35 MeV/u ⁴⁰Ar + ¹⁹⁷Au 中的熵产生*

魏志勇[†] 段利敏 吴和宇 靳根明 李祖玉 诸永泰 郗洪飞 沈文庆^{††}

肖志刚 王宏伟 张保国 柳永英 王素芳 胡荣江

(中国科学院近代物理研究所,兰州 730000) (2000年11月17日收到)

根据量子统计模型(QSM)的计算分析,找到了一个提取核反应过程中熵产生的新的可观测量.核反应过程中 约化 d 的产额 d/(d+t+³He+⁴He)和熵有单调的函数关系,并且和体系的碎裂密度(ρ/ρ_0)及体系的 N/Z 都无关, 可以作为提取核反应过程中熵产生的一个观测量.和目前已经有的其他方法相比,约化 d 产额这一提取熵方法可 以用于较低能量的重离子核反应中,并且数据处理分析简单.对于 35MeV/u⁴⁰Ar+¹⁹⁷Au 的核反应过程所提取的 熵和利用约化带电粒子多重性提取的熵结果一致.结合后角类靶热核发射体系实验提取的同位素核温度为 4.7± 1.2MeV 及 S/A = 2.5±0.5 根据熵和核温度的关联关系,可以确定其 Break up 密度接近但小于 0.1(ρ/ρ_0).

关键词:熵,约化d产额,核温度,统计发射 PACC:2570,2410,6550

1 引 言

重离子碰撞为实验室中研究核物质在偏离正常 态(密度在饱和密度 $\rho_0 = 0.16/fm^3$ 附近 温度 T 在 零度附近 的极端条件下的性质提供了唯一可行的 研究手段 在重离子核碰撞中既有动力学过程的影 响,也有统计过程的效应存在.在中心或近中心重 离子碰撞过程中会形成一个平衡态的体系或局部平 衡态的体系,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, 熵是反映剧烈核反应过程中, 压缩、膨胀等 早期行为的物理量,目前,大家对核温度的测量提 取方法讨论较多 而对核反应过程中熵的提取讨论 有限 核反应过程中产生的熵反映了反应过程中相 空间的占用情况. 从熵产生的角度看, 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 重离子的动能转 化为热能和压缩能,大量的熵(80%以上)在这一阶 段产生;在随后的第二阶段,由于大量的核子-核子 碰撞在这一阶段体系进行膨胀,体系中的压缩能转 化为热能及动能释放出来,在膨胀过程中体系的熵有 少量增加,体系的温度有较大下降,这一阶段为绝热 或等熵(isoentropic)膨胀过程;在第三阶段核子之间的 碰撞趋于停止,核子结合为结团、碎片后发射出来.

按照统计力学原理 体系的熵定义为

$$S = -k \sum P_i \ln P_i , \qquad (1)$$

其中 k 为 Boltzmann 常量 , P_i 为体系微观状态 i 所 占的概率. 这种严格意义上的熵无法得到,实际上, 总是找一些能反映核反应过程中熵的观测量来得到 熵. 提取核反应体系中熵的方法有许多种. 首先, Siemens 和 Kapusta^[1]认为在热核体系平衡态中 d 核大量地生成和破裂, $d + N \Leftrightarrow p + n + N$, N 为旁观 者核子或结团. 反应后体系的熵为

$$S/A = 3.95 - \ln R_{\rm dp}$$
 , (2)

其中 R_{dp} 为 d 和 p 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

^{*}中国科学院归国学者基金、国家自然科学基金(批准号:100219505007,100219675053)及中国科学院九五重点项目研究基金(批准号: KI95T-03)资助的课题。

[†]E-mail weizhiyong@yahoo.com ,weizy@why.lzb.ac.cn

⁺⁺中国科学院上海原子核研究所,上海 201800.

