

46.7MeV/u ^{12}C 诱发核反应中非稳态产物的 布居及核温度的提取¹⁾

郝鸿飞 詹文龙 诸永泰 郭忠言 胡晓庆 刘冠华

周建群 尹淑芝 赵有雄 魏志勇 范恩杰

(中国科学院近代物理研究所,兰州 730000)

摘 要

本文报道了在46.7MeV/u ^{12}C 诱发的核反应实验中,利用测量轻带电粒子关联函数,来研究非稳定核及低激发核的粒子衰变方式的实验结果.在假定统计平衡的条件下提取了有关核温度参量,并研究了不同反应机制及靶核对提取的核温度的影响.

一、引 言

中能重离子核反应为研究热核提供了有利的场所,研究高激发条件下的核温度与激发能的关系对于进一步了解核温度这一统计热力学概念在中能区的适用性有很重要的意义.微观动力学 BUU 理论的计算及非完全线性动量转移的实验表明,在中能区热核所能承受的激发能是有限的^[1],很多实验表明热核的最大温度为 4.5—5.5MeV^[2].在中能区,由于反应机制的复杂性,使得热核问题的研究相当困难.在热核研究中一个重要的问题就是研究热核的核温度,目前在中能区提取核温度的方法主要有以下几种:

1) 通过测量中子及轻带电粒子的多重性来确定体系的总的激发程度.这种方法要求在 4π 空间内测量中子、质子等轻粒子^[3],因此实验技术相应的要复杂一些.由于轻粒子来自反应的各个阶段,并且在核子-核子碰撞过程中会有一些中子及质子直接发射出来,因此有很大一部分轻带电粒子不是来自于激发体系的蒸发,所以这种测量方法只能定性地了解反应过程中的激发情况.

2) 复杂粒子的发射主要来自于高激发体系的蒸发^[4].通过研究复杂粒子的发射,可以提供高激发核体系的有关信息,但由于复杂粒子发射与蒸发轻粒子不同,不易从能谱上得到有关温度的信息,可以通过测量非稳态粒子的布居来提取核温度^[5].

3) 通过研究两个裂变碎片的夹角及其对共面的偏离来研究热核问题^[6,7].

热核的产生、发展与衰变是一个复杂而又有趣的问题,目前人们对这个问题的认识还只是初步的.由于热核问题与核物质所能承受的最大激发能、天体物理中的大爆炸及

本文1991年11月25日收到.

1) 国家自然科学基金资助项目.

统计热力学的有关概念在有限体系中的适用性等有密切的联系, 因此对热核的深入研究在目前有重要的意义. 为此我们在 ¹²C(46.7MeV/u) + ⁵⁸Ni, ¹¹⁵In, ¹⁹⁷Au 的实验中开展了对热核的研究工作.

本文将详细讨论从轻带电粒子关联函数出发来提取核温度的方法与得到的实验结果.

二、基本原理及探测器的效率

在平衡统计热力学中对于一个温度为 T 的热力学体系, 如果有一个粒子在这个体系中运动, 那么其配分函数可以写成:

$$Q = \sum g_i e^{-\frac{E_i}{T}}, \quad (1)$$

其中 g_i 表示第 i 条能级的简并度, E_i 为第 i 条能级的能量本征值. 因此假定统计服从 Maxwell 分布, 那么粒子处于某一能级的几率为:

$$P_i = \frac{g_i e^{-\frac{E_i}{T}}}{Q}. \quad (2)$$

有些非稳定核与稳定核的低激发态会发生粒子衰变 $c \rightarrow a + b$, 因此通过测量非稳定核的衰变产物 a 和 b 就可以定出非稳定核或稳定核低激发态的产额. 根据

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{g_i}{g_j} e^{-\frac{(E_i - E_j)}{T}} \quad (3)$$

