

30MeV/u ^{40}Ar 引起的反应中核温度参数的提取*

徐瑚珊 诸永泰 苟全补 魏志勇 卢俊 王琦
李松林 张玉虎 靳根明 吴钟立 谢元祥

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用同位素产额比方法,提取了 30MeV/u ^{40}Ar 轰击 ^{58}Ni , ^{64}Ni 和 ^{115}In 的反应中中等质量碎片 (IMFs: $3 \leq Z \leq 8$) 的发射体的核温度参数. 给出了“表观”温度与一些物理量的依赖关系以及对边馈 (side-feeding) 效应的影响进行修正后的温度参数. 并就此进行了简单的讨论.

关键词 核温度 同位素产额比 中等质量碎片 周边碰撞

1 引言

根据核子-核子间的相互作用力与范德瓦尔斯力的相似性,很早就有人提出了核物质的液-气相变的概念^[1,2]. 随后,人们从理论上和实验上都做了很多努力,试图找到核物质相变的信息和证据. 尤其在 80 年代初,实验观察到的质子以及重离子引起的核反应中出射碎片的元素(或质量)分布所表现出来的乘幂规律^[3],使得核物质的液-气相变的研究引起了人们很大的兴趣. 但由于对其解释的不唯一性,这种现象还不能作为相变发生的确切证据. 后来,实验中观测到的 IMF 多重性与 Z_{bound} 的关系^[4]也似乎显示出了核物质气化的特征. 但真正再一次激发了人们对这一问题研究兴趣的,还是 J. Pochodzalla 等人给出的加热曲线 (caloric curve)^[5].

该加热曲线似乎表明了核物质的液-气相变的发生,但这一结论并没有被人们所普遍接受,反而引起了激烈的争论. 争论的焦点之一是提取的核温度参数的可靠性. 这些争论促进了人们对核温度提取方法的广泛研究.

目前,核碰撞过程中核温度提取的方法主要有通过对发射产物能谱斜率的拟合^[6,7]、出射粒子激发态的相对布居比^[8]以及出射碎片的同位素产额比^[5,9-11]三种方法. 通过能谱的形状提取的核温度易受集体运动的影响^[12],后两种方法则对集体运动不灵敏. 但由

1997-07-21收稿

* 国家自然科学基金(19205006)和近代物理研究所所长基金资助

后两种方法提取的核温度会出现一对激发态与另一对激发态或一组同位素与另一组同位素所给出的温度值不同^[13,14]. 对于这种情况, 理论计算表明, 来自于激发态的退激以及非稳态核的粒子发射这种边馈 (side-feeding) 效应的影响非常重要^[13,14]. 另外, 非平衡成份的贡献也会造成一定的影响^[7]. 由于用非稳态布居方法提取核温度, 在实验上要求有高的能量分辨能力和高的统计, 难度要大些. 而用同位素产额比方法主要要求探测系统有好的同位素分辨能力, 实验上实现起来相对要容易一些. 本文将给出用同位素产额比方法提取的 30MeV/u ^{40}Ar 引起的反应中有关中等质量碎片发射体的核温度参数.

2 同位素产额比提取核温度的方法

根据文献 [9] 提供的方法, 只要发射体达到了化学平衡或热平衡, 人们就可以通过测量其所发射的碎片的同位素产额比来获得该发射体的核温度参数. 同位素产额比的定义为:

$$R = \frac{Y(A_i, Z_i) / Y(A_i + \Delta A, Z_i + \Delta Z)}{Y(A_j, Z_j) / Y(A_j + \Delta A, Z_j + \Delta Z)}, \quad (1)$$

