

# 25MeV/u<sup>40</sup>Ar + <sup>197</sup>Au 反应中相对态布居 与发射温度的提取\*

段利敏 李祖玉 靳根明 贺智勇 罗清政 吴和宇

张保国 漆玉金 文万信 党秉荣 戴光曦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1994 -04-18 收稿

## 摘 要

在 25MeV/u<sup>40</sup>Ar + <sup>197</sup>Au 反应中,对两粒子小相对动量的关联进行了测量,由 p-t、 $\alpha$ - $\alpha$  关联函数提取出 <sup>4</sup>He、<sup>8</sup>Be 的相对态布居。在对影响 <sup>8</sup>Be 态布居的跟随衰变作了仔细修正后得到的温度为  $3.5 \pm 0.3$  MeV; 对 <sup>4</sup>He<sub>g.s.</sub> 引入 30% 跟随衰变产额修正后温度为  $3.6 \pm 0.4$  MeV。

**关键词** 关联函数,态布居,发射温度。

## 1 引 言

在中能核碰撞中,统计模型较好地解释了复合系统的衰变行为。温度是统计模型中的最基本概念,由实验确定温度有十分重要的意义。许多温度的提取都是通过分析发射轻粒子的动能谱来实现的,但是在中能区,由于轻粒子的来源除了熔合核外还受到其它一些发射源的影响,使得提取出的温度的不确定性增大,所以必须利用符合技术对发射源进行选择。

本文采用另外一种提取温度的方法,它是通过测量复杂粒子处在不同激发态的比例(态布居)来实现的。复杂粒子的发射主要来源于高激发体系的蒸发<sup>[1]</sup>,通过研究复杂粒子的发射可以提供高激发体系的有关信息。在假设核的高激发体系与发射的子体系达到动力学平衡与化学平衡后,由发射粒子的相对态布居就可以提取出粒子的发射温度<sup>[2]</sup>。这里发射温度是指粒子离开母核时刻母核所具有的温度。

## 2 实验概况

实验是 1993 年 6 月在兰州 HIRFL 加速器的 2.8m 直径圆柱形散射室终端上完成

\* 国家自然科学基金资助。

的。金靶厚度  $1.42\text{mg}/\text{cm}^2$ ，入射粒子为  $25\text{MeV}/u^{40}\text{Ar}$ 。轻粒子 ( $Z \leq 4$ ) 采用 13 单元  $\Delta E-E$  望远镜组测量，每个望远镜包括一个厚  $300\mu\text{m}$  Si 探测器和厚  $5\text{cm}$  BGO 晶体闪烁体。探测器组距离靶心  $58\text{cm}$ ，中心角  $\theta_{av} = 20^\circ$ ，相邻探测器夹角  $\Delta\theta = 3.5^\circ$ ，最大夹角为  $13.6^\circ$ 。BGO 能量刻度是由粒子在  $\Delta E(\text{Si})$  中的能量损失反推求得的<sup>[3]</sup>。

光电倍增管放大倍数的漂移是利用高稳定性的  $\Delta E(\text{Si})$  探测器进行校正的。在  $\Delta E-E$  双维谱上，在  $\Delta E$  轴开一个较狭窄的窗，落入窗中的事件都投影到  $E$  轴上，对应于不同的粒子就有其相应的峰，利用高斯函数拟合得到峰位  $P_i$  ( $i$  表示不同的粒子)，漂移系数  $\xi$  可以通过对下式求极值来确定：

$$f(\xi) = \sum_i (\xi P_i - P_{0i})^2 / P_{0i}^2, \quad (1)$$

$P_{0i}$  对应于能量刻度时的峰位。符合事件与分除后的单举事件记录在磁带上。在离线处理中  $p, d, t, \alpha$  的能量阈分别设置在  $8, 13, 15$  和  $24\text{MeV}$ 。