效. 这种方法随后被发展成类 d 和类 p 的比 $^{[2-4]}$.

$$\frac{d_{like}}{p_{like}} = \frac{d + 3/\chi t + {}^{3}He + \chi {}^{4}He}{d + p + t + \chi {}^{3}He + {}^{4}He}.$$
 (3)

根据 OSM^[5-11]的计算,有许多实验观测量可作为 熵的量度,如带电粒子多重性、带电粒子的平均电 荷、质量产额的斜率参量等.此外,重碎片(*Z*≥3) 的多重性^[6],也可用于提取熵,并且这一观测量几 乎和 freeze-out 密度无关.由于熵和许多观测量有 关联,实际中通过理论分析研究,拟合许多反应观测 量来提取熵,但数据处理分析十分复杂、繁琐.理想 的方法是找一个仅仅和熵有单调的依赖关系而不随 其他反应参量变化的可观测量,如约化碎片多重 性^[7]

$$M_{\rm red} = \frac{\sum n(z)}{\sum zn(z)}, \qquad (4)$$

此观测量与体系的 Z/N 无关,这种提取熵的方法 对中能核反应仍然有效。

计算分析表明,有一个新的可观测量^[12],即

 $R = d/(d + t + {}^{3}\text{He} + {}^{4}\text{He}),$ (5) 可用于提取核反应过程中的熵,根据量子统计模型 (quantum statistical model ⁵¹,缩写为 QSM)计算,约 化 d 的产额 R 和熵有单调的函数关系,同时这种单 调的函数关系又和碎裂密度及体系的 Z/N 无关. 约化 d 的产额 R 是比较理想的提取熵的可观测量.

2 实 验

实验是在大型圆柱散射室里进行的.实验装置和布局如图1所示.利用 HIRFL 提供的 35MeV/u

的⁴⁰Ar 束流轰击¹⁹⁷Au,靶厚为 674µg/cm². 探测器 采用半导体硅 + Csl(Tl)组合望远镜系统, 三叠层 望远镜中,第一片 ΔE_1 厚度为 $60\mu m$,它是由我们本 所自制. 第二片 ΔE_2 厚度为 $300\mu m$,为 ORTEC 公 司产品. 第三片为 Csl(Tl) 阻止探测器 ,用光二极管 读出. 光二极管(HAMAMATSU S3204-05T)灵敏 面积为 $18mm \times 18mm$. 在反应平面内沿 θ 角在 44.1° 58.8° 79.6° 127.0° 154.9° 157.7°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. 4 个位置灵敏 PPACs 及一个由 12 个 ΔE (Si)+BGO 组成的阵列分别置于前角和零度角、后角放置两个 位置灵敏 PPACs 与前角的 4 个位置灵敏 PPACs 共 同用于余核测量. 在靶子上加 10000V 的直流正高 压以减少进入探测系统的电子的数目. 在实验过程 中利用半导体制冷系统将探测器制冷干零度以下, Csl(TI)对带电粒子的响应具有较复杂的非线性特 点而且和离子的种类有关,亦即 Csl(T1)晶体的光 输出除了表现出和沉积能量的非线性关系外,还和 入射离子的电荷 Z 及质量A 有关^{13,14}]. Csl(T1)的 这些特点致使刻度非常复杂,理想的办法是利用加 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,对于本文的情况,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 这样可以得到各种带电离子在半导体 硅探测器中能损 再利用参数化能损公式 得到进入 Csl(T1) 晶体的各种带电离子的能量,从而实现对



图 1 实验装置及探测器布局

Cs**I(** T1)的刻度. 由此而来的 CsI(T1)光输出响应 如图 2 所示. 图 2 中横坐标为光输出,纵坐标为沉 积在 CsI(T1)中的单核子能量.

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,而后角区发射主要来 自于平衡态,具有统计发射的特征.本文主要讨论 后角区望远镜所测的结果.



图 2 Csl(T1)的光输出与沉积能量的关系

3 结论与讨论

在分析中能核反应过程中热核体系的温度、熵、 密度等参量时,同位素产额比是一个最基本的观测 量,它要求实验测量中,探测系统有较好的电荷及质量鉴别能力.对于 CsI(T1)闪烁体,一般可以达到 分辨 Z = 2的同位素,比较好的探测器才可以分辨 到 Z = 3的同位素.实验中通过减小进入探测器的 杂散电子数目及对探测器制冷的办法,实现了比较 好的能量分辨和粒子鉴别.如图 3 所示的硅半导体 ΔE_2 中的能量信号与 CsI(T1)光输出信号之间的二 维散布图,可以看出,第一、第三及第四套望远镜有 相当好的粒子鉴别能力.图 4 为经过二维变换后的 粒子鉴别.