这里, $Y(A_i, Z_i)$ 为同位素 (A_i, Z_i) 的总产额. 为简化计算, 一般只选择那些可消除化学势影响的 ΔA 和 ΔZ 值. 同时为减小库仑势的影响, 常取 $\Delta Z = 0, \Delta A = 1$. 而该产额比 R 与发射源的核温度 T 有如下关系:

$$T = \frac{B}{\ln(aR)}, \quad (2)$$

其中 B 称为结合能参数, a 为与基态自旋相关的统计因子, 这两个参数可由各相关碎片的基态自旋和结合能算出^[9-11,14]. 如果式 (1) 中的 R 值为由实验测量的同位素产额直接算出, 则称所得的核温度 T 为表观温度 T_{app} , 对应的 R 表示为 R_{app} ; 相对地, 由初始基态碎片的产额导出的温度 T 则用 T_0 来表示 (对应的 R 写为 R_0). 显然, 人们不可能从实验上直接导出 T_0 , 由于边馈等效应的影响而只能得到 T_{app} . 如果能从理论上或某种方法对其进行修正, 就可以导出更接近 T_0 的温度值. 为此, 人们对各种“同位素温度计” (指的是一组同位素产额比) 的修正进行了探讨^[11,14,15]. 为了对边馈效应进行修正, 文献 [11] 中定义了一个修正因子 κ , $R_{\text{app}} = \kappa R_0$. 于是可得到 T_0 与 T_{app} 间的关系式:

$$\frac{1}{T_{\text{app}}} = \frac{1}{T_0} + \frac{\ln \kappa}{B}. \quad (3)$$

文献 [11] 中还列出了 18 组同位素产额比计算核温度所需的各种参数值及对应的 κ 值.

3 实验测量及结果

利用兰州重离子加速器国家实验室的 HIRFL 所提供的 30MeV/u ^{40}Ar 束流, 分别轰击

了 ^{58}Ni , ^{64}Ni 和 ^{115}In 三个同位素靶, 靶厚均约为 $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$. 在实验室角度 $5^\circ - 13^\circ$ 范围内, 用固体探测器粒子鉴别望远镜对 $3 \leq Z \leq 13$ 的各碎片进行了很好的同位素鉴别. 所用探测器组合为: $45\mu\text{m}(\text{Si}) + 510\mu\text{m}(\text{Si}) + 3000\mu\text{m}(\text{Si}) + 4\text{cm}(\text{CsI}(\text{Tl}))$. 前三块均为透射型金硅面垒探测器, 后一块为 $\text{CsI}(\text{Tl})$ 晶体. 后者的信号通过光二极管引出. 有关该粒子鉴别望远镜的性能的描述详见文献 [16].

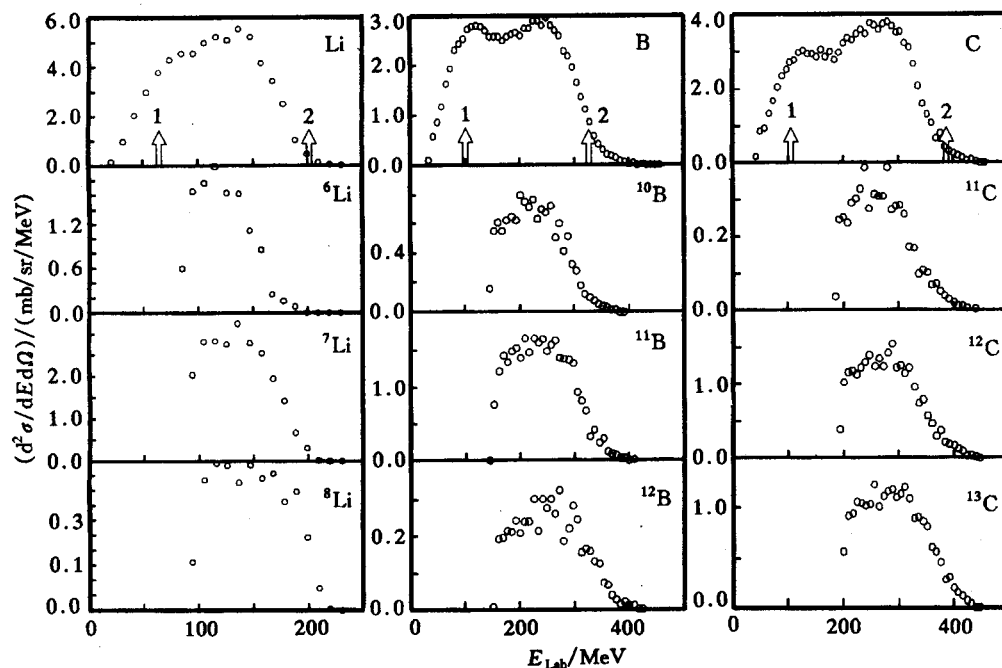


图 1 $30\text{MeV}/\text{u}$ $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中在 $\theta_L = 7^\circ$ 出射的元素 Li、B 和 C 以及它们几个同位素的能谱

