

30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中的同位素 产额比与核温度*

肖志刚 吴和宇 靳根明 王宏伟 胡荣江 柳永英 李祖玉
段利敏 张保国 魏志勇 王素芳 诸永泰 朱海东 卢朝晖

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 系统研究了 30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中的轻粒子同位素产额比随角度和初始激发能的变化关系. 对于两个反应体系, 均观察到 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^6\text{Li}/^7\text{Li}$ 的产额比随角度的增加而增加, $^6\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^8\text{Li}/^7\text{Li}$ 随角度的增加而减小. 统计发射的运动学效应不能完全符合实验结果. 各种单同位素产额比与靶核的 N/Z 比有关, 表现出同位旋效应, 而由双同位素比提取的核温度几乎没有靶核相关性.

关键词 同位素产额比 动力学效应 核温度 靶核相关性

1 引言

S. Albergo 等人在 1985 年提出了利用双同位素产额比提取核温度的原理和方法^[1], 逐渐在中能重离子物理中得到广泛应用. 例如 Aladin 小组在 GSI 利用 600MeV/u Au + Au 反应, 第一次在很宽的激发能范围内研究了核温度与激发能的关系, 给出核物质的量热性质与水的相变有惊人的相似^[2]. 通过双同位素产额比提取的核温度称为同位素比温度 T_{iso} , 这种方法的优点在于它可以消除化学势的影响, 并且在入射能较高的情况下依然能得到合理的结果^[3]. 近年来, 随着重离子物理研究的深入和同位旋物理这一领域的开辟, 人们在同位素产额比及核温度确定等方面又做了大量的研究^[4-8].

研究表明影响同位素产额比的因素很多, 所提取核温度有很大的不确定性. 例如, 由于不稳定粒子或碎片的相继衰变和另外一些可能被简单理论模型忽略的过程的影响, 最终所测量到的同位素产额比已经偏离平衡时的值, 因此 T_{iso} 也强烈依赖所选的粒子对, 基于这一思想, Tsang M B 等人通过基于跟随衰变理论的 Monte-Carlo 模拟, 得到各种粒子对的修正因子^[9]. 另外, 在热核衰变中发射的中等质量碎片 (IMF), 其内部激发对 T_{iso} 也有很大的影响, 这种影响的大小可以通过对 IMF 内部激发配分函数展开的一级近似加以估

2000-10-08 收稿

* 中国科学院百人计划基金, 中国科学院九五基础性研究重大科学基金 (KJ95T-03) 和自然科学基金 (19735010) 资助

算^[10]. 事实上, 由于中能核反应中粒子来源相当复杂, 各种同位素的产额不仅可以反映热核的衰变性质, 而且还会带有碰撞过程的动力学信息^[11,12], 因此, 同位素产额比温度的提取就有种种内在的不确定因素. 本文测量了 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$ 反应中各个角度的轻粒子, 研究了各种同位素产额比随线性动量转移 (LMT) 和观察角度的关系以及初始热核同位旋对核温度的影响.

2 实验安排

实验是在近代物理研究所重离子加速器上完成的. 采用 30MeV/u 的稳定束流 ^{40}Ar 轰击稳定同位素靶 ^{112}Sn 和 ^{124}Sn . 两个反应系统的中质比 (N/Z) 分别为 1.235 和 1.412, 两者相差 14.3%. 为了测量系统平衡后热核蒸发的轻粒子, 在 $122^\circ, 142^\circ, 147^\circ, 161^\circ$ 和 165° 分别摆放了 5 块 $\Delta E - E$ 粒子望远镜, 它们均由一块厚度为 $50\mu\text{m}$ 的金硅面垒探测器和一块 $3500\mu\text{m}$ 的锂漂移探测器组成. 在前角 $10^\circ, 13^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 安放了其它 6 块半导体望远镜测量耗散粒子和类弹碎片等碰撞过程的产物. 为了实现粒子与线性动量转移的符合测量, 在前角与束流同轴地安放了 6 块平行板雪崩计数器 (PPAC) 测量余核. 详细的实验布局请参见文献 [13,14].

