

核温度测量与粒子能量的关系*

胡佩钢 吴和宇 靳根明 李祖玉 贺智勇 王宏伟 符彦飏
段利敏 张保国 肖志刚 戴光曦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 提取了 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{107}\text{Ag}$ 反应中后角出射的同位素 ($^6,7\text{Li}, ^3\text{He}$) 产额比温度为 5MeV . 观察到这一同位素产额比温度随阈值能量 E_{cut}/A 的增加而逐渐由 5MeV 上升到 6MeV . 为进一步研究这一变化关系, 用 Monte Carlo 方法模拟了热核蒸发粒子的过程, 表明随粒子能量的增加, 发射该能量粒子的发射源平均温度也在增加. 说明高温热核发射高能量粒子的几率大.

关键词 核温度 双同位素产额比 粒子能量

1 引言

在中能重离子核-核碰撞过程中, 大量的激发能沉积在核内, 形成高度激发的热核. 核温度是用来描述热核的一个重要物理量. 在实验中, 核温度无法直接测量得到, 一般是通过测量反应的最终产物, 在一定的统计理论假设下, 将核温度作为一个参数来提取, 具有很强的模型相关性. 实验提取核温度有三种方法, 即发射粒子能谱法、不稳定激发态布居法和双同位素产额比方法. 然而, 通过三种不同方法测量得到的核温度值, 即使在同一实验中, 也有很大的不同. 而且, 用同一种方法测量核温度时, 随测量的产物及其性质的不同, 所得结果也有很大的差异. 因此, 最近人们在核温度提取问题上作了大量的研究. 主要集中在核温度测量方法的改进、不同核温度测量方法的比较、以及核温度测量与粒子发射机制的关系等方面, 以期得到更为准确的温度值.

随着碰撞过程的碰撞参数不同, 实验中形成的高激发核将具有不同的核温度. 测量到的粒子是来自这些不同温度的发射源, 提取的核温度反映的是这些核的平均温度. 即使通过符合测量对碰撞过程进行挑选(如碰撞参数的挑选), 这些粒子发射仍将来自于热核衰变退激的不同阶段, 提取的温度反映的是热核退激过程中的平均温度. 如何测量体系的各个阶段的核温度, 推导热核的初始核温度值, 这一直是人们关心的问题. 这就需要研究与系统核温度测量关系密切的物理量. 本文提取了同位素产额比温度

1999-07-14 收稿.

* 中国科学院“九五”基础性研究重点科学基金和“百人计划”基金资助

与阈值能量的关系,并用理论模拟热核蒸发粒子过程,研究了所测量的核温度与出射粒子能量的关系.

2 实验描述

实验是在兰州重离子加速器大筒型散射室终端上进行的,采用 30MeV/u 的 ^{40}Ar 束轰击 $407\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚的 ^{107}Ag 靶. 为了测量后角出射的轻粒子和中等质量碎片并提高粒子鉴别能力,在后角 110° 处装了两套 $\Delta E(\text{Si}) - E(\text{Si})$ 望远镜. $50\mu\text{m}$ 厚的 ΔE 硅薄片大大降低了探测器的能量阈,各种粒子的探测阈(即: $50\mu\text{m}$ 厚的硅片能阻止的粒子能量)分别为: $2(^1\text{H}), 8(^4\text{He}), 16(^7\text{Li}), 23(^9\text{Be})$ 和 $31(^{11}\text{B})\text{MeV}$ 等. 阻止型探测器 $E(\text{Si})$ 也选用半导体硅片使其具有好的能量分辨. 该望远镜能分辨出 $p, d, t, ^3\text{He}, ^4\text{He}, ^6\text{He}, ^6\text{Li}, ^7\text{Li}, ^7\text{Be}, ^9\text{Be}$ 等同位素. 望远镜的能量刻度采用 $\text{ThC-C}'\alpha$ 放射源和精密脉冲发生器来完成,对于 E 探测器,还用能损反推法进行了检验.

3 发射温度与粒子动能的关系

一个达到热平衡和化学平衡的核,在 freeze-out 阶段,单粒子和复合粒子之间无相互作用. 根据 Albergo 的理论^[1],核温度可以由双同位素产额比导出^[2-5]: $R_{\text{iso}} = \frac{Y(A_i, Z_i)/Y(A_i + \Delta A, Z_i + \Delta Z)}{Y(A_j, Z_j)/Y(A_j + \Delta A, Z_j + \Delta Z)}$. $Y(A_i, Z_i)$ 是质量数和电荷数分别为 A_i 和 Z_i 的出射碎片的产额. 其分子分母应选择相同的 ΔA 和 ΔZ ,从而消除质子、中子化学势的影响. 同时,为了尽量减少库仑位垒的影响,应选取 $\Delta Z = 0$ 和 $\Delta A = 1$ 的同位素组.