作为例子, 图 1 给出了 $30\text{MeV}/\text{u}$ $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中在 $\theta_L = 7^\circ$ 出射的元素 Li、B 和 C 以及下面式 (4) 计算中所用的几个产额的同位素的能谱. 其中同位素能谱的低能截断是由于第一块探测器给不出同位素分辨造成的 (但能给出元素分辨). 显然, 图中所给的元素

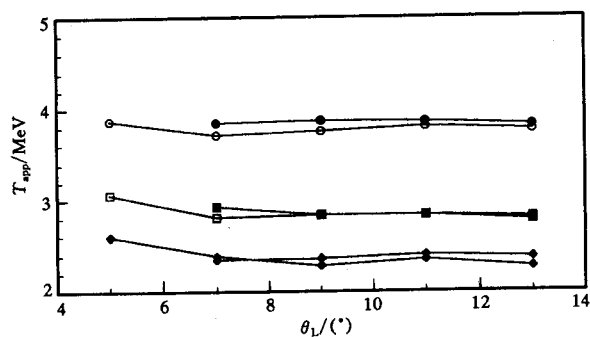


图 2 $30\text{MeV}/\text{u}$ ^{40}Ar 引起的反应中 Li、B 和 C 的同位素产额比提取的表观温度参数与反应靶和实验室出射角度 θ_L 的关系

菱形、方形和圆分别表示 T_{Li} 、 T_{B} 和 T_{C} 的值, 空心和实心符号分别对应轰击 ^{58}Ni 和 ^{115}In 靶的结果.

能谱中有高能和低能两组成份, 箭头 1 对应的是全弛豫能量, 箭头 2 指示的是对应束流速度的能量. 可以看出同位素能谱基本对应元素能谱的高能部分. 换句话说, 本文讨论中所采用的同位素产额比仅对应于能谱高能成份, 主要是周边过程的贡献.

图 2 中给出了利用 Li、B 和 C 的同位素产额比提取的核温度 T_{Li} 、 T_{B} 和 T_{C} . 各温度的定义分别为:

$$\begin{aligned} T_{\text{Li}} &= 5.22 / \ln \left[0.91 \frac{Y(^7\text{Li})/Y(^8\text{Li})}{Y(^6\text{Li})/Y(^7\text{Li})} \right], \\ T_{\text{B}} &= 8.09 / \ln \left[1.30 \frac{Y(^{11}\text{B})/Y(^{12}\text{B})}{Y(^{10}\text{B})/Y(^{11}\text{B})} \right], \\ T_{\text{C}} &= 13.77 / \ln \left[7.92 \frac{Y(^{12}\text{C})/Y(^{13}\text{C})}{Y(^{11}\text{C})/Y(^{12}\text{C})} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

由式 (4) 得到的温度值是表观温度. 其误差来自于同位素产额 Y 的误差, 同时又决定于式 (2) 中 B 参数的大小, $\Delta T/T = -(T/B) \cdot (\Delta R/R)$. B 越大, R 的误差对 T 的影响就越小. 图 2 中列出的核温度参数值的误差在 $\pm 0.03\text{MeV}$ 到 $\pm 0.04\text{MeV}$ 之间. 图 2 中给出了 ^{58}Ni 和 ^{115}In 靶不同出射角度下的结果. 可以看出, 发射源的温度基本与靶无关. 因为所用的同位素产额仅为能谱的高能部分的积分值, 产物主要来源于周边反应, 因此主要决定于弹核的性质. 还有, 对所选取的 3 个同位素温度计, 除 5° 处提取的核温度值稍高于其它角度下的 T_{app} , 对同一组同位素是基本一致. 这也许说明, 在这一角区中, 能谱的高能部分产生的机制是基本一致的. 另外, 由于选择的是同一元素不同同位素间的产额比, 如果将对应的核温度近似看成为发射该元素的发射体的核温度, 还可观察发射体的温度与出射碎片的关系. 由图中 T_{Li} 、 T_{B} 和 T_{C} 的值似乎有 T 随 Z 增大而增大的趋势. 表观温度与出射碎片的相关性, 原因很复杂, 这里不作进一步的讨论.