3 实验结果

3.1 单同位素比随 LMT 的变化关系及其靶核相关性

图 1 显示不同角度的单同位素产额比 R_i 与初始激发能 E^* 的关系. 通过余核飞行时间得到余核速度, 再根据大质量转移模型计算出初始激发能^[13]. 由图可见, 单同位素产额比与激发能的关系比较复杂. 首先对于轻粒子产额比, 如 $^3\text{He}/^4\text{He}, \text{t/d}$ 和 $^6\text{He}/^4\text{He}$, 从后角 147° 和 122° 的结果来看, 其值随激发能的增加而增大, 由于 p 是氢的最稳定同位素, p/d 随激发能的增加略有下降. 这些结果可以用统计蒸发模型加以定性的解释. 由于分离能较大, $\text{t}, ^3\text{He}, ^6\text{He}$ 等粒子在激发能较高时更容易发射, 随着热核的冷却, 中子, $\text{p}, ^4\text{He}$ 等的竞争使得 $\text{t}, ^3\text{He}, ^6\text{He}$ 等偏离稳定线的粒子相对发射几率逐渐降低. 而从前角 60° 和 45° 的结果来看, 轻粒子同位素比随初始激发能并没有明显变化. 对于复杂碎片 Li , 前角和后角的同位素产额比基本上不随初始激发能的变化而变化.

从图 1 还可以考察轻粒子同位素产额比复杂的靶核相关性. 对于丰中子核与稳定核的比, 如 $\text{t/d}, ^6\text{He}/^4\text{He}$, 在丰中子系统 $^{40}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 中有相对较高的值. 对于 p 与 d 的产额比, 在 $^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 中的比值又明显高于在 $^{40}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 中的比值. 这说明, 在冷却的过程中, 复合体系总是向 β 稳定线趋近, 因此, 不管在动力学过程还是在统计蒸发过程, $^{40}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 体系比 $^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 体系更容易发射丰中子粒子, 而后者则有更高的 p 产额, 这些结果是合理的. 但是, 对于 ^3He 与 ^4He 及 ^6Li 与 ^7Li , 122° 观察到在 $^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 反应中的比值明显低于 $^{40}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 反应系统, 而在其它角度, 两个系统测到的比值较为接近, 其原因尚不清楚.

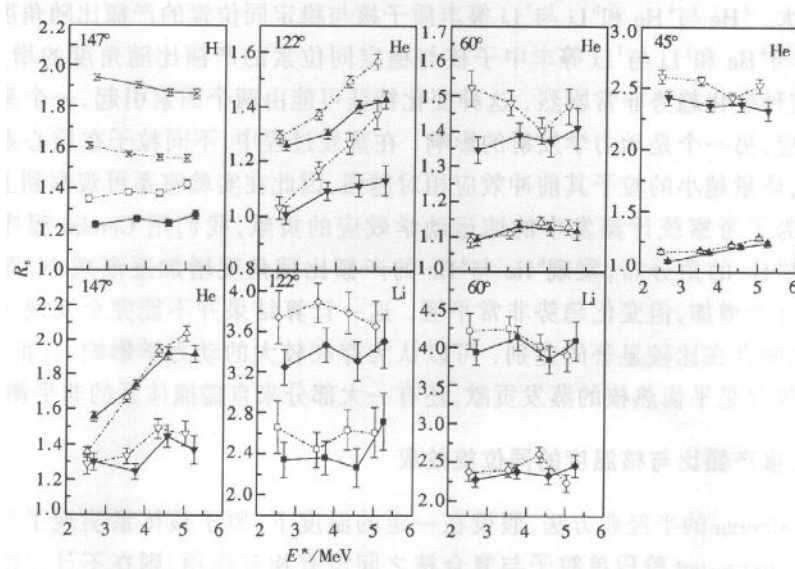


图 1 $^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ (实心点实线)和 $^{40}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ (空心点虚线)反应中各种单同位素产额比随初始激发能的变化关系
 $\times p/d$, $\bullet l/d (\times 2)$, $\blacktriangle ^3\text{He}^4\text{He} (\times 20)$, $\blacktriangledown ^6\text{He}^4\text{He} (\times 100)$, $\blacklozenge ^7\text{Li}^7\text{Li} (\times 5)$, $\blacksquare ^8\text{Li}^7\text{Li} (\times 10)$.

