

核反应过程中温度参量的提取*

魏志勇 诸永泰

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 核反应中,核温度参量与核反应中的轻粒子的能谱、粒子非稳态布居及同位素产额有直接的依赖关系,通过有关物理量的测量可以实现核温度参量的提取.

关键词 核温度 轻粒子能谱 粒子非稳态布居 同位素产额

分类号 O571.4

1 引言

随着中高能重离子核反应研究的广泛开展,与原子核物质态方程以及原子核碰撞中核物质压缩、热化和衰变等集体性质有关的多重碎裂的研究^[1,2]引起了人们的广泛兴趣.原子核集体性质的研究中,往往采用统计模型的方法^[3],无论哪种模型,温度都是一个很关键的参量.此外,目前许多前沿研究课题都和核温度的测量密切相关,如最近的有关原子核液-气相变的结果^[4],就是和核温度的测量有着直接的关系.

尽管核温度的确定对于核物理研究中的许多问题有重要的影响,可是目前核温度的测量方法并不是很成熟的,几种不同的测量方法,得到的温度参量相差比较大.甚至对核温度的一些概念的确立也不完善,其中一个很关键的问题是在原子核反应中是否形成了平衡态,或者达到了局部平衡,只有建立了平衡态,才会有温度的概念.到目前为止,实验研究和理论工作都无十分肯定的答案.在这一问题上大家采取了一种态度,就是假定在有关的核反应中达到了热平衡和化学平衡,由此来研究一些有关的问题.按热力学和统计物理的温度定义,核温度应该为

$$\frac{1}{T(E)} = \frac{\partial [\ln \Omega(E)]}{\partial E} \quad (1)$$

实际上原子核体系的状态数 $\Omega(E)$ 无法

知道,因此这种严格意义上的核温度也是得不到的,大家总是寻找一些近似的方法,通过测量反应过程中的其它物理量来提取核温度参量.核温度参量的提取主要有以下三种方法:(1)通过测量发射轻粒子的能谱,拟合能谱时得到的斜率作为核温度,这种核温度称为表观核温度(apparent temperature);(2)通过非稳态粒子的布居比提取的布居核温度;(3)利用核反应中发射产物的同位素产额比得到的同位素核温度.

2 表观核温度

在入射弹核能量接近库仑位垒时,会出现轻粒子引起的复合核过程和重离子引起的熔合反应,在这些过程中复合体系的内部自由度充分地驰豫,复合体系达到热平衡,然后通过蒸发中子和轻带电粒子退激,测量发射产物的能谱可以得到核温度.随着入射能量向中能区过渡,复合核的概念也有所变化,通常假定在核反应过程中形成了热平衡或局部平衡的发射源,由面发射^[5]

$$\frac{d\sigma}{d(E)} \propto (E_{\text{cm}} - B) \exp\left(\frac{E_{\text{cm}} - B}{T}\right) \quad (2)$$

或体发射^[5]

$$\frac{d\sigma}{d(E)} \propto \sqrt{E_{\text{cm}} - B} \exp\left(\frac{E_{\text{cm}} - B}{T}\right) \quad (3)$$

得到反应产物的能谱,其中 E_{cm} 为质心系中发

* 国家自然科学基金资助课题.

1996 - 02 - 15 收稿,1997 - 02 - 18 收到修改稿.

射粒子的动能, B 为库仑位垒. 在中能区, 由于入射能较高, 碰撞时间短, 整个反应体系达到平衡不太现实, 仅仅能达到一种局部平衡, 在实验室系中将所测的轻粒子谱分解为多个发射源, 一般可用类靶、类弹和中间发射速度的三个源来拟合实验能谱. 利用轻粒子的发射谱所提取的核温度在温度较低时可靠性比较好, 一般不确定性在 10% 左右. 在中能区, 由于多源拟合所用的参数比较多, 提取的核温度的偏差很大, 在核温度 T 接近库仑位垒的大小时, 这种方法的不确定性可达 100%, 而这一温度范围正是研究核态方程、热核性质和多重碎裂等问题时最感兴趣的范围. 而在更高的能区, T 的不确定性又再度减小, 一般不确定性可达 10% 左右, 有人建议在很高的温度下可由拟合高能质子或 π^- 能谱来提取核温度.

利用核反应中的 p、d、t、 α 和 ^3He 等轻粒

子能谱来拟合时, 不同的发射角度会有不同的温度参量, 这一现象可以归结为热斑的形成并随着转动而冷却^[5], 由不同种类的粒子得到的温度相差不大.

