilon_c(E)$. 在计算中考虑了探测器组的几何布置、能量阈和能量分辨,并假定复杂碎片在其质心系中的衰变是各向同性的. 图 3 中的实线为衰变成两个 α 的探测效率曲线.

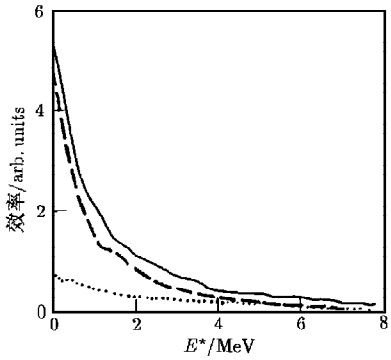

图 3 探测器阵列对 $^8Be^*$ 不稳核的探测效率曲线

4 实验结果与讨论

4.1 态布居测核温度与碰撞参数的关系

图 4 显示了中心碰撞(空心圆点)和周边碰撞(实线圆点)下 ^8Be 基态的能谱. 不稳核 ^8Be 的探测是选取 α-α 关联函数中 $q\leqslant 30$ MeV/c 的部分(见图 2), ^8Be 的能量为两 α 粒子能量之和. 从图 4 可见,中心碰撞下出射能谱具有单一的指数下降特性,表明 ^8Be 来自于热核发射源的统计发射. 而周边碰撞下出射的 ^8Be 碎片能谱,其高能成分明显增多,且能谱不具有指数下降规律,表明周边碰撞中出射的 ^8Be 碎片不是来源于同一发射源. 在文献[10]中,人们利用 4π 探测器研究了 50 MeV/u $^{129}Xe+Cu$ 反应中带电粒子的速度分布,发现中心碰撞下带电粒子来自于一个源的发射,而周边碰撞下存在类弹源和类靶源两个源. 我们的实验中,探测器阵列处于 $\theta=20°$,可以近似地认为:中心碰撞下 ^8Be 不稳定核来自于单一热核发射源的统计发射,而周

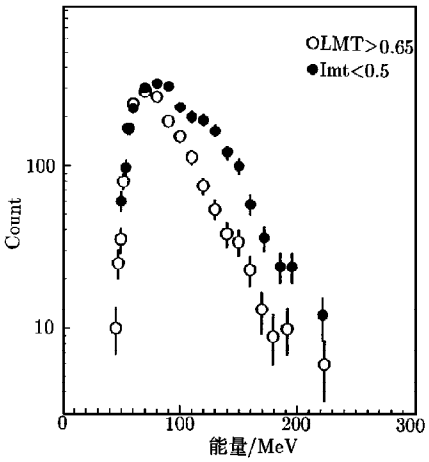

图 4 不稳核^8Be基态的能谱

边碰撞下 ^{8}Be 不稳核的发射存在多种源:低能部分来自于类靶源发射而高能部分存在类弹碎片成分.

根据第 3 节数据分析中所述的方法,我们提取了中心碰撞和周边碰撞下的热核核温度.图 5(a),(b)分别为中心碰撞和周边碰撞中提取出的 ^{8}Be 不稳定核基态和激发态布居比及其对应的发射温度.从 α-α 关联提取出的 ^{8}Be 态布居比会受到其它一些不稳核跟随衰变的影响,如 ^{9}Be 激发态和 ^{9}B 激发态等均会衰变出两个 α 粒子而影响到 ^{8}Be 核的提取.图 5 所示为考虑了跟随衰变修正后的态布居比和发射温度.跟随衰变的修正采用与文献[11]相同的方法进行.在计算 ^{9}Be 各激发态的相对产额时,温度分别取为 $T=3.5, 4.0$ 和 4.5 MeV,并观察到取不同的 T 值时,^{9}Be 等核跟随衰变的影响变化不大.从图 5 的结果可知:中心碰撞下热核温度为 $\left(4.0\ ^{+1.3}_{-0.7}\right)$ MeV,周边碰撞下热核温度为 $\left(3.8\ ^{+1.0}_{-0.6}\right)$ MeV.中心碰撞中形成的热核核温度略高于周边碰撞下的核温度.该温度值接近于后角轻粒子能谱得到的核温度值[3]:通过在后角 $\theta_{Lab}=167°$ 对称地放置两套半导体望远镜测轻粒子,从 α 粒子的能谱得到中心碰撞(LMT>0.6)下 25 MeV/u Ar+Au 反应中的核温度为 4.8 MeV,周边碰撞(LMT<0.5)下的核温度为 3.8 MeV.两种方法得到的温度值很接近,也证明了在中低能区后角轻粒子能谱定核温度方法的可靠性.