得到产额比后,其相应的温度为

$$T_{\text{iso}} = \frac{B}{\ln(aR_{\text{iso}})}, \quad (1)$$

式中, B 是结合能参数, a 是依赖于基态核自旋统计权重的统计因子. 它们的计算式为

$$B = B_E(A_i, Z_i) - B_E(A_i + \Delta A, Z_i + \Delta Z) - B_E(A_j, Z_j) + B_E(A_j + \Delta A, Z_j + \Delta Z),$$

$$a = \frac{[2S(A_j, Z_j) + 1]/[2S(A_j + \Delta A, Z_j + \Delta Z) + 1]}{[2S(A_i, Z_i) + 1]/[2S(A_i + \Delta A, Z_i + \Delta Z) + 1]} \times \left[\frac{A_j/(A_j + \Delta A_j)}{A_i/(A_i + \Delta A_i)} \right]^\eta$$

式中, $B_E(A_i, Z_i)$ 为质量数、电荷数分别为 A_i, Z_i 的原子核的结合能. $S(A_i, Z_i)$ 为同位素 (A_i, Z_i) 的基态自旋. 指数 η 介于 1.5(体发射)和 1.0(面发射)之间. 由于不稳定粒子或碎片的相继衰变和另一些被简单理论模型忽略的过程改变了平衡时的真实产额比值,基于这一思想, M. B. Tsang 引入了修正因子 k ^[2] ($R_{\text{app}} = kR_0$. 其中, R_0 为核系统达到平衡时的同位素产额比值, R_{app} 为其测量值). 与此对应的核系统达到热平衡时的温度 T_0 和测量的表观温度 T_{app} 的关系为 $\frac{1}{T_{\text{app}}} = \frac{1}{T_0} + \frac{\ln k}{B}$. 修正因子 k 可以通过实验提取或通过跟随衰变理论计算得到^[2,6]. B 越大修正项 $\ln k/B$ 越小,实际上一般只选用 $B > 10\text{MeV}$ 的同位素组. 对于同位素组 ($^{6,7}\text{Li}, ^{3,4}\text{He}$), 它的同位素产额比温度计算公式为^[5] $T =$

$$13.32 / \ln \left[2.18 \times \frac{Y_{6\text{Li}}/Y_{7\text{Li}}}{Y_{3\text{He}}/Y_{4\text{He}}} \right], \text{ 其修正因子 } \ln k/B = -0.0051 \text{ MeV}^{-1}$$

同位素产额比提取核温度经常是在前角进行的,这是为了增加统计和能测量到更多种类的同位素.但是前角产物产生机制复杂,非平衡成分占有很大的比重,因此,这些测量产物中多数不是达到热平衡和化学平衡的“热核”发射的,而是碰撞过程的产物.碰撞过程中产生的核可以达到化学势的平衡,但不一定达到热的平衡,这些核可以是 0° 附近的类弹碎裂,也可以是类 DIC 耗散碎裂产物.集体运动的核子与费米运动结合,碰撞过程粒子出射产物仍有温度的概念,可以看成是系统在碰撞过程的平均温度.在本次实验中,测量的后角 110° 的同位素产物,虽然减少了统计,但它们绝大部分来自于平衡热核蒸发,因此得到的类靶温度受到的干扰较小,所测温度是较单纯的热核温度.选取 $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Ag}$ 反应中实验室系 110° 的同位素产物: $^3\text{He}, ^4\text{He}, ^6\text{Li}, ^7\text{Li}$. 用(1)式计算得到温度值为 $T_{\text{app}} = 5.1 \text{ MeV}$. 经文献[2]引入的 k 因子修正后得到实际温度值为 $T_0 = 4.977 \text{ MeV}$.

为研究核温度与出射粒子能量的关系,提取了双同位素($^{6,7}\text{Li}, ^{3,4}\text{He}$)产额比核温度随能量 E_{cut}/A 的变化规律. E_{cut}/A 是粒子能谱的单核子能量阈,即:只计算单核子能量 $E > E_{\text{cut}}$ 的同位素产额.从图 1 中看到产额比随 E_{cut}/A 的增大逐渐减小.这一变化对应温度的变化显示在图 2 中,从图中看到温度值由 5 MeV 逐渐上升到 6 MeV .

为了能更清楚地理解这一核温度的变化规律,我们用 Monte Carlo 方法模拟了热核蒸发粒子衰变过程.