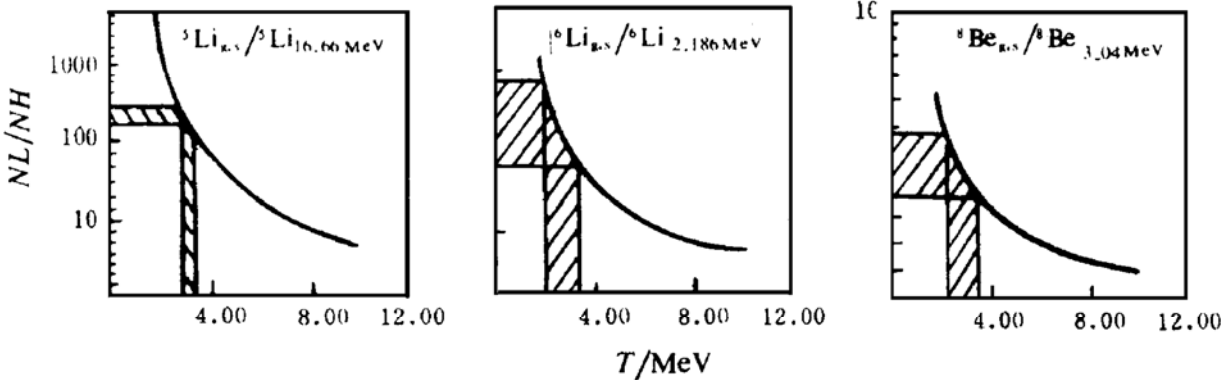
3 布居核温度

多年以前, Morrissey D J 等人^[6]通过测量 γ 不稳定的 Li、Be 和 B 碎片的产额和对应基态的碎片产额比来提取核温度. 这种方法所依赖的原理很简单, 认为在体系平衡时处于原子核各能级上的粒子分布为

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{\epsilon_i}{T}\right) \quad (4)$$

如果在发射过程中仍能保持这样一种分布, 则通过测量两能级上粒子的相对产额比就可以得到核温度

$$R = \exp\left(-\frac{\epsilon_i - \epsilon_0}{T}\right) \quad (5)$$



图示 非稳态粒子相对布居与核温度的关系

在核反应中往往有较多的级联衰变, 会使产额比发生变化, 致使核温度测量有误. 由于这种原因, 利用 γ 不稳定核的产额比来提取核温度受到很大限制, 一般仅能在 1 MeV 以下使用. 在 T 较小时, 改用轻粒子的发射谱提取核温度会更方便些. 此外, 利用非稳态粒子布居比测量核温度的方法已得到广泛地使用^[7]. 通常, 两个分得很开的孤立能级的相对产额比为

$$R = \frac{2S_2 + 1}{2S_1 + 1} \exp(-\Delta E/T)$$

$$= \frac{2S_2 + 1}{2S_1 + 1} \exp[-(\epsilon_2 - \epsilon_1)/T] \quad (6)$$

其中 $\Delta E = \epsilon_2 - \epsilon_1$ 为非稳态核两激发态的能级差, S_i 为自旋. 近年来广泛使用的轻粒子关联测量方法, 可以很好地测量 ^4He 、 ^5Li 或 ^8Be 等轻核的激发态与基态的相对布居比. 尽管这里仍然要求考虑级联衰变对所测产额比的影响, 但此时这种影响比 γ 不稳定性方法要小得多, 因此这种方法对测量近库仑位垒大小的核温度比较可靠. 由于用测量轻粒子关联函数的方法来确定非稳态粒子的产额比时,

关联本底函数的扣除会带来一些误差,选择两能级的能量相差大的两个态来测量,有利于粒子非稳态布居比核温度的提取,如上图所示^[8].

4 同位素温度

意大利的 Albergo S 等人^[9]于 1985 年提出了这种测量核温度的方法,可是在很长一段时间内没有受到重视,直到近来才有一些实验用它来提取核温度.它所依赖的物理思想也比较简单:在一定的温度下,原子核体系实现了热平衡和化学平衡,在 freeze-out 阶段单粒子和复合粒子之间无相互作用,由半经典方法可得,质量数为 A ,电荷数为 Z 的粒子的密度分布为

$$\rho(A, Z) = \frac{(2\pi m_0 AT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \omega(A, Z, T) \cdot \exp\left(\frac{Z\mu_p + (A - Z)\mu_n + B(A, Z)}{T}\right) \quad (7)$$

式中, $\omega(A, Z, T)$ 为复合粒子内部的配分函数, μ_p 和 μ_n 分别为质子和中子的化学势, $B(Z, A)$ 为结合能. 假定复合粒子的内部激发态处于基态,且满足 $A_1 + A_4 - A_2 - A_3 = 0$, 如果不计级联衰变的影响,则同位素产额比和核温度之间的关系为

$$R = a \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (8)$$

选择不同的同位素产额比对应的参数 a 和 b 如下表所示.