就可以提取核温度, 假定母核 $c \rightarrow a + b$ 的分支比为 $\Gamma_{c \rightarrow ab}$, 探测器的几何效率为 $\varepsilon_{c \rightarrow ab}$, 则对应于某一母体不同激发能的衰变的产额为:

$$N_c = \frac{N_{ab}}{\varepsilon_{c \rightarrow ab} \Gamma_{c \rightarrow ab}}, \quad (4)$$

$$N_{c'} = \frac{N_{a'b'}}{\varepsilon_{c \rightarrow a'b'} \Gamma_{c' \rightarrow a'b'}}, \quad (5)$$

其中 N_c 与 $N_{c'}$ 表示母核处于不同状态下的产额, 而 N_{ab} 与 $N_{a'b'}$ 则表示母核衰变后被探测器测到的符合截面. 通过(3)–(5)式可以得出核温度:

$$T = \frac{(E_2 - E_1)}{R}, \quad R = \ln \left(\frac{g_2 N_{ab} \varepsilon_{c' \rightarrow a'b'} \Gamma_{c' \rightarrow a'b'}}{(g_1 N_{a'b'} \varepsilon_{c \rightarrow ab} \Gamma_{c \rightarrow ab})} \right). \quad (6)$$

从(6)式中可以看出, 要得到核温度 T 就需要知道某一母体不同激发能衰变后被探测器测到的符合截面与探测效率.

文献[8]讨论了各种粒子组合的关联函数, 我们从中选择 ⁶Li_{2.186MeV} → α + d, ⁸Be_{g.s.} → α + α, ⁵Li_{g.s.} → p + ⁴He, ⁵Li_{16.66MeV} → d + ³He, ⁸Be_{3.04MeV} → α + α, 来提取核温度. 根据 Si 半导体测到的结果, 用运动源模型拟合了 ⁶Li 及 ⁷Be 的能谱, 在拟合中采用了三源模型, 认为产物的能谱可以由下式表示:

$$\frac{d\sigma^2}{d\sigma dE} = \sum_{i=1}^3 N_i \sqrt{(E - U_c)} \exp\{-[E - U_c + E_i]$$

$$-2\sqrt{(E_i(E-U_c))\cos(\theta)}/T_i\}. \quad (7)$$

其中 U_c 表示从发射体系获得的库仑能, T_i 表示发射源的温度, $E_i = \frac{1}{2}mv_i^2$, 其中 m 为核子的质量, v_i 表示运动源的速度.

假定 ${}^5\text{Li}$ 与 ${}^6\text{Li}^*$ 的能谱可以用 ${}^6\text{Li}$ 的运动源参数来拟合, 而 ${}^8\text{Be}$ 的能谱可以用 ${}^7\text{Be}$ 的参数来拟合, 由于我们只关心相对效率, 因此这样做并不会带来多大的误差. 通过 M.C 方法就可以计算几何探测效率. 在表 1 中我们给出了几种非稳定粒子的几何探测效率.

表 1 探测几何效率

${}^5\text{Li}_{g.s.}$	${}^5\text{Li}_{16.66\text{MeV}}$	${}^6\text{Li}_{2.186\text{MeV}}$	${}^8\text{Be}_{g.s.}$	${}^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$
17/5000	192/5000	101/5000	258/5000	16/5000

三、核温度的提取

为了提取核温度我们重点研究了 ${}^5\text{Li}_{g.s.}/{}^5\text{Li}_{16.66\text{MeV}}$ 、 ${}^6\text{Li}_{g.s.}/{}^6\text{Li}_{2.186\text{MeV}}$ 及 ${}^8\text{Be}_{g.s.}/{}^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$ 三种非稳定粒子不同激发能级的相对布居数的比值. 在图 1 中给出了实验产额比 R 与核温度的关系. 其中阴影部分表示由于本底关联函数的选法不同而造成的变化范围, 从图中可以看出对于 ${}^5\text{Li}_{g.s.}$ 与 ${}^5\text{Li}_{16.66\text{MeV}}$ 这种能级能量相差比较大的情况下, 提取的核温度受本底关联函数的影响不是很大.

