

$35\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中热核的 碎裂密度*

魏志勇^{1,1)} 段利敏¹ 靳根明¹ 吴和宇¹ 李祖玉¹
沈文庆² 郝洪飞¹ 诸永泰¹ 张保国¹ 王宏伟¹
肖志刚¹ 柳永英¹ 王素芳¹ 胡荣江¹

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 许多提取核反应过程中熵产生的方法只适用于高能核反应过程,而约化 d 的产额方法可以用于较低能量的重离子核反应中. 对于 $35\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 的核反应过程,利用这种方法所得的熵和约化带电粒子多重性提取的熵结果一致. 对于后角热核发射体系,实验提取的核温度为 $(4.7 \pm 1.2)\text{MeV}$,熵为 $S/A = 2.5 \pm 0.5$,根据实验提取的熵和核温度可以确定其碎裂密度小于 $0.1\rho_0$.

关键词 碎裂密度 熵 核温度 统计发射

1 引言

根据量子统计模型(QSM)理论计算,剧烈的中心碰撞可分为三个阶段:在重离子碰撞的第一个阶段中形成了高温高密度的热核体系,并产生大量的熵(80%以上),其热核的密度可以达到 $(2-3)\rho_0$,这里 ρ_0 是饱和密度. 在随后的第二阶段,由于大量的核子-核子碰撞,引起体系膨胀,在膨胀过程中体系的熵有少量增加而体系的温度有比较大的下降,这一阶段为绝热或等熵膨胀过程. 当核物质密度下降到碎裂密度时,膨胀过程停止. 在第三阶段核子之间的碰撞趋于停止,核子结合为结团、碎片,然后发射出来. 热核的压缩、膨胀是热核多重碎裂过程中的一个很重要的阶段,而且其膨胀过程和液汽相变紧密联系^[1]. 理论模型计算表明,剧烈的碰撞后,核物质的体积会膨胀3—8倍^[2,3],实验上也对压缩膨胀过程进行了研究^[4-7].

集体流及其他一些动力学和统计观测量都直接或间接地表明,在重离子剧烈碰撞过

2000-09-25 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)资助

1) Email: Weizy@west163.com

程中存在膨胀过程^[8-11]. 通过实验测量核反应过程中轻带电粒子的关联函数, 可以研究核反应中发射体系的时空演化^[12,13]. 对于高能核反应过程, 粒子(或碎片)发射时间很短, 在发射时间趋于零时的密度就是体系的碎裂密度^[7].

通常用热核体系的激发能、密度、温度、压强、熵等一些物理量来描述核反应中的统计发射过程. 人们对核温度的测量提取方法的讨论比较多^[14-17], 而对核反应过程中熵的提取讨论很有限^[18-20], 对于碎裂密度的分析就更少了. 在本研究工作中我们另外找到一种方法来研究碎裂密度, 即通过提取核反应过程中的核温度及产生的熵, 利用核温度与熵之间的关联关系来确定体系的碎裂密度.

2 实验

实验是在大型圆筒形散射室里进行的. 利用 HIRFL 提供的 $35\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar}$ 束流轰击 ^{197}Au 靶, 靶厚为 $674\mu\text{g}/\text{cm}^2$. 探测器采用半导体 + CsI(Tl) 组合望远镜系统. 三叠层望远镜中, 第一片 ΔE_1 厚度为 $60\mu\text{m}$, 它是近代物理研究所自制的; 第二片 ΔE_2 厚度为 $300\mu\text{m}$, 为 ORTEC 公司产品; 第三片为 CsI(Tl) 阻止探测器, 用光二极管读出. 光二极管 (HAMAMAT-SU S3204 - 05T) 灵敏面积 $18\text{mm} \times 18\text{mm}$ 在反应平面内沿 θ 角在 $44.1^\circ, 58.8^\circ, 79.6^\circ, 127.0^\circ, 154.9^\circ, 157.7^\circ$ 等处分别放置 6 套组合望远镜, 在第一片硅半导体探测器 ΔE_1 的前端加镀铝 mylar 膜以阻挡低能杂散电子. 在靶子上加 10000V 的直流正高压以减少进入探测系统的杂散电子的数目. 在实验过程中, 利用半导体制冷系统将探测器制冷于零度以下. 实验测得的两维散布图示于图 1 的例子.