根据 QSM 计算由(5)式所定义的观测量约化 d 的产额 *R* 和体系的熵之间存在单调函数关系,并且 这种单调关系和体系的 freeze-out 密度 ρ/ρ_0 及体系 的 *N/Z* 几乎无关. 如图 5 所示 , ρ/ρ_0 在 0.1 到 0.5 的范围内变化时,熵和观测量约化 d 的产额 *R* 之间 的关系都落在同一曲线上.

由不同角度发射带电位子的产额,根据这些数据可以用不同的方法提取熵,如图 6 所示.由 d/p 产额比和 d_{like}/p_{like}产额比提取的熵系统性地大于由 约化碎片多重性和约化 d 产额而来的熵.为了清 楚,不同方法提取的熵加了不同大小的常量.

由可观测量 d/p 和 d_{like}/p_{like} 提取熵的方法仅仅



651







图 5 约化 d 产额与体系熵的关系



图 6 对应于不同发射角的单核子熵 ■和●分别为根据 d/p 产额比和 d_{like}/p_{like}产额比提取的熵,▼为由约化碎片多 重性而来的熵 ,▲为约化 d 产额而来的熵

在轰击能量比较高、产生的熵足够大(S/A大于5)时才是可靠的.利用约化 d 产额 R 及 M_{red}提取熵的方法在较低束流能量时仍然可靠,这两种方法给出的结果几乎一致.

图 7 示出熵随轰击能量的关系, S/A(T)为火

球模型的计算结果,S/A(H)为流体力学模型计算的结果.在火球模型计算中假定所有的动能都转化为热能,而在流体力学模型计算中还考虑了压缩能.



图 7 熵产生激发函数 —为 *S*/*A*(*H*),...为 *S*/*A*(*T*), ■为 Kuhn 实验结果⁶] ●为 Doss 实验结果¹⁵,×为本文 实验结果



图 8 单核子熵与同位素核温度的关联

在中能核反应过程中体系的温度可以有较大的 变化而体系的熵则变化较平缓.由 QSM 计算,在 freeze-out 之后,体系的熵会随体系温度的增加而单 调地增加,并且这种温度和熵之间的对应关系还和 freeze-out 的密度有关,由图 8 所示的实线对应于碎 裂密度为 0.1(ρ/ρ_0).根据熵和核温度的关系,可 以得出热核体系的 break up 密度.根据我们的实验 结果,可以确定 break up 密度接近 0.1(ρ/ρ_0),但是 小于 0.1(ρ/ρ_0).实验提取的同位素核温度^[16—19] 的平均值为 4.7±1.2MeV ,熵的平均值 *S*/*A* = 2.5 ± 0.5.

- [1] P.J. Siemens, J. I. Kapusta Phys. Rev. Lett., 43(1979), 1486.
- [2] G. Bertsch, J. Cunnon, Phys. Rev. C24(1981) 2514.
- [3] G. Bertsch, Nucl., Phys., A400(1983), 221.
- [4] L. P. Csernai, J. I. Kapusta, Phys. Rep., 131(1986), 223.
- [5] D. Hahn, H. Stöcher, Nucl. Phys. ,A476 (1988),718.
- [6] C. Kuhn, J. Konopka, J. P. Coffin et al., Phys. Rev., C48 (1993),1232.
- [7] J. Konopka, H. Graf, H. Stöcher, W. Greiner, *Phys. Rev.*, C50(1994) 2085.
- [8] J. Speer, B. Kohlmeyer, H. Pöppl, F. Pühlhofer, K. Völkel, GSI Report, 1(1993) 33.
- [9] M. Dželalija, Z. Basrak, N. Cindro, R. Ĉaplar, S. Hölbling *et al.*, *Phy. Rev.* C52 (1995) 346.
- [10] B. V. Jacak, G. D. Westfall, C. K. Gelbke, L. H. Harwood, W. G. Lynch, D. K. Scott, H. Stöker M. B. Tsang, T. J. M. Symons, Phys. Rev. Lett. 20(1983),1846.
- [11] H. Stöker, G. Buchwald, G. Graebner, P. Subranmanian, J. A. Maruha, W. Greiner, B. V. jacak, G. D. Westfall, Nucl. Phys. ,A400(1983), 63c.