### 3 关联函数

对于给定的粒子组合，两粒子关联函数  $R(q)$  定义如下：

$$\sum Y_{12}(p_1, p_2) = C_{12} [1 + R(q)] \sum Y_1(p_1) Y_2(p_2), \quad (2)$$

其中  $Y_{12}(p_1, p_2)$  是符合产额， $Y_1(p_1), Y_2(p_2)$  是单举产额； $p_1, p_2$  是两粒子的实验室系动量； $q = |\mu(p_2/m_2 - p_1/m_1)|$  是相对动量， $\mu$  为折合质量； $C_{12}$  是归一化常数，它由  $q$  较大时  $R(q) = 0$  来确定。将实验测量的  $Y_1, Y_2$  及  $Y_{12}$  代入方程(2)，在给定  $q$  及其道宽的条件下，对  $p_1, p_2$  求和就可以得到关联函数  $R(q)$ 。

图 1(a) 是实验测量到的  $\alpha-\alpha$  关联函数。其中最高的峰对应于  ${}^8\text{Be}$  非束缚基态 ( $J^\pi = 0^+$ ,  $\Gamma = 6.8\text{eV}$ ,  $\Gamma_\alpha/\Gamma = 1.00$ ) 的衰变； $q \approx 105\text{MeV}/c$  处的峰对应于  ${}^8\text{Be}$   $3.04\text{MeV}$  激发态 ( $J^\pi = 2^+$ ,  $\Gamma = 1.5\text{MeV}$ ,  $\Gamma_\alpha/\Gamma = 1.00$ ) 的衰变；在  $q \approx 50\text{MeV}/c$  处的峰则对应于  ${}^9\text{Be}$   $2.43\text{MeV}$  激发态的跟随衰变<sup>[2]</sup> ( ${}^9\text{Be}^*$  先放出一个  $\alpha$  粒子，剩余部分再分裂为一个中子与一个  $\alpha$  粒子)。

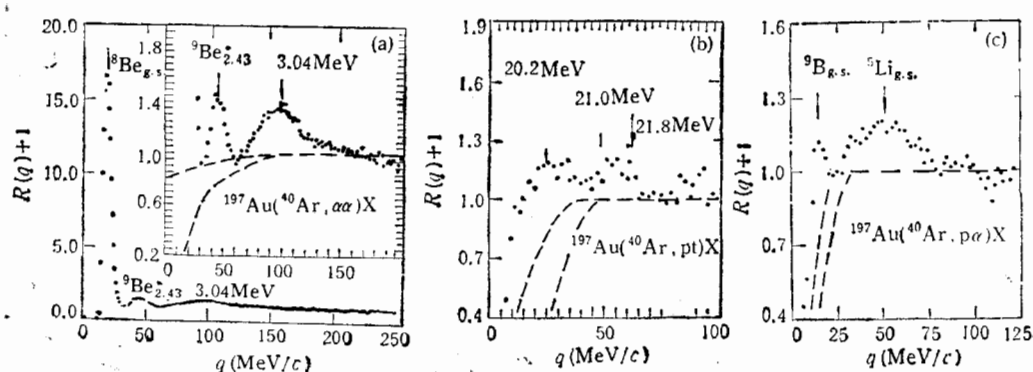


图 1 (a)  $\alpha-\alpha$  关联函数, (b)  $p-t$  关联函数, (c)  $p-\alpha$  关联函数

虚线给出了本底关联函数  $R_b$ ,  $E/u = 25\text{MeV}$ ,  $\theta_{av} = 20^\circ$ 。

图 1(b) 是 p-t 关联函数。第一个峰对应于  $\alpha$  的 20.21MeV 激发态<sup>[4]</sup> ( $J^\pi = 0^+$ ,  $\Gamma = 0.5\text{MeV}$ ,  $\Gamma_a/\Gamma = 1.00$ ) 的衰变;第二个峰对应于  $\alpha$  的 21.01MeV 激发态 ( $J^\pi = 0^-$ ) 与 21.84MeV 激发态 ( $J^\pi = 2^-$ ) 衰变产物的叠加。