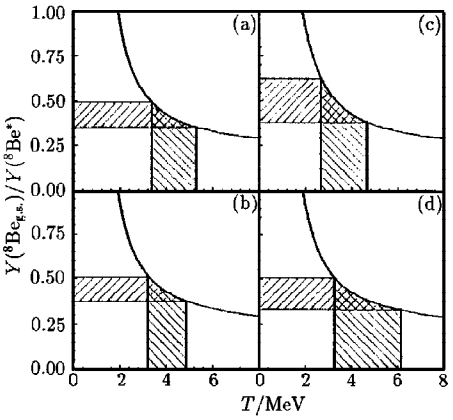

图 5　^{8}Be 基态和激发态的态布居与相应的发射温度　(a)为中心碰撞;(b)为周边碰撞;(c)为周边碰撞中的低能组;(d)为周边碰撞中的高能组

4.2　态布居测核温度与粒子能量的关系

为了研究发射温度与粒子能量的关系,根据两关联粒子的能量和,E_1+E_2,把 ^{8}Be 碎片分成两组:低能碎片 $\left(0.25\leqslant\frac{E_1+E_2}{25(A_1+A_2)}\leqslant 0.6\right)$ 和高能碎片 $\left(0.6\leqslant\frac{E_1+E_2}{25(A_1+A_2)}\leqslant 1\right)$.其中 A_1 和 A_2 分别为两粒子的质量数,对 α-α 关联 $A_1+A_2=8$,25 MeV/u为束流能量.对这两组不同能量范围的碎片,分别计算了 ^{8}Be 核的探测效率.图 3 中的点线和虚线分别为低能和高能 ^{8}Be* 核的探测效率曲线.对于低能 ^{8}Be* 核(点线),^{8}Be 激发态(3.04 MeV)的探测效率远小于 ^{8}Be 基态;而对于高能 ^{8}Be* 核(虚线),两者的探测效率相差不大.

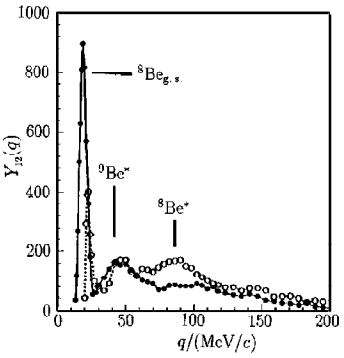

图 6　周边碰撞中高能粒子和低能粒子组的 α+α 关联谱　○为高能组;●为低能组

图 6 显示了周边碰撞下(LMT<0.5)测得的 α-α

关联谱.对于低能组(实心圆点),由于探测器阵列对^{8}Be基态的探测效率远高于^{8}Be激发态,$^{8}Be_{g.s.}$峰远远高于$^{8}Be^{*}$,而高能组(空心圆点),$^{8}Be_{g.s.}$峰明显地变小了.经过探测效率的修正后,周边碰撞下低能组和高能组^{8}Be不稳核的态布居比分别显示在图5(c)和(d)中.低能组提取的核温度为$\left(3.3^{+1.35}_{-0.65}\right)$ MeV,高能组提取的核温度为$\left(4.1^{+2.05}_{-0.85}\right)$ MeV.

国际上研究发射温度随粒子能量的变化关系,曾得到过不同的结果:在35 MeV/u $^{14}N+^{197}Au$反应中观察到发射温度随粒子能量的增高而升高[12];而在60 MeV/u $^{40}Ar+^{197}Au$反应中却观察到发射温度随粒子能量变化不大[4].我们通过用符合的粒子-粒子关联方法,观察到周边碰撞下,发射温度随粒子能量增加而升高,表明不同能量的粒子的发射源温度不同.

5 结 论

利用四块PPAC探测两裂片和13单元望远镜阵列关联测量^{8}Be不稳核衰变出的两个α粒子,研究了25 MeV/u $^{40}Ar+^{197}Au$反应中中心碰撞和周边碰撞下^{8}Be激发态和基态的布居比及其发射温度.实验观察到中心碰撞下^{8}Be核来自于热平衡核的统计发射,而周边碰撞中^{8}Be核存在着非统计发射成分.通过扣除^{9}B与^{9}Be激发态的跟随衰变以及考虑探测效率修正后,从^{8}Be基态和3.04 MeV激发态的布居比提取出了核温度.中心碰撞中提取的核温度为$\left(4.0^{+1.3}_{-0.7}\right)$ MeV,略高于周边碰撞中提取的核温度.在周边碰撞中观察到发射温度随粒子能量而变化,从低能粒子的$\left(3.3^{+1.35}_{-0.65}\right)$ MeV增至高能粒子的$\left(4.1^{+2.05}_{-0.85}\right)$ MeV.

[1] D.Cussol *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A561**(1993),298.
[2] J.Pochodzalla *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **75**(1995),1040.
[3] 吴和宇等,高能物理与核物理,**19**(1995),591.
[4] J.Pochodzalla *et al.*, *Phys. Rev.*, **C35**(1987),1695.
[5] G.J.Kunde *et al.*, *Phys. Lett.*, **B272**(1991),202.
[6] J.Peter *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A519**(1990),611.
[7] J.Klolzengmann *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A499**(1989),392.
[8] A.Elamaani *et al.*, *Nucl. Inst. and Meth.*, **A313**(1992),401.
[9] He Zhiyoug *et al.*, *Chin. Phys. Lett.*, **12**(1995),521.
[10] D.R.Bowman *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993),3534.
[11] 段利敏等,高能物理与核物理,**19**(1995),393.
[12] C.B.Chitwood *et al.*, *Phys. Lett.*, **B172**(1986),27.

EMISSION TEMPERATURES OF HOT NUCLEI FROM POPULATIONS OF PARTICLE UNSTABLE STATES AS A FUNCTION OF IMPACT PARAMETER

HE ZHI-YONG　LI ZU-YU　DUAN LI-MIN　JIN GEN-MING　WU HE-YU
ZHANG BAO-GUO　WEN WAN-XIN　QI YU-JIN　LUO QING-ZHENG　DAI GUANG-XI
(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou* 730000)
(Received 18 March 1996)

ABSTRACT

The α-α correlation at small relative angles has been measured for ^{40}Ar-induced reactions on ^{197}Au at $E/A = 25$ MeV, in coincidence with two fission fragments. The relative populations of states of ^{8}Be and emission temperature of hot nuclei are extracted from the α-α correlation function. The emission temperature changes slightly with the impact parameter, from about 4 MeV for central collision to about 3.8 MeV for peripheral collision. At peripheral collision, the emission temperature is observed to increase with the energy of particles.

PACC: 2570; 2585