3.2 单同位素比随角度的变化关系

图2显示了不同角度的单同位素产额比,从图中可以看到,各组同位素产额比与观测

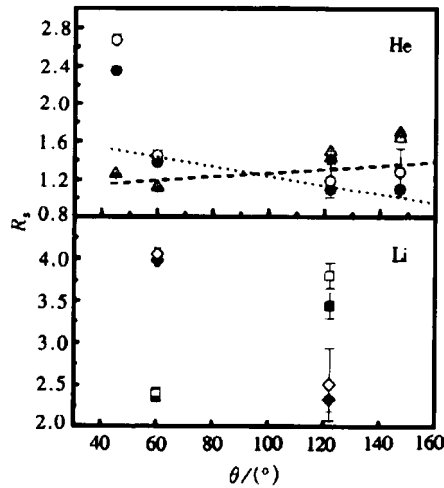


图 2 $^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ (实心点)和 $^{40}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ (空心点)反应的单同位素产额比随角度的变化关系
 $\blacktriangle ^3\text{He}^4\text{He} (\times 20)$, $\bullet ^6\text{He}^4\text{He} (\times 100)$, $\blacklozenge ^7\text{Li}^7\text{Li} (\times 5)$, $\blacksquare ^8\text{Li}^7\text{Li} (\times 10)$,和.....分别为 $^3\text{He}^4\text{He}$ 和 $^6\text{He}^4\text{He}$ 的 Gemini 计算结果.

角度关系很大. ${}^3\text{He}$ 与 ${}^4\text{He}$ 和 ${}^6\text{Li}$ 与 ${}^7\text{Li}$ 等丰质子核与稳定同位素的产额比随角度的增加而增加, 而 ${}^6\text{He}$ 与 ${}^4\text{He}$ 和 ${}^8\text{Li}$ 与 ${}^7\text{Li}$ 等丰中子核与稳定同位素的产额比随角度的增加而减小. 在前角区, 这种变化趋势非常剧烈. 这种变化特征可能由两个因素引起, 一个是统计蒸发的运动学效应, 另一个是动力学发射的影响. 在蒸发过程中, 不同粒子在质心系的出射动能大体相当, 质量越小的粒子其前冲效应相对越强, 因此在实验室系可观察到上述角度分布的特征. 为了考察统计蒸发中的纯运动学效应的贡献, 我们用 Gemini 程序模拟计算了 ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ 和 ${}^6\text{He}$ 的角分布, 发现 ${}^6\text{He}$ 与 ${}^4\text{He}$ 的产额比随角度增加逐渐减小, 而 ${}^3\text{He}$ 与 ${}^4\text{He}$ 的产额比则逐渐增加, 但变化趋势非常平缓. 这一计算结果并不能完全重现实验测量的分布, 两者之间存在比较显著的差别. 可以认为存在较大的动力学影响: 在前角区, 轻粒子的来源不仅仅是平衡热核的蒸发贡献, 还有一大部分来自碰撞体系的非平衡发射.

3.3 双同位素产额比与核温度的同位旋效应

按照 S Albergo 的半经典方法, 假设在一定的温度下, 原子核体系实现了热平衡和化学平衡, 且在 freeze-out 阶段单粒子与复合核之间没有相互作用, 则在不计二级衰变的影响下, 双同位素产额比满足

$$R \equiv \frac{Y_{12}}{Y_{34}} = \frac{Y(A_1, Z_1)/Y(A_2, Z_1)}{Y(A_3, Z_2)/Y(A_4, Z_2)} = a \cdot \frac{\omega(A_1, Z_1, T)\omega(A_4, Z_2, T)}{\omega(A_2, Z_1, T)\omega(A_3, Z_2, T)} \exp\left[\frac{\Delta A\mu_n + b}{T}\right], \quad (1)$$

