

35MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中 热核的统计发射研究

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

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用硅半导体 + CsI(Tl) 闪烁体望远镜测量 35MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 中发射的轻带电粒子, 用能谱斜率方法和双同位素产额比方法提取了核温度参量. 研究了热核发射过程中的统计发射规律.

关键词 统计发射 核温度 热核

1 引言

在过去的几年里, 关于中能重离子核反应过程的热核性质和多重碎裂核反应的研究, 无论是实验还是理论分析研究都有了相当多的工作积累^[1-7]. 主要讨论的热点问题有两个方面, 一个是热核的形成, 主要包括热核的动力学形成过程和热核的极限核温度的研究. 热核的极限核温度 T_{lim} 就是热核存在时所能承受的最高温度. 热核的 T_{lim} 可能与核物质的液-气相变临界温度密切相关. 另一个重要问题是研究热核的衰变过程. 热核衰变过程主要有动力学发射和统计发射两种, 只有统计发射才和体系的核温度有联系. 关于热核的统计过程也已经有了相当多的研究工作积累^[8-10], 许多研究工作表明, 统计发射过程是热核衰变的一个很重要的衰变方式, 尤其是碰撞参数小的情况, 如 $b < 0.4$ 的近中心碰撞过程. 热核的形成过程主要是动力学过程, 而其衰变过程则是一个受动力学过程和末态相互作用影响的统计发射过程.

温度是针对一个平衡态过程而言的, 对于一个没有实现体系平衡或是局部平衡的体系, 温度是没有意义的. 对于核反应过程, 到目前为止还没有办法从理论和实验上严格证明体系是否真正达到平衡或是局部平衡, 而是引入“发射源”这一概念. 这一概念的引入, 为讨论中能核反应过程中的粒子发射提供了很多帮助^[11-13]. 尽管还没有完全证明核反

1999-11-25 收稿

* 中国科学院留学回国人员基金, 国家自然科学基金(19505007), 中国科学院“九五”重大项目(KJ95T-03)支持

应体系中是否真正达到平衡或者局部平衡,一系列实验研究工作都假定体系处于平衡态,在平衡态基础上,分析研究得出的结论也是合理的.另外,理论上模拟计算也表明在中心碰撞中,至少在核反应的后期阶段,平衡态还是实现了.核温度是研究统计发射过程的一个很重要的参量.通常,提取核温度的方法有能谱斜率方法、非稳态粒子相对布居法和利用双同位素产额比方法^[14-16].在本工作中,采用能谱斜率方法和双同位素产额比方法,分别提取了斜率核温度、同位素核温度,并对提取的核温度进行了比较,对于所反映的统计发射过程进行了讨论.

2 实验测量结果

本实验是在兰州重离子加速器(HIRFL)的大筒形通用散射室上进行的,利用 HIRFL 提供的 35MeV/u ⁴⁰Ar 轰击厚度为 674 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 ¹⁹⁷Au 靶.实验中从 44.1° 到后角 157.7° 放置 6 套半导体 + CsI(Tl) 闪烁体望远镜,测量不同角度的出射产物,望远镜前加镀铝 Mylar 膜以阻挡电子.余核以及裂变碎片由前角同心放置的 4 块位置灵敏平行板雪崩计数器 (PPAC) 测量.在 0° 角放置一套 12 单元的半导体 + BGO 望远镜阵列,这 12 个 BGO 望远镜分两圈布置,首圈为 6°,第二圈为 15°.BGO 望远镜前加 7 μm 的铝膜以阻挡电子.为了减少散射室内来自靶以及其它来源的电子干扰,在靶上加 10000V 正高压.在实验中采取半导体制冷技术将探测器致冷到 0°C 以下,以减小反向漏电流和噪声.本文主要讨论中后角区 6 套半导体 + CsI(Tl) 闪烁体望远镜所测量的结果.

6 套半导体 + CsI(Tl) 闪烁体望远镜中所用的半导体探测器的厚度 $Th1$ 和 $Th2$; 它们所处的位置 θ 、方位角 ϕ ; 它们距靶心的距离 D ; 准直孔的直径 R 等参数如表 1 所示.三叠层望远镜中的第二块半导体探测器 T2 为 ORTEC 公司产品,第一块半导体探测器 T1 均为中国科学院近代物理研究所所自制的. CsI(Tl) 的信号通过光二极管 (HAMAMATSU S3204-05) 读出,其灵敏面积为 18mm \times 18mm.