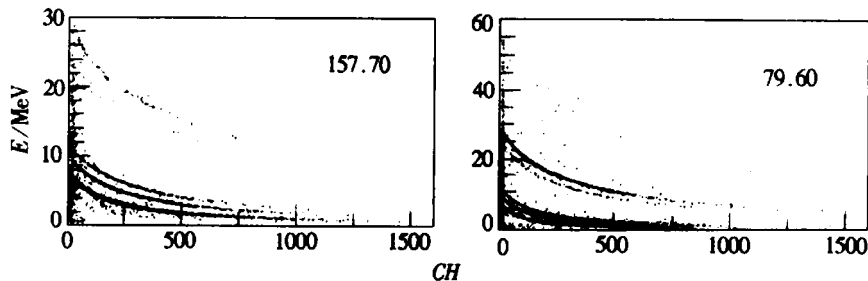


图 1 硅半导体的能量信号与 CsI(Tl) 光输出之间的两维散布图

CsI(Tl) 对带电粒子的响应具有比较复杂的非线性特点, 而且和离子的种类有关, 也就是说, CsI(Tl) 晶体的光输出除了表现出和沉积能量有非线性关系外, 还和入射离子的电荷 Z 及质量 A 有关^[18]. CsI(Tl) 的这些特点, 致使刻度非常复杂, 通常的办法是利用加速器提供的能量较高的束流, 通过散射得到二次束流进行刻度. 这种方法需要比较多的束流时间, 而且还需要磁谱仪等大型设备通过动量选择来选择二次粒子. 对于本工作中的情况, 实现这种绝对刻度基本上不可能. 为此, 我们先利用 ThC - ThC' 放射源发射的 α 粒子, 结合精密脉冲发生器对半导体硅探测器进行刻度, 这样可以得到 p, d, t, ^3He , ^4He , ^6He , 及其他各种带电离子在半导体硅探测器中的能损, 再利用参数化能损公式, 得到进入 CsI(Tl) 晶体的各种带电离子的能量, 从而实现对 CsI(Tl) 的刻度, 如图 2 所示.

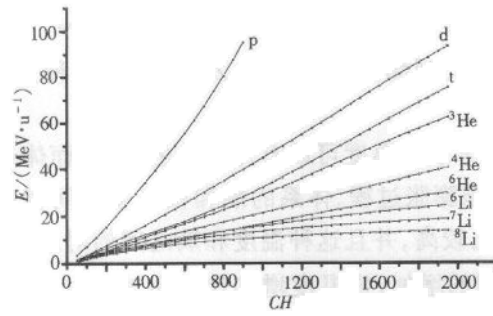


图 2 CsI(Tl) 的光输出与沉积能量的关系

在中能核反应过程中,前角区发射产物往往带有较多的非平衡发射的贡献,而后角发射主要来自于平衡态或近平衡态体系,具有统计发射的特征,本文的讨论主要基于后角区望远镜所测的结果.

3 结果和讨论

提取核反应体系中熵的方法有许多种. P. J. Siemens 和 J. I. Kapusta^[19] 认为反应后体系的熵为 $S/A = 3.95 - \ln R_{d,p}$, 这里 $R_{d,p}$ 为核反应过程中发射的 d 和 p 的产额比. 这种提取熵的方法只有在 d 和 p 比其他种类的核碎片丰度大得多时才有效. 这种方法随后被发展成利用类 d 和类 p 的比^[20] 来提取熵. 另外 d 产额 $R = Y_d / (Y_d + Y_t + Y_{^3He} + Y_{^4He})$ 可用于提取核反应过程中的熵^[21]. 根据量子统计模型^[22] 计算, 约化 d 的产额 R 和熵有单调的函数关系, 同时它又和体系的 Z/N 无关. 重碎片 ($Z \geq 3$) 多重性^[23] 也可用于提取熵, 并且这