其中
$$a = \frac{(2J_1 + 1)(2J_4 + 1)}{(2J_2 + 1)(2J_3 + 1)} \cdot \left(\frac{A_1 A_4}{A_2 A_3}\right)^{3/2} \quad (2)$$

$$b = B(A_1, Z_1) + B(A_4, Z_2) - B(A_2, Z_1) - B(A_3, Z_2), \quad (3)$$

$$\Delta A = A_1 + A_4 - A_2 - A_3. \quad (4)$$

假定发射粒子处于基态, 并选取 $\Delta A = 0$ 的同位素对, 则同位素比核温度 $T_{i..}$ 与 R 的关系为

$$R = a \exp(b/T). \quad (5)$$

表 1 给出各个角度测量的几种双同位素对的 a 和 b 参数、产额比值及其核温度. 因为没有作相继衰变的修正, 由不同的双同位素对提取的核温度相差很大, 但这并不影响我们的讨论. 由于 p 和 d 的高能部分在 122° 的望远镜中都没有测全, 因此, 没有观察到双同位素比及温度随角度变化的确定规律. 双同位素比的靶核相关性比较简单, 从表中可以看出, 除了 ${}^3\text{He}$ 与 ${}^8\text{Li}$ 之外, 其余的双同位素比, 在 ${}^{124}\text{Sn}$ 系统中的值均略低于 ${}^{112}\text{Sn}$ 系统中的值, 并且, 由于同位素对满足 $A_2 - A_1 = A_4 - A_3$, 因此双同位素比在两个反应系统中的相对差异比单同位素比的要小, 这正是化学势趋于平衡的体现^[6]. 尽管对于某组同位素对而言, $T_{i..}$ 在 ${}^{112}\text{Sn}$ 和 ${}^{124}\text{Sn}$ 两系统中存在微小的差异, 但考察所有同位素对, 可以认为, $T_{i..}$ 与靶核没有明显关系.

表 1 各种同位素对的 a 和 b 参数, R 和 T_{iso} .

同位素对	a	b	靶	60°		122°		147°	
				R	T_{iso}	R	T_{iso}	R	T_{iso}
p, d/d, t	0.289	4.04	^{112}Sn	1.142	2.94	1.079	3.07	1.122	2.98
			^{124}Sn	1.110	3.00	0.974	3.33	1.066	3.10
p, t/ ^3He	0.353	-7.51	^{112}Sn	0.0211	2.67	0.0149	2.37	0.0302	3.05
			^{124}Sn	0.0201	2.62	0.0126	2.25	0.0285	2.98
p, d/ ^3He	0.18	18.35	^{112}Sn	23.780	3.76	17.08	4.03	20.36	3.88
			^{124}Sn	22.064	3.82	13.66	4.24	18.83	3.95
$^3\text{He}/^6\text{Li}$	2.18	-13.3	^{112}Sn	0.1182	4.57	0.1031	4.36		
			^{124}Sn	0.1164	4.54	0.0977	4.28		
$^3\text{He}/^7\text{Li}$	1.98	-18.5	^{112}Sn	0.0221	4.12	0.0166	3.87		
			^{124}Sn	0.0228	4.14	0.0187	3.97		
$^4\text{He}/^6\text{Li}$	1.397	8.31	^{112}Sn	61.272	2.20	30.979	2.68		
			^{124}Sn	57.874	2.23	27.805	2.78		

4 小结

通过 4 个角度的粒子测量, 得到各种元素的不同同位素产额. 单同位素产额比表现出来一定的同位旋效应, 丰中子粒子在 $^{40}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 体系中的发射几率略高于 $^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 体系, 而质子在 $^{40}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 体系则更容易发射. 动力学效应对不同同位素的产额有较大的影响. 由于化学势在碰撞体系中逐渐趋于平衡, 所提取的同位素产额比温度没有表现出靶核相关性.

核温度的确定对于核物理研究的许多问题有重要影响, 目前对核温度的测量有几种方法, 在中能区得到的温度参量相差较大. 除了对于有关核温度的概念方面的争论以外, 人们还对不同方法提取温度的可信度提出质疑. 在核反应中可测量的往往是反应中初级产物经过一系列级联衰变过程后的终产物. 另外, 在中能区, 弹靶碰撞体系往往在未达到热力学平衡就开始发射粒子, 即使达到热力学平衡后, 其衰变链也很长, 链上不同位置的蒸发产物也有不同的分布特征, 这些因素都会影响最终温度的测量结果^[15].