表 1 6 套半导体 + CsI(Tl) 闪烁体望远镜的厚度及位置等参数

	Tel1	Tel2	Tel3	Tel4	Tel5	Tel6
$Th1/\mu\text{m}$	70	56	37	60	67	68
$Th2/\mu\text{m}$	390		200	390		
$\theta/(\circ)$	157.7	154.9	127.0	79.6	58.8	44.1
$\phi/(\circ)$	-90.0	90.0	90.0	-145.1	-138.9	-133.4
D/cm	11.5	11.5	11.5	26.0	21.6	28.6
R/cm	1.02	1.20	1.04	1.40	1.40	1.40

3 结果和讨论

后角(157.7°)望远镜 Tel1($\Delta E_1 = 70\mu\text{m}$, $\Delta E_2 = 390\mu\text{m} + \text{CsI(Tl)}$)所测量到的质子、氘、氚、³He 及 ⁴He 等同位素的能谱示于图 1. 对于相同的半导体厚度,不同粒子的探测阈有所不同,粒子的质量数或者电荷数越大探测阈越高.由图 1(e)可以看出,对于 ⁴He

探测阈可达 14.0MeV, T1 的厚度为 $70\mu\text{m}$, 由参数化的能损计算程序^[17], 可以知道, 对于 ^4He 由 T1 而来的探测阈约为 10.5MeV, 探测阈的另外一部分来自于用于阻挡电子镀铝 Mylar 膜. 利用 PAW 中的指数函数来拟合各发射产物的能谱, 直线为拟合的结果.

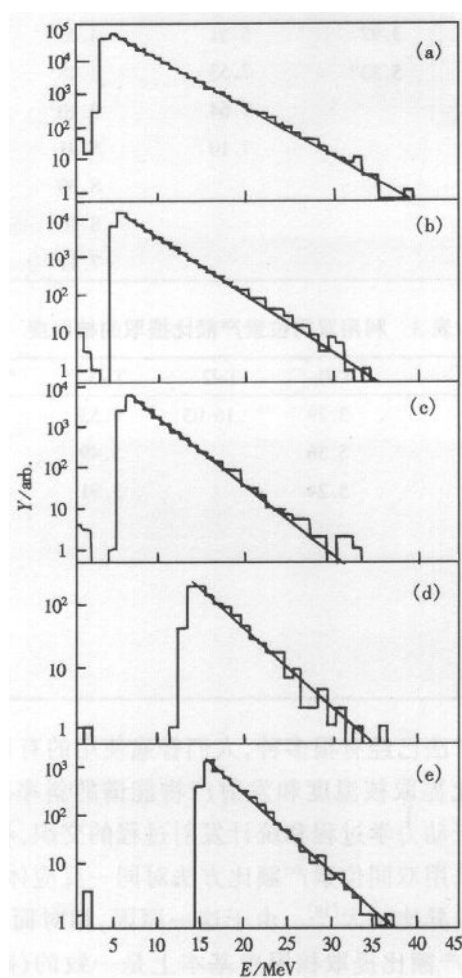


图 1 后角(157.7°)望远镜 T1 所测得的 p(a), d(b), t(c), ^3He (d), ^4He (e) 的能谱
直线为指数拟合的结果.

表 2 为利用单个发射源或两个发射源拟合能谱提取的斜率核温度, 表中右上角标 H 表示探测器不能分辨同位素, 仅仅可以分辨出电荷. 如第二套望远镜 Tel2 对应于 ^3He 的斜率核温度为 $5.33^{\text{H}}\text{MeV}$, 来自于拟合 He 元素的能谱, 它包括了 ^3He , ^4He 和 ^6He 的贡献. 右上角标 T 表示利用双源拟合提取的数据, 表中所示的温度为类靶源的核温度. 在后角区单个发射源就可以很好地拟合发射能谱, 随着 θ 角逐渐减小, 需要多个发射源来拟合. 对于 Tel4 的 ^6Li , ^7Li , ^8Li 及 ^6He , 由于产额减小, 双源拟合无法进行, 仅给出单源拟合的斜率温度. 对于相同的体系利用双同位素产额比提取的核温度示于表 3, 最后一列为两个同位素对的结合能之差, $B = (B^1 + B^4) - (B^2 + B^3)$.