图 1(c) 给出了  $\Gamma_{p-\alpha}$  关联函数,  $q \approx 16\text{MeV}/c$  处的峰对应于  ${}^9\text{B}$  基态 ( $J^\pi = \frac{3}{2}^-$ ,  $\Gamma = 0.54\text{keV}$ ,  $\Gamma_a/\Gamma = 1.00$ ) 的衰变<sup>[5]</sup> ( ${}^9\text{B}_{g.s.} \rightarrow p + {}^8\text{Be}_{g.s.} \rightarrow p + \alpha + \alpha$ );  $q \approx 50\text{MeV}/c$  处的峰对应于  ${}^5\text{Li}$  基态的衰变。在此利用第一个峰来提取  ${}^9\text{B}_{g.s.}$  的产额。

### 4 粒子相对态布居与发射温度

假设总的符合产额  $Y_{12}$  由两项组成,  $Y_{12} = Y_c + Y_b$ ,  $Y_c$  对应于粒子非稳态的衰变产额,  $Y_b$  对应于本底产额, 它是由本底关联函数  $R_b(q)$  来确定

$$Y_b(q) = C_{12} \sum Y_1(p_1) Y_2(p_2) [1 + R_b(q)], \quad (3)$$

在实验上还没有一种较好的方法来确定本底关联函数  $R_b$ 。图 1 中的虚线只是靠经验给出的  $R_b$  的两种极限情况。

在给定  $R_b(q)$  后, 由关联函数  $R(q)$  提取的粒子非稳态产额为:

$$Y_c(q) = Y_{12}(q) - Y_b(q) = C_{12} [R(q) - R_b(q)] \sum Y_1(p_1) Y_2(p_2), \quad (4)$$

粒子的衰变符合产额  $Y_c$  的理论计算值由下式给出<sup>[2]</sup>:

$$Y_c(T) = \int dE [\varepsilon_c(E) \rho_c(E) e^{-E/T}], \quad (5)$$

其中  $E$  为衰变粒子的激发能;  $T$  是发射该粒子的母核的温度;  $\varepsilon_c(E)$  是探测器组对特定衰变道的探测效率函数。  $\rho_c(E)$  的表达式为:

$$\rho_c(E) = \sum_i \frac{(2J_i + 1) \Gamma_i / 2}{(E - E_i)^2 + \Gamma_i^2 / 4} \cdot \frac{\Gamma_{c,i}}{\Gamma_i}, \quad (6)$$

$E_i$  是粒子激发态共振能;  $\Gamma_i$  是激发态的宽度;  $\Gamma_{c,i}/\Gamma_i$  为该反应道的衰变分支比。在此我们假定这些量与能量无关。效率函数  $\varepsilon_c(E)$  的计算采用 Monte Carlo 方法, 在计算中考虑了探测器组的几何布置、能量阈和能量分辨, 并假定粒子在其质心系统中的衰变是各向同性的。计算中所用到的  ${}^8\text{Be}$  的能量与角分布利用  $\text{Be}$  的稳定同位素代替。

用  $N_L(T)$  与  $N_H(T)$  分别表示粒子的低激发态和高激发态的产额。图 2(a)、(b)

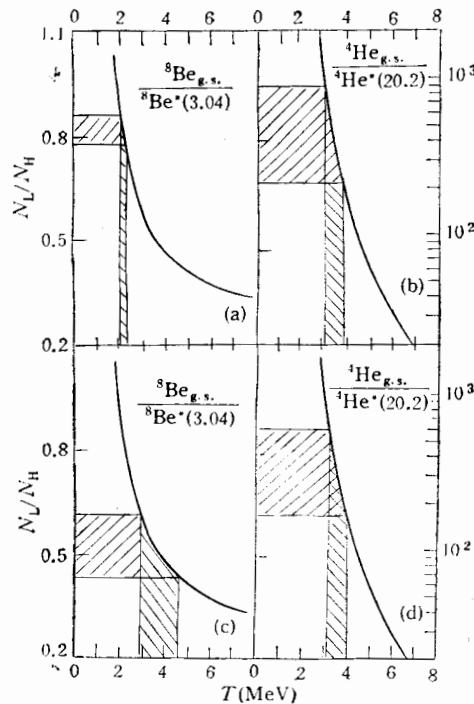


图 2 粒子态布居与相应的发射温度 (a)、(b) 未修正, (c)、(d) 是对跟随衰变修正后的数据。

所示是由  $\alpha$ - $\alpha$ 、 $p$ - $t$  关联函数提取的粒子态布居比及其对应的粒子发射温度。图中实线是由方程(5)计算得到的粒子态布居比与温度的关系；虚线中的阴影区域对应着图 1 中的本底关联函数  $R_b$  的极限取法。由  ${}^8\text{Be}$  的基态与 3.04MeV 激发态提取的温度为  $2.2 \pm 0.1\text{MeV}$ ；由  $\alpha$  的基态与 20.21MeV 激发态提取的温度为  $3.4 \pm 0.4\text{MeV}$ 。这里只考虑了由本底关联函数的不确定性而引入的误差。