参考文献 (References)

- Alberg S et al. IL Nuovo Cimento, 1985, **A89**:1
- Pochadzalla J, Möhlenkamp T, Rubehn T et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:1040—1043
- WEI Zhi-Yong, ZHU Yong-Tai. Progress in Physics, 1998, **18**:33—45 (in Chinese)
(魏志勇, 诸永泰. 物理学进展, 1998, **18**:33—45)
- HU Pei-Gang, WU He-Yu, JIN Gen-Ming et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, **24**(9):818—822 (in Chinese)
(胡佩钢, 吴和宇, 靳根明等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(9):818—822)
- XI H F, Kunde G J, Bjarki O et al. Phys. Rev., 1998, **C58**:R2636—R2639
- Kunde G J, Gaff S, Gelbke C K. Phys. Lett., 1998, **B416**:56—61
- Viola V E, Kwiatkowski K, Friedman W A. Phys. Rev., 1999, **C59**:2660—2669

- 8 JIN Gen-Ming. Nuclear Physics Review, 1998, **15**(4):227—236(in Chinese)
(靳根明. 原子核物理评论, 1998, **15**(4):227—236)
- 9 Tsang M B et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:3836
- 10 WEI Zhi-Yong, ZHU Yong-Tai. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1997, **21**(7):615—620(in Chinese)
(魏志勇, 诸永泰. 高能物理与核物理, 1997, **21**(7):615—620)
- 11 Yennello S J, Young B, Yee J et al. Phys. Lett., 1994, **B321**:15
- 12 Johnston H, White T, Winger J et al. Phys. Lett., 1996, **B371**:186
- 13 XIAO Zhi-Gang, WU He-Yu, WANG Hong-Wei et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**(7):643(in Chinese)
(肖志刚, 吴和宇, 王宏伟等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(7):643)
- 14 XIAO Zhi-Gang, WU He-Yu, LI Zu-Yu et al. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2001, **21**(5):334 (in Chinese)
(肖志刚, 吴和宇, 李祖玉等. 核电子学与核探测技术, 2001, **21**(5):334)
- 15 WU He-Yu, XIAO Zhi-Gang, LI Zu-Yu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, **23**:1115(in Chinese)
(吴和宇, 肖志刚, 李祖玉等. 高能物理与核物理, 1999, **23**:1115)

Isotope Ratios of Light Charged Particles and Temperature in the Reactions $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}^*$

XIAO Zhi-Gang WU He-Yu JIN Gen-Ming WANG Hong-Wei HU Rong-Jiang
LIU Yong-Ying LI Zu-Yu DUAN Li-Min ZHANG Bao-Guo WEI Zhi-Yong
WANG Su-Fang ZHU Yong-Tai ZHU Hai-Dong LU Zhao-Hui
(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract Coincidence measurements between residues and light charged particles (LCPs) have been made for the reactions $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{112,124}\text{Sn}$. The LCPs were measured by 11 semi-conduct telescopes from very forward angle to backward angle. The times of flight of the residues were measured by PPACs installed concentrically around the beam at forward angle. The excitation energy of the primary hot nuclei was obtained from the velocity of residues in the frame of incomplete fusion model. The single isotope ratios, as function of observing angle and excitation energy have been studied. The ratio of $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^6\text{Li}/^7\text{Li}$ increases with angle while that of $^8\text{He}/^4\text{He}$ and $^8\text{Li}/^7\text{Li}$ decreases. The calculation of statistical theory can not reproduce the curve quantitatively, implying the existence of dynamic effect. Isospin effect of the primary hot nuclei on the single isotopic ratios is demonstrated. However, the temperature extracted from double isotope ratios is target independent.

Key words isotope ratios, dynamic effect, temperature, target independence

Received 8 October 2000

* Supported by One Hundred Talents Project, Major Subjects of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03) and Key Project of National Natural Science Foundation of China (19735010)