表示

$Y(A_1, Z_1)/Y(A_2, Z_1)$	$Y(A_3, Z_2)/Y(A_4, Z_2)$	a	b
${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$	${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$	2.18	13.33
	${}^7\text{Li}/{}^8\text{Li}$	1.98	18.54
	${}^9\text{Be}/{}^{10}\text{Be}$	0.38	13.77
	${}^{10}\text{B}/{}^{11}\text{B}$	0.86	9.12
	${}^{11}\text{B}/{}^{12}\text{B}$	1.11	17.21
	${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$	${}^7\text{Li}/{}^8\text{Li}$	0.91
${}^9\text{Be}/{}^{10}\text{Be}$		0.17	0.44
${}^{10}\text{B}/{}^{11}\text{B}$		0.39	-4.21
${}^{11}\text{B}/{}^{12}\text{B}$		0.51	3.88
${}^7\text{Li}/{}^8\text{Li}$	${}^9\text{Be}/{}^{10}\text{Be}$	0.19	-4.78
	${}^{10}\text{B}/{}^{11}\text{B}$	0.43	-9.42
	${}^{11}\text{B}/{}^{12}\text{B}$	0.56	-1.34
${}^9\text{Be}/{}^{10}\text{Be}$	${}^{10}\text{B}/{}^{11}\text{B}$	2.25	-4.64
	${}^{11}\text{B}/{}^{12}\text{B}$	2.92	3.44
${}^{10}\text{B}/{}^{11}\text{B}$	${}^{11}\text{B}/{}^{12}\text{B}$	1.30	8.09

R 的不确定性所导致的 T 的不确定性如下

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{T \Delta R}{bR} \quad (9)$$

由此可以看出 b 大时,定出的 T 误差小.

5 结束语

到目前为止,所采用的上述测量核温度

的三种方法,各有特点,应用都比较普遍,使用时间最长的是从发射粒子能谱提取斜率参量的方法.比较起来,这种方法在中能时的可靠性也最差,一般来讲这种方法测得的核温度偏高一些.近年来的一些研究工作通过对集体流及其它一些问题的研究,对这种测温方法进行了一些讨论.通过非稳态粒子布居比提取布居核温度和利用核反应中发射产

物中的同位素产额比得到同位素核温度,这两种方法所依赖的测温原理相同,测得的核温度也比较合理.此外,同位素温度的测量手段也比较简单,容易实现.

核温度测量既反应了目前核物理、天体物理及相关学科前沿的研究进展,同时又涉及到许多研究中的前沿和基础.至今还有许多人仍在努力,寻找更好的测量核温度的方法,这个问题的最后解决必将伴随着重离子核物理研究的一系列重大问题的突破.

参 考 文 献

- 1 Suraud E, Gregoire C, Tamain B. Birth, Life and Death of Hot Nuclei. *Prog Part Nucl Phys*, 1989, 23: 357~467
- 2 Kunde G J, Pochodzalla J, Aichelin J et al. Emission Temperatures in $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$ Reactions in the Limiting Fragmentation Regime. *Phys Lett*, 1991, B272: 202~206
- 3 Hahn D, Stöcker H. The Quantum Statistical Model of Fragment Formation: entropy and temperature extraction in heavy ion collisions. *Nucl Phys*, 1988, A476: 718~772
- 4 Pochodzalla J, Mohlenkamp T, Rubehn T et al. Probing the Nuclear Liquid-gas Phase Transition. *Phys Rev Lett*, 1995, A75: 1040~1043
- 5 Awes T C, Poggi G, Gelbke C K et al. Precompound Emission of Light Particles in the Reaction $^{16}\text{O}+^{238}\text{U}$ at 20 MeV/nucleon. *Phys Rev*, 1981, C24: 89~110
- 6 Morrissey D J, Bloch C, Benenson W et al. Thermal Population of Nuclear Excited States. *Phys Rev*, 1986, C34: 761~763
Bloch C, Benenson W, Kashy E et al. Effect of ^8Be Decay on Nuclear Temperature Measurements. *Phys Rev*, 1986, C34: 850~857
- 7 Pochodzalla J, Friedman W A, Gelbke C K et al. Nuclear Temperatures and the Population of Particle-unstable States of ^6Li in ^{40}Ar Induced Reactions on ^{197}Au at $E/u = 60$ MeV. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 177~180
- 8 郗鸿飞, 詹文龙, 诸永泰等. 46.7 MeV/u ^{12}C 诱发核反应中非稳态产物的布居及核温度的提取. *高能物理与核物理*, 1993, 17: 294~299
- 9 Albergo S, Costa S, Costanzo E et al. Temperature and Free-nucleon Densities of Nuclear Matter Exploding into Light Clusters in Heavy-ion Collisions. *Nuovo Cimento* 1985, A89: 1~28

Extraction of Nuclear Temperatures

WEI Zhiyong ZHU Yongtai

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract In this paper we present many observables of the nuclear reactions related to the temperature parameter, and several methods which devoted to the establishment of the nuclear temperature thermometer.

Key Words nuclear temperature light particle energy spectrum particle unstable state population isotope yields