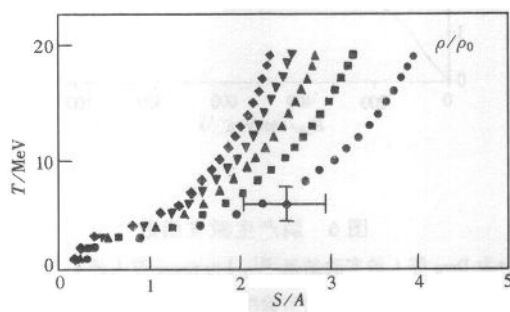


图 3 在不同碎裂密度下熵和核温度之间的关系

• 0.1, ■ 0.2, ▲ 0.3, ▼ 0.4, ◆ 0.5.

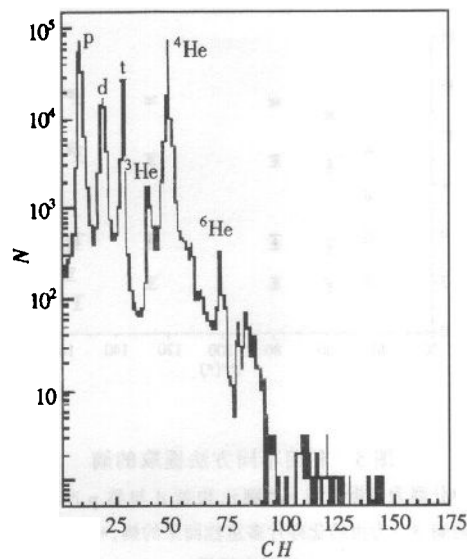


图 4 望远镜的粒子鉴别

一观测量几乎和碎裂密度无关. 此外, 约化碎片多重性^[8] $M_{red} = \sum_z n(z) / \sum_z zn(z)$ 也是可以用于提取熵的观测量, 此观测量与体系的 Z/N 无关, 这种方法对中能核反应比较有效.

在中能核反应过程中体系的温度可以有比较大的变化, 而体系的熵则变化比较平缓. 由 QSM 计算表明, 经过压缩膨胀过程, 体系的熵和核温度之间存在关联, 如图 3 所示. 体系的熵比较大时, 核温度比较高, 并且这种温度和熵之间的对应关系还和碎裂密度 (ρ/ρ_0) 有关. 碎裂密度大时, 随熵的增加, 核温度增加比较迅速. 由 $T = \partial U / \partial S$ 知, 温度比较高时, 即使熵 S 增加很小, 体系吸收的激发能 U 也会有比较大的增加.

到目前为止, 已知有多种方法可以用于实验提取核温度^[16,17], 常用的有发射粒子能谱的斜率, 双同位素产额比及粒子非稳态相对布居. 对于 $^{40}\text{Ar} + \text{Au}^{197}$ 核反应过程, 对不同的发射粒子提取的能谱斜率核温度基本上和发射粒子的种类无关^[24]. 对后角区的发射过程利用能谱斜率和双同位素产额比提取的核温度基本一致, 但能谱斜率核温度偏高一些^[17]. 为了提取熵和同位素核温度, 要求探测器望远镜系统必须具有良好的同位素鉴别能力, 如图 4 所示.

尽管选择测量核温度的同位素组合有许多种, 但对于轰击能量不是很高, 后角区发射粒子主要集中在轻带电粒子的情况, 选择 ($Y_d / Y_p / Y_{^3\text{He}} / Y_{^4\text{He}}$) 作为温度计提取核温度比较合适. 利用发射能谱的斜率提取核温度时, 对 157.7° 的能谱采用单个发射源拟合, 其他角度的发射能谱用双源拟合, 斜率核温度取发射源速度低的一个^[17]. 由不同角度发射带电粒子的产额, 根据这些数据可以用不同的方法提取熵, 如图 5 所示. 由 d 与 p 产额比和类 d 与类 p 产额比提取的熵系统地大于由约化碎片多重性而来的熵及约化 d 产额而来的熵.