## 5 跟随衰变的修正

由于粒子的态布居比受到其它一些发射粒子跟随衰变的影响，实验测到的态布居比并不能反映真实值。另外级联衰变对粒子较低激发态的贡献一般都比对较高激发态的贡献大，因此实验提取的  $N_L(T)/N_H(T)$  都较真实值大。这样在对态布居比不作任何修正提取出的核温度只给出温度的下阈。表 1 列出了影响  ${}^8\text{Be}$  态布居的最主要的两个核及其有关的重要衰变道<sup>[6,7]</sup>，对于  ${}^9\text{B}$  由于缺乏部分激发态衰变分支比的数据，在此只考虑基态的影响。在计算  ${}^9\text{Be}$  各激发态的相对产额时取温度  $T=3.8\text{MeV}$ ，并取  ${}^9\text{Be}$  2.43MeV 激发态的产额为 1。对表 1 中各态分别求和并考虑衰变分支比，就可以得出  ${}^9\text{Be}$ 、 ${}^9\text{B}_{g.s.}$  的跟随衰变对  ${}^8\text{Be}$  基态与 3.04MeV 激发态的总的贡献。

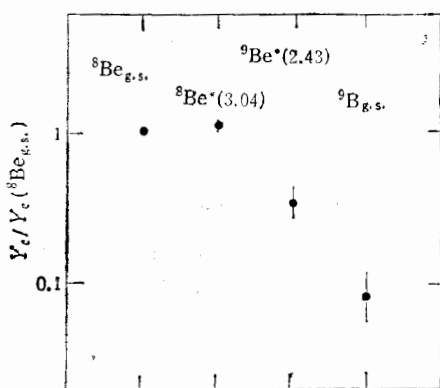


图 3 由  $\alpha$ - $\alpha$ 、 $p$ - $\alpha$  关联函数提取的粒子态产额比

表 1 列出了影响  ${}^8\text{Be}$  态布居的最主要的两个核及其有关的重要衰变道<sup>[6,7]</sup>，对于  ${}^9\text{B}$  由于缺乏部分激发态衰变分支比的数据，在此只考虑基态的影响。在计算  ${}^9\text{Be}$  各激发态的相对产额时取温度  $T=3.8\text{MeV}$ ，并取  ${}^9\text{Be}$  2.43MeV 激发态的产额为 1。对表 1 中各态分别求和并考虑衰变分支比，就可以得出  ${}^9\text{Be}$ 、 ${}^9\text{B}_{g.s.}$  的跟随衰变对  ${}^8\text{Be}$  基态与 3.04MeV 激发态的总的贡献。

表 1  ${}^9\text{Be}$  激发态与  ${}^9\text{B}$  基态的参数及其衰变分支比<sup>[6,7]</sup>

$E_x(\text{MeV})$	$J^\pi$	$\Gamma(\text{keV})$	相对产额	衰变分支比	
				$\text{to}^8\text{Be}_{g.s.}$	$\text{to}^8\text{Be}(3.04)$
1.69	$\frac{1}{2}^+$	217	0.39	1.00	0
2.43	$\frac{5}{2}^-$	0.77	1.00	0.07	0
2.78	$\frac{1}{2}^-$	1080	0.28	1.00	0
3.05	$\frac{5}{2}^+$	282	0.82	0.87	0
4.70	$\frac{3}{2}^+$	743	0.35	0.13	0
6.67	$\frac{7}{2}^-$	1540	0.43	0.02	0.55
11.28	$\frac{3}{2}^-$	575	0.06	0.02	0.14
11.81	$\frac{3}{2}^-$	400	0.05	0.03	0.12
${}^9\text{B}_{g.s.}$	$\frac{3}{2}^-$	0.54		1.00	0