表 2 利用单个发射源或两个发射源拟合能谱提取的斜率核温度 (单位:MeV)

	Tel1	Tel2	Tel3	Tel4	Tel5	Tel6
p	5.85	4.50	6.46	4.23 ^T	3.4 ^{T,H}	6.01 ^{T,H}
d	5.68	3.97	4.44	3.55 ^T	3.71 ^{T,H}	9.03 ^{T,H}
t	5.17	3.92	6.51	4.05 ^T	5.81 ^T	4.25 ^{T,H}
³ He	6.08	5.33 ^H	7.53	3.48 ^T	8.5 ^{H,T}	6.97 ^{H,T}
⁴ He	5.05		7.64	3.10 ^T		
⁶ He	5.65		7.10	8.41		
⁶ Li				8.50		
⁷ Li				8.10		
⁸ Li				7.17		

表 3 利用双同位素产额比提取的核温度

(单位:MeV)

	Tel1	Tel2	Tel3	Tel4	Tel5	B
(p/d)/(d/t)	3.79	16.03	4.53	4.43	7.21	4.03
(d/t)/(³ He/ ⁴ He)	5.36		5.49	4.87		14.32
(p/t)/(⁴ He/ ⁶ He)	5.24		3.91	5.05		-7.51
(⁶ Li/ ⁷ Li)/(⁷ Li/ ⁸ Li)				5.64		-5.22
(⁴ He/ ⁶ He)/(⁶ Li/ ⁸ Li)				2.68		8.31
(d/t)/(⁶ Li/ ⁷ Li)				2.2		0.99
(p/t)/(⁶ Li/ ⁸ Li)				2.9		0.81
(d/t)/(⁷ Li/ ⁸ Li)				0.7		-4.23

目前,测量核温度的方法已经有很多种,人们普遍使用的有双同位素产额比提取核温度、非稳态粒子相对布居比提取核温度和发射产物能谱的斜率提取核温度这三种方法.在中能区反应过程中,由于动力学过程和统计发射过程的交织,各种测量方法得到的核温度参量有较大差异,即使采用双同位素产额比方法对同一反应体系,不同的双同位素产额比会给出不同的核温度,差异比较大^[18].由于这一原因,相对而言,在本研究工作中所得到的斜率核温度和同位素产额比提取核温度基本上是一致的(除 Tel2, Tel5 外),斜率核温度略高一些.在后角区用发射产物能谱的斜率提取核温度基本上比较合理,反映了统计发射的特点.随着 θ 角度的减小,动力学过程和集体行为致使发射能谱偏离平衡态发射过程的标准 Maxwell 分布.此时,单个发射源不足以描述发射过程,需要两个或许多个发射源来拟合分析.

利用不同的方法提取核温度及各种不同方法提取出来的核温度所表示的意义,文献 [13] 已有详细的讨论.斜率核温度侧重于反映热核体系中粒子热运动的平衡态,而利用双同位素产额比提取的核温度则反映了热平衡和化学平衡同时满足的状态.如果体系真正地实现了平衡态,各种不同的方法提取的核温度应当一致.

按巨正则分布,发射粒子的产额和化学势密切相关,化学势是很难准确计算的量,利用双同位素产额比提取核温度的方法,由于很巧妙地消去了化学势的影响,因此它具有很高的可靠性.

利用双同位素产额比提取核温度的方法,要求探测系统能够实现同位素分辨, Tel1, Tel3, Tel4 具有良好的同位素分辨,提取的核温度比较准确. Tel2, Tel5 的同位素分辨比较差,提取的核温度不够准确. 对 Tel2, 经过 PAW 中 CUT 窗来得到 d/p 和 t/p 的产额比, 由于 CUT 窗设置的不确定性导致了产额比的不确定性超过 100%, 按此标准估计, 导致的核温度可以相差 4 倍以上. 这种同位素分辨本领因素对于斜率核温度的提取影响很小.

对同位素核温度,通常需要考虑由于二次衰变而来的边馈修正,但对于本工作中采用的几种双同位素产额比方法,目前还没有办法考虑边馈修正.

另外,同位素核温度的提取方法,也需进一步完善,如双同位素(d/t)/($^7\text{Li}/^8\text{Li}$), 当两组元素的电荷数相差比较大时,提取的核温度存在系统性的偏差. 这一问题有待于进一步探索.