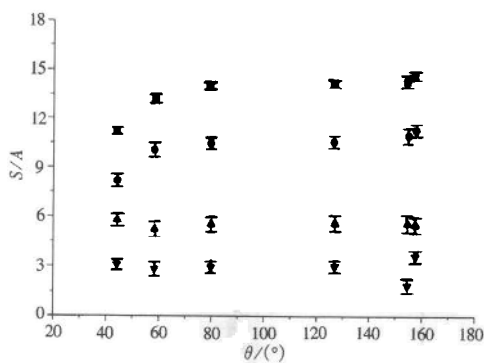


图 5 利用不同方法提取的熵

●和●分别为根据 d 与 p 产额比和类 d 与类 p 产额比提取的熵, ∇ 为约化碎片多重性而来的熵, \blacktriangle 为约化 d 产额而来的熵.

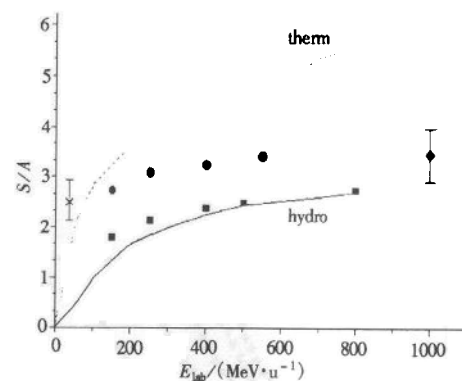


图 6 熵产生激发函数

●为 Does 等人的实验结果^[25], ∇ 为 Speer 等人的实验结果^[26], \blacksquare 为 Kuhn 等人的实验结果^[22], \blacktriangledown 为本次实验的结果, 线为计算结果.

由可观测量 d 与 p 和类 d 与类 p 的比来提取熵的方法仅仅在轰击能量比较高, 产生

的熵足够大($S/A > 5$)时才是可靠的. 利用 M_{red} 提取熵的方法比较可靠, 而且被用于轰击能量比较低的核反应研究工作中, 利用约化 d 产额 R 提取的熵和利用 M_{red} 提取熵给出的结果几乎一致, 因此从本研究工作看到约化 d 产额 R 和利用 M_{red} 提取熵的方法同样可靠并且可以适用于较低能量的重离子碰撞. 图 6 所示的是熵随轰击能量的关系, 虚线为火球模型的计算结果, 实线为流体力学模型计算的结果, 在火球模型中假定所有的动能都转化为热能, 而流体力学模型计算中还考虑了压缩能, 因此火球模型计算结果给出的熵比较大.

4 小结

根据熵和核温度的关系, 由图 3 可以得出热核体系的碎裂密度. 根据我们的实验结果, 即核温度的平均值为 $(4.7 \pm 1.2)\text{MeV}$ 及熵的平均值 $S/A = 2.5 \pm 0.5$, 可以确定碎裂密度接近 $0.1\rho_0$, 这一结果基本上接近碎裂密度为 $(1/3-1/8)\rho_0$ 的理论研究结果. 我们的结果及 S. Fritz^[7] 和 J. P. Ochozalla^[12] 等人的结果都表示核反应过程中的碎裂密度比较低, 核物质压缩膨胀过程中达到的碎裂密度比以前人们设想的密度范围可能更低一些.

参考文献(References)