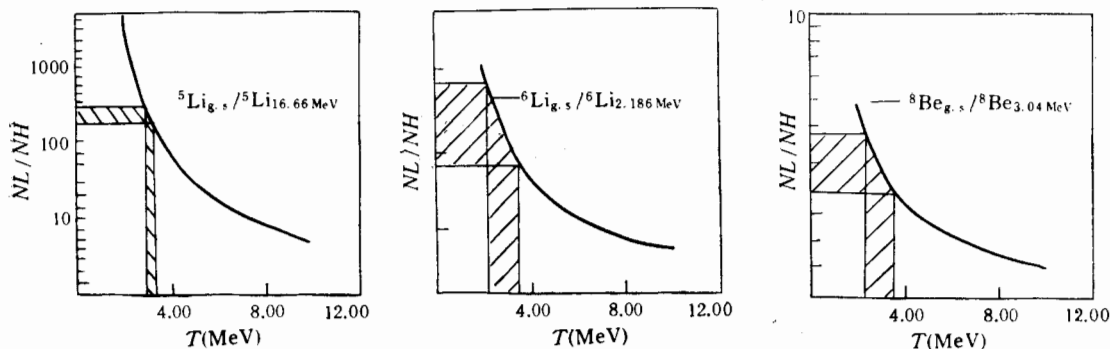


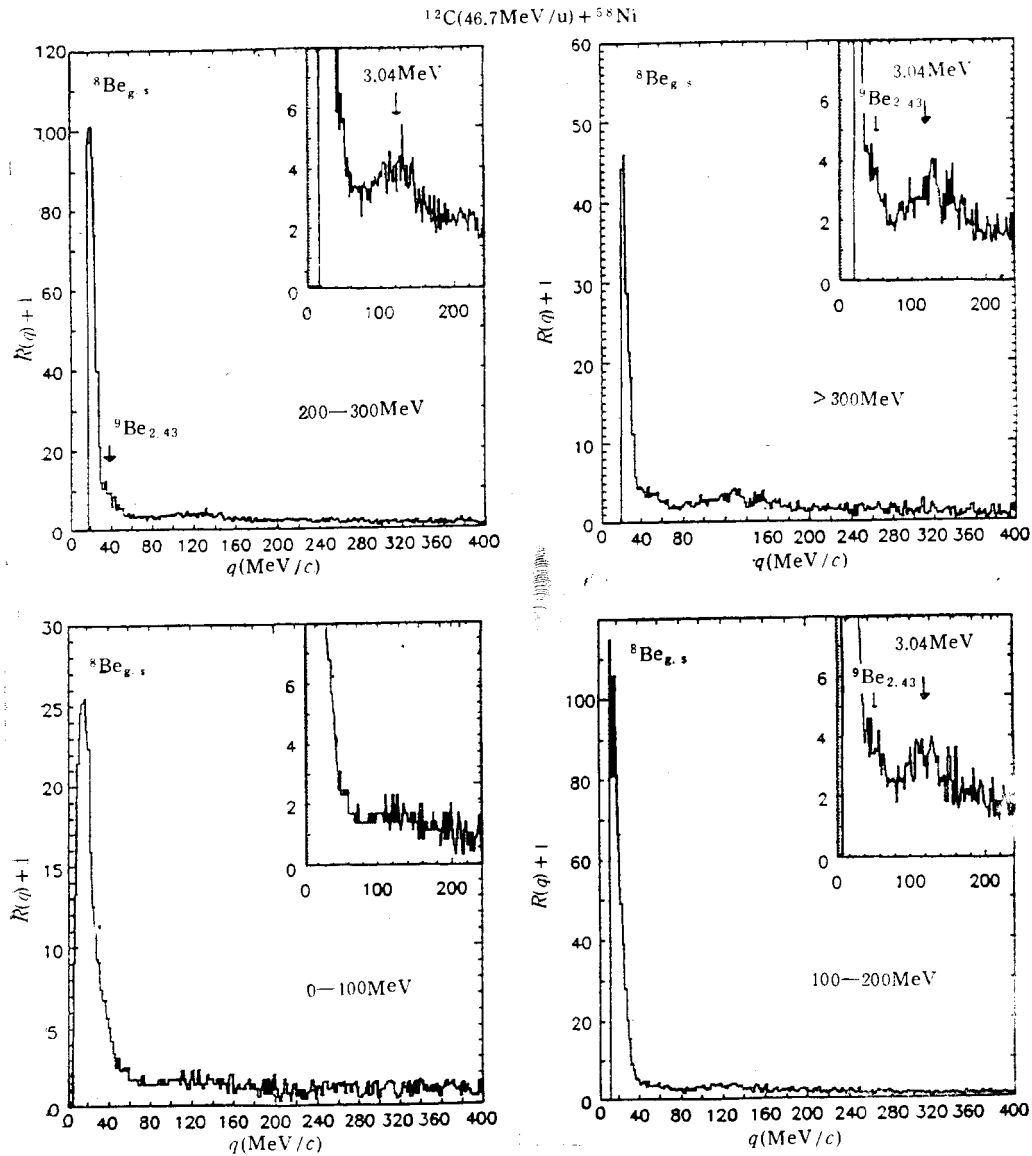
图 1 非稳态粒子相对布居与核温度的关系

在表 2 中我们给出了利用这种方法得到的核温度, 其中用到的符合产额是取两种不同本底关联函数得到的符合产额的平均, 表中给出的核温度的误差为统计误差.

表 2 核温度, ${}^{12}\text{C}(46.7\text{MeV}/u) + {}^{58}\text{Ni}; \theta = 20^\circ$

反应道之比	核温度 $T(\text{MeV})$
${}^5\text{Li}_{g.s.}/{}^5\text{Li}_{16.66\text{MeV}}$	3.07 ± 0.03
${}^6\text{Li}/{}^6\text{Li}_{2.186\text{MeV}}$	3.03 ± 0.04
${}^8\text{Be}_{g.s.}/{}^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$	2.89 ± 0.03

从表 2 可以看出对于 $^8\text{Be}_{g.s.}/^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$, 得到的核温度要比其它非稳定粒子得到的结果低一些. 