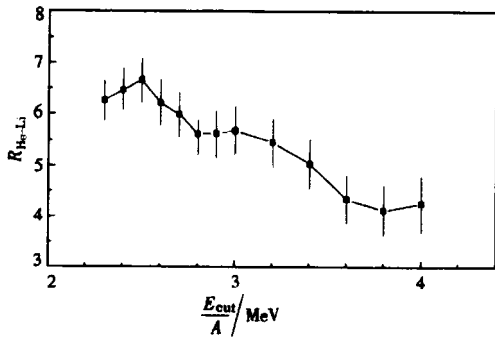


图 1 $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Ag}$ 反应中,实验室系 110° 出射的双同位素($^{6,7}\text{Li}, ^{3,4}\text{He}$)产额比随 E_{cut}/A 的变化

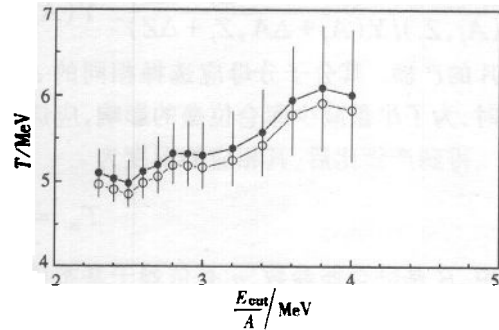


图 2 $30 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Ag}$ 反应中,提取的双同位素($^{6,7}\text{Li}, ^{3,4}\text{He}$)产额比温度随 E_{cut}/A 的变化
○为经 k 因子修正后的结果,●为没有修正的结果.

统计理论表明,高激发热核蒸发粒子过程,可用 Ericson 统计公式来描述^[7].在实验室后角,粒子和碎片来自类靶热核的发射.考虑到粒子受靶余核的库仑排斥作用的影响,便可得到发射源质心系中发射粒子的截面由下式给出^[8,9]:

$$\begin{cases} \frac{d^2\sigma}{d\Omega_{\text{cm}}dE_{\text{cm}}} = \frac{N}{4\pi T^2} (E_{\text{cm}} - E_C) \exp[-(E_{\text{cm}} - E_C)/T] & \text{(面发射),} \\ \frac{d^2\sigma}{d\Omega_{\text{cm}}dE_{\text{cm}}} = \frac{N}{2(\pi T)^{3/2}} (E_{\text{cm}} - E_C)^{1/2} \exp[-(E_{\text{cm}} - E_C)/T] & \text{(体发射),} \end{cases} \quad (2)$$

其中, E_C 为粒子的库仑能, T 为核温度, N 是归一化常数. 转换到实验室系有:

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} = \left(\frac{E}{E_{cm}}\right)^{1/2} \frac{d^2\sigma}{d\Omega_{cm} dE_{cm}}, \quad (3)$$

式中, $E_{cm} = E + E_0 - 2(EE_0)^{1/2} \cos\theta_{lab}$, E 为粒子的实验室系能量, $E_0 = \frac{1}{2}mv_0^2$ 为粒子以源速度运动的动能.

实验中探测到的粒子来自于大量不同的热核发射, 根据(3)式可知, 这些热核发射某一粒子到实验室系某一角度的几率与热核发射源的 3 个参数有关, 即库仑位垒 E_C 、温度 T 和源速度 v_0 . 假设热核发射源温度分布为 $f(T)$ 函数形式, 按此函数抽样得到发射源温度 T , 再选择确定 E_C 和 v_0 , 那么发射某一粒子的能量 E 将由公式(3)抽样得到. 图 3 中显示了按以上方法模拟得到的实验系 110° 出射的 α 粒子能谱. 其中源温度分布函数取高斯分布形式, 中心值为 5MeV, 宽度 $\sigma = 1.7$ MeV. 参考实验中的测量结果, 源速度取 1.5cm/ns, 库仑位垒取 11MeV. 模拟过程中计算了不同粒子能量区间的热核发射温度的平均值, 其值由右边纵坐标标度. 从图中可以看出, 随出射粒子能量的增加, 发射源平均温度也单调递增, 显示出高温热核发射高能粒子的几率大, 即温度高的热核在能谱高能端的贡献要大于温度相对低的热核. 因此当提高能量阈值 E_{cut} 时, 也就增加了更高温度的热核发射粒子的比例, 计算得到的双同位素产额比温度就会逐渐增加, 显示出如图 2 所示的变化. 最近的研究^[5]指出, 这一温度随粒子出射能量的变化也可反映核的蒸发退激冷却过程. 从以上论述可知, 当激发核处在蒸发退激的早期, 其温度较高, 蒸发出射粒子的能量较高; 随着热核粒子蒸发, 核温度将降低, 出射粒子的能量也会降低. 因此, 能量高的同位素产物来源于蒸发早期的几率大, 对应的热核温度也较高. 而从同位素能量变化反映出的温度的逐渐变化正是热核通过蒸发粒子逐渐冷却的过程.