对这两种提取核温度的方法,和系统误差相比,统计误差的贡献很小. ^6Li , ^7Li , ^8Li 的产额最小,涉及到这些同位素产额的核温度,统计误差的贡献约为 10%, 利用其它同位素产额提取的核温度,统计误差的贡献小于 10%.

本工作中得到 HIRFL 运行组及探测器组的支持,在此表示衷心感谢.

参考文献(References)

- 1 Lecolley J F et al. Phys. Lett., 1996, **B387**:460
- 2 Reisdorf W et al. Nucl. Phys., 1997, **A612**:493
- 3 Pochodzalla J, Möhlencamp T, Rubehn T et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:1040
- 4 Agostino M D' et al. Phys. Lett., 1996, **B368**:259
- 5 Agostino M D' et al. Phys. Lett., 1996, **B371**:175
- 6 Bowman D R et al. Phys. Rev., 1995, **C52**:818
- 7 Blaich Th et al. Phys. Rev., 1992, **C45**:689
- 8 Moretto L G, Wozniak G J. Annu. Rev. Nucl. & Part. Sci., 1993, **43**:379
- 9 Moretto L G et al. Phys. Rep., 1995, **275**:133
- 10 Moretto L G et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **76**:372
- 11 Awes T C et al. Phys. Rev., 1982, **C25**:2361
- 12 Chitwood C B et al. Phys. Rev., 1986, **C34**:858
- 13 WEI ZhiYong, ZHU YongTai. Progress in Physics (in Chinese), 1998, **18**:33
(魏志勇, 诸永泰. 物理学进展, 1998, **18**:33)
- 14 WEI ZhiYong, ZHU YongTai. Chinese Physics Letters, 1997, **14**(13):169; XU HuShan, ZHU YongTai, WEI ZhiYong et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, **22**:601; DUAN LiMin, WANG SuFang, ZHANG BaoGuo. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, **22**(9):780—786
(徐珊珊, 诸永泰, 魏志勇等. 高能物理与核物理, 1998, **22**:601); (段利敏, 王素芳, 张保国. 高能物理与核物理, 1998, **22**(9):780—786)
- 15 WEI ZhiYong, ZHU YongTai. High Energy Phys. and Nucl. Phys. 1997, **21**(3):57; WEI ZhiYong, ZHU Yong-Tai. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1997, **21**(7):615
(魏志勇, 诸永泰. 高能物理与核物理, 1997, **21**(7):615)
- 16 Albergo S, Costa S, Costanzo E. Noveto Cimento, 1985, **A89**:1
- 17 WEI ZhiYong, LI ZuYu, DUAN LiMin et al. Nuclear Techniques(in Chinese), to be published

(魏志勇, 李祖玉, 段利敏等. 半导体探测器的厚度确定及 CsI 的刻度, 核技术, 待发表)

18 Milazzo P M, Vannini G, Azzano M et al. Phys. Rev., 1998, C58:953—963

Statistical Emission of Hot Nuclei in the $35\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ Nuclear Reaction *

WEI ZhiYong LI ZuYu LIU YongYing DUAN LiMin WU HeYu ZHANG BaoGuo
WANG HongWei WANG SuFang XIAO ZhiGang LU ZhaoHui JIN GenMing
ZHU YongTai HU RongJiang ZHU HaiDong

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

Abstract The statistical emission of the $35\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ was studied. Several silicon $\Delta E_1 +$ silicon $\Delta E_2 + \text{CsI(Tl)}$ telescopes with good particle identification and lower energy thresholds were used to collect the experimental data. For the backward angle emission events, the slope nuclear temperature parameters and the isotope nuclear temperature parameters, which were extracted from the slope of energy spectra and double isotope yield ratios of the reaction products respectively, were nearly the same. The slope temperatures were slightly higher than the isotope temperatures. The reliability of the method to extract nuclear temperature has been discussed. For the backward angle events statistical emission is the dominant process, i. e. the particles emitted into backward angles mainly come from the equilibrium decay.

Key words statistical emission, nuclear temperatures, hot nuclei

Received 25 November 1999

* Supported by Foundation of The Chinese Academy of Sciences for back abroad and Foundation of Chinese National Natural Sciences (19505007) Major Subject of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03)