如前所述, 用同位素产额比方法提取核温度, 边馈效应的影响是较大的. 下面讨论考虑边馈效应和不考虑边馈效应时, 不同的同位素温度计的结果.

利用文献 [11] 给出的参数, 对文献中给出的 18 个同位素温度计进行了计算. 由于对这些温度计考虑了边馈效应, 可以得到 T_0 值. 作为例子, 图 3 中给出了由 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中 $\theta_{\text{L}} = 9^\circ$ 处出射的碎片的同位素产额比导出的 T_{app} 和 T_0 值随 B 参数的变化曲线.

由图 3 可以看出, T_{app} 是与所选的同位素组合强烈相关的, 而 T_0 则趋向一平均值 $\langle T_0 \rangle \approx 4\text{MeV}$. 而对于 T_{app} , 尽管各组同位素组合所得的值有很大的差别, 但其平均值也接近于 4MeV (详见表 1). 为了保证结果的可靠性, 这里选取的均是 $B > 10\text{MeV}$ 的同位素组合. 表中列出 $\langle \Delta T \rangle$ 值为各 T 与平均值

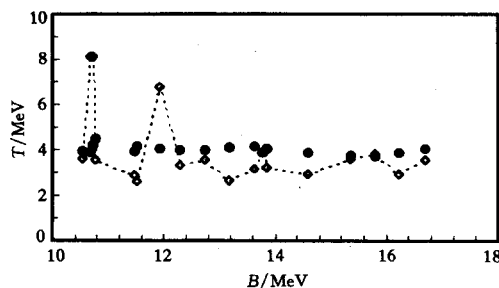


图 3 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中 $\theta_{\text{L}} = 9^\circ$ 处出射的碎片的同位素产额比导出的 T_{app} (空心方块) 和 T_0 (实心圆) 值随 B 参数的变化曲线

$\langle T \rangle$ 间的偏差. 可以看出, 这里 $\langle T_0 \rangle$ 和 $\langle T_{app} \rangle$ 在误差范围内都不随角度和靶核的不同而变化, 均为 4MeV 左右.

表 1 30MeV/u ^{40}Ar 引起的反应中对应不同靶和不同探测角下的 $\langle T_0 \rangle$ 和 $\langle T_{app} \rangle$ 值 MeV

$\theta_L(^{\circ})$	^{58}Ni				^{64}Ni				^{115}In			
	$\langle T_0 \rangle$	$\langle \Delta T_0 \rangle$	$\langle T_{app} \rangle$	$\langle \Delta T_{app} \rangle$	$\langle T_0 \rangle$	$\langle \Delta T_0 \rangle$	$\langle T_{app} \rangle$	$\langle \Delta T_{app} \rangle$	$\langle T_0 \rangle$	$\langle \Delta T_0 \rangle$	$\langle T_{app} \rangle$	$\langle \Delta T_{app} \rangle$
7	3.95	0.26	3.92	1.11	4.09	0.23	4.06	1.12	4.15	0.28	4.09	1.07
9	3.88	0.17	3.88	1.17	3.87	0.15	3.91	1.24	4.01	0.14	4.02	1.18
11	3.92	0.13	3.93	1.17	3.80	0.19	3.85	1.24	4.02	0.11	4.19	1.25
13	3.80	0.19	3.85	1.24	4.00	0.14	4.04	1.19	3.97	0.14	4.14	1.27