这是因为我们所用的 ^{12}C 束流具有 α 结团结构, ^8Be 的来源可能由激发的 ^{12}C 衰变一个 α 粒子而形成或周边反应中一个 α 粒子转移到靶核里去而产生, 也可能来自于中心碰撞形成的激发体系的蒸发. 为了将不同反应机制的贡献分开, 我们研究了 ^{58}Ni 及 ^{197}Au 两种靶子 α - α 粒子关联与两个粒子能量总和的关系, 在图 2 中给出了轰击 ^{58}Ni 靶时两个关联的 α 粒子总能量在不同能量区的关联函数. 通过这种方法我们就可以将不同反应机制对 α - α 粒子关联的贡献区分开来. 在表 3 中给出了对于 ^{58}Ni , ^{197}Au 两种靶子得到的两个关联的 α 粒子能量之和在低能和低能两种条件下的核温度. 从表中可以看出当两个关

图 2 α - α 关联函数图

联的 α 粒子的能量和在300—400MeV时,得到的核温度比较低,这是因为高能量的符合 α 粒子来自于高动能的 ${}^8\text{Be}$ 的衰变,而高能的 ${}^8\text{Be}$ 产生于周边碰撞,它可以是在周边反应中直接产生的,也可以是激发的 ${}^{12}\text{C}$ 衰变了一个 α 粒子后得到的。而周边碰撞中产生的类弹碎片的激发能比较低,因此对应的核温度就比较低。表4中,我们比较了利用这种非稳定粒子的布居比得到的核温度与靶核的关系,从表中可以看出利用这种方法得到的核温度与靶核基本无关。