- [12] H.F. Xi, Y. T. Zhu, W. Q. Shen, Z. Y. Wei, Nucl. Sci. Tech. 8 (1997),136.
- [13] Z.Y.Wei, Z.Y.Li, L.M. Duan, Y.Y. Wu, Y.Y.Liu, B. G. Zhang, B.W. Wang, S.F.Wang, Z.G.Xiao, Y.T. Zhu, Z.H. Lu, G.M. Jin, R.J. Hu, H.T. Zhu, *Nuclear Technol*ogy **24**(4) 2001), in press.
- [14] Z. Y. Li, G. M. Jin, Z. Y. He et al., Nucl. Instr. Meth. A373 (1996), 198.
- [15] K. G. R. Doss, H. A. Gustafsson, H. H. Guibrod, D. Hahn, K. H. Kampert, B. Kolb, H. Löhner, A. M. Poskanzer, H. G. Ritter, H. Stöcker, *Phys. Rev.* C37 (1988), 163.
- [16] Z.Y.Wei *et al.*, *Progr. Phys.* **18** (1998) 33(in Chinese) 魏 志勇等 物理学进展 **18** (1998) 33].
- [17] Z.Y.Wei, Y.T.Zhu, Chin. Phys. Lett., 14(1997), 169.
- [18] Z. Y. Wei, Y. T. Zhu, High Energy Physics and Nuclear Physics 21(1998) 57 21(1998) 615.
- [19] Z.Y.Wei, Z.Y.Li et al., High Energy Physics and Nuclear Physics 24(2000),1131(in Chinese] 魏志勇、李祖玉等,高能 物理与核物理 24(2000),1131]

ENTROPY PRODUCED IN 35MeV/u ⁴⁰Ar + ¹⁹⁷Au HEAVY ION REACTIONS *

WEI ZHI-YONG[†] DUAN LI-MIN WU HE-YU JIN GEN-MING LI ZU-YU ZHU YONG-TAI XI HONG-FEI

SHEN WEN-QING^{††} XIAO ZHI-GANG WANG HONG-WEI ZHANG BAO-GUO LIU YONG-YING

WANG SU-FANG HU RONG-JIANG

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

(Received 17 November 2000)

Abstract

Light charged particles emitted from the reactions of $35 \text{MeV/u}^{40} \text{Ar} + {}^{197} \text{Au}$ are measured experimentally. A new observable, $R = d/(d + t + {}^{3}\text{He} + {}^{4}\text{He})$, which is defined as the reduced yield of deuterons, has a monotone relation with the entropy and it is independent of the breakup density (ρ/ρ_0) and N/Z of the system. The entropy values are extracted by using several methods which use the d/p ratios, d_{like}/p_{like} ratios, reduced yield of isotope deuterons R and the reduced multiplicity of charged particles M_{red} , respectively. The entropy values from the reduced yield of isotope deuterons R and the regression reactions. The charged particles M_{red} are nearly the same. These 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 $4.7 \pm 1.2 \text{MeV}$, which are extracted from the double isotope yields ratios, and entropy $S/A = 2.5 \pm 0.5$. This implies that the Break-up density is slightly less than $0.1(\rho/\rho_0)$.

Keywords : entropy , reduced yield of deuterons , Nuclear temperature , statistical emission PACC: 2570, 2410, 6550

^{*} Project supported by the Foundation for Returned Scholars of the Chinese Academy of Sciences, by the National Natural Science Foundation of China Grant Nos. 100219505007 and 100219675053), and by the Foundation for Key Research Program of the China 9th 5-year Plan, from the Chinese Academy of Sciences Grant No. KJ95T-03).

[†]E-mail weizy@why.lzb.ac.cn weizhiyong@Yahoo.com

^{††}Shanghai Institute of Nuclear Research , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800.