在实验中, 还通过拟合 110° 处出射粒子的能谱提取了核温度值, 所得结果为 ^3He : 4.1MeV, ^4He : 4.5MeV, ^7Li : 6.6MeV, ^9Be : 6.4MeV. 近来关于出射粒子发射次序的研究^[10]指出, 较重的碎片要早于轻粒子发射. 因而从 ^7Li 和 ^9Be 测得的温度应更接近热核的初始温度或实验产生的热核的最高温度. 另一方面, 通过提高阈值能量, 从而增加同位素中早期产物的比率, 将双同位素产额比所测温度提高到了 6MeV, 但是, 由于热核即使在很低的激发能时也可以出射高能粒子, 对能谱高能部分有贡献, 所以提高 E_{cut} 的途径是有限的, 所得温度低于初始温度. 在这一意义上来说, 本次实验中两种方法所测的温度值在趋向初始温度或所产生热核的最高温度时变得更加一致.

4 小结

提取了 30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{107}\text{Ag}$ 反应中后角出射的同位素 ($^{6,7}\text{Li}$, $^{3,4}\text{He}$) 产额比温度, 得

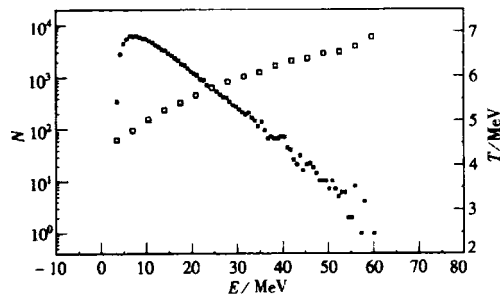


图 3 模拟粒子蒸发过程所得能谱 (实心方点) 和各能量区间粒子发射源的平均温度 (空心方点)

到温度值为 5MeV. 观察到同位素温度随阈值能量 E_{cut}/A 的增加而逐渐上升, 由 5MeV 增加到 6MeV. 为进一步研究这一变化关系, 用 Monte Carlo 方法模拟了热核蒸发粒子的过程, 表明随粒子能量增加, 粒子发射源的平均温度也在增加.

从同位素产额比提取温度与阈值能量的关系和理论模拟热核蒸发粒子过程, 得到相似的结果, 即温度高的热核发射高能量粒子的几率较高, 随着热核温度的降低, 出射粒子的平均能量也将降低. 因此, 高能粒子来自热核退激早期或高温度热核的几率高. 同时, 提取同位素产额比温度与阈值能量的关系也是实验测量中一种可行的途径. 可以想见, 由于高能粒子发射更早, 由它提取得到的核温度值应该更接近激发核的初始温度, 这给我们正确地提取和推导热核初始温度, 寻找核的极限温度提供了有意义的信息和方法.

参考文献(References)

- 1 Albergo S et al. IL Nuovo Cimento, 1985, **A89**:1
- 2 Tsang M B et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:3836
- 3 Tsang M B et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:R1057
- 4 Wada R et al. Phys. Rev., 1997, **C55**:227
- 5 XI H et al. Phys. Lett., 1998, **B431**:8—14
- 6 XI H et al. Michigan State University, MSUCL - 1055, January 1997
- 7 Ericson T. Adv. Phys., 1960, **9**:425
- 8 Awes T C et al. Phys. Rev., 1982, **C25**:2361
- 9 Wada R et al. Phys. Rev., 1989, **C39**:497
- 10 HE ZhiYong et al. Science in China(Series A), 1998, **14**(11):1228

Relationship between Measurement of Nuclear Temperature and Energy of Particles *

HU PeiGang WU HeYu JIN GenMing LI ZuYu HE ZhiYong WANG HongWei
FU YanBiao DUAN LiMin ZHANG BaoGuo XIAO ZhiGang DAI GuangXi

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

Abstract Temperature of 5MeV was extracted from double isotope ratios $\left[\frac{Y_{6\text{Li}}/Y_{7\text{Li}}}{Y_{3\text{He}}/Y_{4\text{He}}} \right]$ measured at backward angle in laboratory system in the reaction $30\text{MeV}/u \text{ } ^{40}\text{Ar} + \text{}^{m}\text{Ag}$. It is observed that this temperature increases continuously from 5MeV to 6MeV with the increase of the energy threshold E_{cut}/A . A Monte Carlo simulation on particle emission process of hot nuclei shows that the average temperature of hot nuclei as emission sources goes up gradually with increasing energies of emitted particles. It is demonstrated that hot nuclei with higher temperature are more probable to emit higher energy particles.

Key words nuclear temperature, double isotope ratio, energy of particle

Received 14 July 1999

* Supported by Major Subject and 'One Hundred Persons Project' of The Chinese Academy of Sciences