表3 核温度

靶核	能区 (MeV)	核温度 (MeV)
${}^{58}\text{Ni}$	200~300	2.135 ± 0.05
${}^{58}\text{Ni}$	300~	1.62 ± 0.08
${}^{197}\text{Au}$	200~300	2.38 ± 0.07
${}^{197}\text{Au}$	300~	1.38 ± 0.1

表4 核温度 (MeV)

反应道 \ 靶核	${}^{58}\text{Ni}$	${}^{119}\text{In}$	${}^{197}\text{Au}$
${}^5\text{Li}_{g.s}/{}^8\text{Li}_{16.6\text{MeV}}$	3.07 ± 0.03	3.30 ± 0.04	3.20 ± 0.03
${}^6\text{Li}_{g.s}/{}^6\text{Li}_{2.186\text{MeV}}$	3.03 ± 0.06	2.90 ± 0.07	3.30 ± 0.06
${}^8\text{Be}_{g.s}/{}^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$	2.89 ± 0.08	2.40 ± 0.10	2.29 ± 0.09

四、小 结

本文讨论了如何用实验中得到的关联函数来提取核温度。实验是在兰州HIRFL加速器的大面积位置灵敏电离室终端上完成的。通过测量非稳定的核(${}^8\text{Be}_{g.s}$, ${}^5\text{Li}_{g.s}$)及一些核的低激发态(${}^5\text{Li}_{16.66\text{MeV}}$, ${}^6\text{Li}_{2.186\text{MeV}}$, ${}^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$),我们在统计平衡的假定下得到的核温度约为3MeV。这比一般认为的核的极限温度要低。通过研究核温度对两个关联粒子能量之和的依赖关系,我们发现由于不同反应机制对出射产物的贡献,使得到的核温度只是各种反应机制产生的激发热核的核温度的一个平均。通过研究 ${}^8\text{Be}$ 基态及激发态的衰变,我们发现对于周边反应产生的 ${}^8\text{Be}$,相应的核温度要低一些。这是因为对于周边反应,类弹产物的激发能比较低,因此相应的核温度也比较低。在实验中,我们还发现核温度参量与提取核温度的非稳定核素及靶核基本无关。

我们的实验结果表明,利用这种方法得到的有关的核温度参量基本上是合理的,但由于中能重离子核反应反应机制的复杂性,还需要进行符合测量来确定不同反应机制产生的激发热核的核温度。

本工作得到国家自然科学基金资助。作者感谢HIRFL的全体人员,他们提供了品质良好的 ${}^{12}\text{C}$ 离子束,感谢数据获取室、NIM库和公共实验室工作人员的辛勤劳动。

参 考 文 献

- [1] B. Remaud et al., *Nucl. Phys.*, **A488** (1988), 435c.
[2] Pochodzalla J et al., *Phys. Rev.*, **C35**(1987), 1695.
[3] Jing D. X et al., "Proceedings of the third Inter. Nucleus-Nucleus collisions, Saint Malo, 1988 P. 77.
[4] G. Morreto et al., LBL-24722 (1988).
[5] J. Pochodzalla et al., *Phys. Lett.*, **B161** (1985), 35.
[6] Conjeaud M. et al.; *Phys. Lett.*, **B159**(1985), 244.
[7] 戴光曦等, 高能物理与核物理, **14** (1990)659.
[8] 郝鸿飞等, 高能物理与核物理, 17(1993) 268.

Population of Unstable Nuclides and Nuclear Temperature Extraction in 46.7MeV/u ¹²C Induced Reaction

XI HONGFEI ZHAN WENLONG ZHU YONGTAI GUO ZHONGYAN HU XIAOQING

LIU GUANHUA ZHOU JIANQUN YIN SHUZH I ZHAO YOUXONG

WEI ZHIYONG FAN ENJIE

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

ABSTRACT

The experiment results of unstable nuclides decay by using the light charged particle correlation function obtained in ¹²C (46.7MeV/u) + ⁵⁸Ni experiment are reported. Under the assumption of statistical equilibrium, the nuclear temperatures are extracted, and the influence of the reaction mechanism on the nuclear temperature are also investigated.