图 3 所示是由  $\alpha$ - $\alpha$  关联函数(图 1(a))、p- $\alpha$  关联函数(图 1(c)) 提取的几种粒子不同态的产额。在粒子探测效率的模拟中,考虑了精确的几何和能量条件,能量与角分布采用 Be 稳定同位素的参数。从 <sup>8</sup>Be 基态与 3.04MeV 激发态中减去 <sup>9</sup>Be 和 <sup>9</sup>B<sub>g.s.</sub> 跟随衰变的贡献就得到修正后的态布居。图 2(c) 中所示的是修正后 <sup>8</sup>Be 的态布居及对应的发射温度。提取的温度为  $3.5 \pm {}_{0.3}^{1.3}$ MeV。

对于基态  $\alpha$ , 跟随衰变的来源很广,由实验确定其跟随衰变的产额较为困难。图 2(d) 显示的是考虑 30% 的跟随衰变修正后得出的  $\alpha$  态布居与温度的关系。由于  $\alpha$  的两个态之间的能量间隔  $\Delta E \approx 20$ MeV 远大于提取出的温度,从图中可以看出温度的改变很小 ( $< 0.2$ MeV), 为  $3.6 \pm 0.4$ MeV。

## 6 小 结

通过测量 25MeV/u<sup>40</sup>Ar + <sup>197</sup>Au 反应中小相对动量轻粒子关联函数,提取出 <sup>8</sup>Be 基态与 3.04MeV 激发态、 $\alpha$  基态与 20.21MeV 激发态的布居比。在不考虑发射粒子跟随衰变的影响下提取的温度分别是  $2.2 \pm 0.1$ MeV 和  $3.4 \pm 0.4$ MeV。在扣除了 <sup>9</sup>Be 与 <sup>9</sup>B<sub>g.s.</sub> 的跟随衰变后,由 <sup>8</sup>Be 提取的温度为  $3.5 \pm {}_{0.3}^{1.3}$ MeV。对于  $\alpha$ , 温度随态布居的改变不敏感,在对基态引入 30% 修正后温度改变为  $3.6 \pm 0.4$ MeV。

## 参 考 文 献

- [1] G. Morreto et al., LBL-24722 (1988).
- [2] J. Pochodzalla et al., *Phys. Rev.*, **C35** (1987) 1695.
- [3] A. Kristiansson et al., *Nucl. Instr., and Meth.*, **A295** (1990) 359.
- [4] D. R. Tilleg et al., *Nucl. Phys.*, **A541** (1992) 1.
- [5] J. Pochodzalla et al., *Phys. Lett.*, **B161** (1985) 256.
- [6] C. L. Cocke and P. R. Christensen *Nucl. Phys.*, **A111** (1968) 623.
- [7] P. R. Christensen and C. L. Cocke, *Nucl. Phys.*, **89** (1966) 656.

## Relative Population of State and Extraction of Emission Temperature in 25MeV/u <sup>40</sup>Ar + <sup>197</sup>Au

Duan Limin    Li Zuyu    Jin Genming    He Zhiyong    Luo Qingzheng    Wu Heyu  
Zhang Baoguo    Qi Yujin    Wen Wanxin    Dang Bingrong    Dai Guangxi

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou, 730000*)

Received 18 April 1994

### Abstract

Two particle correlations at small relative momenta have been measured for <sup>40</sup>Ar induced reactions on <sup>197</sup>Au at  $E/A = 25$ MeV. The relative populations of states of <sup>4</sup>He and <sup>8</sup>Be were extracted from p-t and  $\alpha$ - $\alpha$  correlation functions, respectively. The temperature of  $T = 3.5 \pm {}_{0.3}^{1.3}$ MeV was obtained from relative populations of <sup>8</sup>Be states by correcting sequential decay carefully, and the temperature of  $T = 3.6 \pm 0.4$ MeV was deduced by modifying with 30 percent of sequential decay on <sup>4</sup>He ground state.

**Key words** correlation functions, population of state, Emission temperature.