4 关于发射体的简单讨论

用同位素产额比方法提取核温度参数的前提是有一个至少是达到热平衡的发射体. 这里讨论一下这些用于提取核温度参数的 IMF 来自于何种发射体. 我们认为发射体主要是周边碰撞过程中产生的处于激发状态的初始类弹碎片 (PLF), 用于提取核温度的 IMF 是这些 PLF 退激发的产物. 显然, 按这种理解得到的核温度参数反映的应该是这些初始 PLF 的激发程度. 一个由费米子组成的低温系统, 其温度与激发能有如下关系^[5]:

$$T = \sqrt{kE^*} \quad (5)$$

上式中 k 为能级密度参数的倒数, E^* 为单核子激发能. 对于低温核系统一般取 $k = 10\text{MeV}$. 如果 $T = 4\text{MeV}$, 可导出 $E^* = 1.6\text{MeV/u}$. 这一结果与碎裂模型计算的结果不矛盾. 如果认为初始类弹碎片的激发能仅来自于表面能过剩^[17], 对我们所研究的系统, 碎裂模型计算表明初始 PLF, 除弹核附近的碎片, 其平均激发能约在 1—2MeV/u.

作者对 HIRFL 的运行人员在实验中给予的大力协助表示诚挚的谢意.

参 考 文 献

- [1] Jaqaman H, Mekjian A Z, Zamick L. Phys. Rev., 1983, C27(6):2782—2791; 1984, C29(6):2067—2074
- [2] Boal D H, Goodman A L. Phys. Rev., 1986, C33(5):1690—1698 and the references therein
- [3] Chitwood C B et al. Phys. Lett., 1983, 131B:289—292 and the references therein
- [4] Ogilvie C A, Adloff J C, Begemann-Blaich M et al. Nucl. Phys., 1993, A553:271c—282c
- [5] Pochodzalla J et al. Phys. Rev. Lett., 1995, 75(6):1040—1043 and the references therein
- [6] Wada R et al. Phys. Rev., 1989, C39(2):497—515
- [7] Wile J L et al. Phys. Rev., 1992, C45(5):2300—2319 and the references therein
- [8] Xu H M et al. Phys. Rev., 1989, C40(1):186—210
- [9] Albergo S, Costa S, Costanzo E et al. Nuovo Cimento, 1985, 89A(1):1—28
- [10] Wei Zhiyong, Zhu Yongtai. Chin. Phys. Lett., 1997, 14(3):169—172
- [11] Tsang M B, Lynch W G, Xi H et al. Phys. Rev. Lett., 1997, 78(20):3836—3839
- [12] Hsi W C, Kunde G J, Pochodzalla J et al. Phys. Rev. Lett., 1994, 73(25):3367—3370

- [13] Tsang M B et al. Phys. Rev., 1996, C53(3):R1057—R1060
[14] Kolomeits A et al. Phys. Rev., 1996, C54(2):R472—R476
[15] Xi H et al. Phys. Rev., 1996, C54(5):R2163—R2166
[16] Xu Hushan et al. Nucl Sci and Tech, 1996, 7(4):198—201
[17] Morrissey D J, Marsh W R, Otto R J et al. Phys. Rev., 1978, C18(3):1267—1274

Temperature Parameters Extracted in ^{40}Ar Induced Reactions at 30 MeV/u*

Xu Hushan Zhu Yongtai Gou Quanbu Wei Zhiyong
Lu Jun Wang Qi Li Songlin Zhang Yuhu
Jin Genming Wu Zhongli Xie Yuanxiang

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

Abstract By employing the method of double ratios of isotope yields, the nuclear temperature parameters for the reactions of 30 MeV/u ^{40}Ar bombarding ^{58}Ni , ^{64}Ni and ^{115}In targets, are extracted by yields of the fragments of $3 \leq Z \leq 8$. The dependences of the apparent temperature on some observables are investigated. The temperature values after correction for the side-feeding effects are also deduced and discussed.

Key words nuclear temperature, double ratios of isotope yields, intermediate mass fragment, peripheral collision

Received 21 July 1997

* Supported by the National Natural Science Foundation of China, Project No 19205006 and IMP Director Foundation