- 1 Jaqaman H et al. *Phys. Rev.*, 1983, **C27**:2782
- 2 Gross D H E. *Rep. Prog. Phys.*, 1990, **53**:605
- 3 Bondorf J P, Botvina A S, Iljinov A S et al. *Phys. Rep.*, 1995, **257**:133
- 4 Moretto L G, Wozniak G J. *Ann. Rev. Nucl. & Part. Sci.*, 1993, **43**:379
- 5 Schwarz C et al. *GSI Reprort*, 1998, **99-1**:43
- 6 Schwarz C et al. *GSI Reprort*, 2000, 40
- 7 Fritz S, Schwarz C, Bassini R et al. *Phys. Lett.*, 1999, **B461**:315
- 8 Reisdorf W, Ritter H G. *Ann. Rev. Nucl. & Part. Sci.*, 1997, **47**:663
- 9 Hauger J A et al. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:764
- 10 Begemann - Blaich M et al. *Phys. Rev.*, 1998, **C58**:1639
- 11 Avdeyev S P et al. *Eur. Phys. J.*, 1998, **A3**:75
- 12 Pochodzalla J et al. *Phys. Rev.*, 1987, **C35**:1695
- 13 XI Hong - Fei, ZHAN Wen - Long, ZHU Yong - Tai et al. *Nucl. Phys.*, 1993, **A552**:281
- 14 JIN Gen - Min. *Nuclear Physics Review*, 1998, **15**(4):227(in Chinese)
(靳根明. 原子核物理评论, 1998, **15**(4):227)
- 15 Wang G et al. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:R2786; Pratt S, Tsang M B. *Phys. Rev.*, 1987, **C36**:2390
- 16 WEI Zhi - Yong, ZHU Yong - Tai. *Progress in Physics*, 1998, **18**:33; *Chinese Physics Letters*, 1997, **14**(3):169; *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1997, **21**(3):57
- 17 WEI Zhi - Yong, LI Zu - Yu, DUAN Li - Min et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2000, **24**(12):1131(in Chinese)
(魏志勇, 李祖玉, 段利敏等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(12):1131)
- 18 WEI Zhi - Yong, LI Zu - Yu, DUAN Li - Min et al. *Nuclear Technology*, 2001, in press
(魏志勇, 李祖玉, 段利敏等. 核技术, 2001, 待发表)
- 19 Siemens P J, Kapusta J I. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, **43**:1486
- 20 Bertsch G, Cunnon J. *Phys. Rev.*, 1981, **C24**:2514; Bertsch G. *Nucl. Phys.*, 1983, **A400**:221; Csernai L P, Kapusta J I.

Phys. Rep., 1986, **131**:223

- 21 XI Hong - Fei, ZHU Yong - Tai, SHEN Wen - Qing et al. Nucl. Sci. & Tech., 1997, **8**:136—138
- 22 Hahn D, Stöcher H. Nucl. Phys., 1988, **A476**:718—772
- 23 Kuhn C, Konopka J, Coffin J P et al. Phys. Rev., 1993, **C48**:1232—1245
- 24 Jacak B V, Westfall G D, Gelbke C K et al. Phys. Rev. Lett., 1983, **20**:1846—1849
- 25 Doss K G R, Gustafsson H A, Guibrod H H et al. Phys. Rev., 1988, **C37**:163
- 26 Speer J, Kohlmeier B, Pöpl H et al. GSI Report, 1993, **1**:33

Freeze - Out Density of the $35\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ Reaction *

WEI Zhi-Yong^{1,1)} DUAN Li-Min¹ JIN Gen-Ming¹ WU He-Yu¹ LI Zu-Yu¹
SHEN Wen-Qing² XI Hong-Fei¹ ZHU Yong-Tai¹ ZHANG Bao-Guo¹ WANG Hong-Wei¹
XIAO Zhi-Gang¹ LIU Yong-Ying¹ WANG Su-Fang¹ HU Rong-Jiang¹

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

2 (*Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China*)

Abstract Light charged particles emitted from the reactions of $35\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ have been measured. The slope nuclear temperature parameters and the isotope nuclear temperature parameters are extracted from the slope of energy spectra and double isotope yield ratios respectively, and on average, the slope temperatures are slightly larger than the isotope temperatures. The entropy values are extracted also with several methods by using the d/p ratios, d - like/ p - like ratios, reduced yields of isotope d and the reduced multiplicities of charged particles M_{red} , respectively. The entropy values from the reduced yield of isotope d and the reduced multiplicity of charged particles M_{red} are nearly the same, and these two methods can be used in low beam energy heavy ion reactions. The charged particles emitted in rear angles are mainly from an equilibrium state source with temperature about (4.7 ± 1.2) MeV and entropy $S/A = 2.5 \pm 0.5$, from which the Freeze - out density can be deduced. It is nearly but less than $0.1\rho_0$.

Key words freeze - out density, entropy, nuclear temperature, statical emission

Received 25 September, 2000

* Supported by Foundation of The Chinese Academy of Sciences for Scholar Back Abroad, NSFC(19505007) and Major Subject of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T - 03)

1) E - mail: weeizy@west163.com