

高温低密有限核系统破碎过程中 呈现的相变行为*

萨本豪 郑玉明 张孝泽 卢兆启 许淑艳

(中国原子能科学研究院, 北京)

D. H. E. Gross (蒂特·格罗斯)

(Hahn-Meitner-Institute, Berlin W-Germany)

摘 要

本文给出了用两相微正则系综蒙特卡罗模拟研究高温低密有限核系统破碎过程, 得到有关相变行为的结果。上述系统所特有的这些相变行为, 是库仑相互作用和有限大小效应竞争的结果。

一、引 言

近年来, 中高能核子-核和核-核碰撞的研究, 普遍受到重视。而且逐渐发展成为介于原子核物理和粒子物理之间的一个前沿阵地。

这不但因为它涉及到原子核物理和粒子物理的共同基础——强相互作用问题, 还因为在这些碰撞过程中, 可能显示出丰富的崭新实验事实。特别是, 在此碰撞过程中可能呈现的液气相变和禁闭-非禁闭相变, 倘若在实验室观察到, 那将是对物质结构的重大贡献。

在很高能量的核子打核(或核打核)之后, 形成的复合系统将先发生激烈的能量交换, 进入加热和压缩的过程。随着快粒子(主要是 π)的发射, 系统将开始降温和膨胀; 最后系统在一定的温度(凝结温度)和体积(凝结体积)下解体。一般认为: 凝结温度约为5—10 MeV, 凝结密度约为 $0.01-0.1\text{fm}^{-3}$ 。

这种高温低密有限核系统的破碎过程, 已成为当前广泛感兴趣的课题^[1-3]; 本文将集中讨论此破碎过程中呈现的相变行为。

我们用半经典统计模型作相空间计算, 即假设复合系统在破碎瞬间, 处于热平衡状态, 这时描述复合系统状态的完整力学数量组(相点) $\bar{x} = \{N_c, N_n; \{A_i, Z_i\}_{i=1}^{N_c}, \{\mathbf{r}_i\}_{i=1}^{N_c}, \{\mathbf{p}_i\}_{i=1}^{N_c}, \{\boldsymbol{\varepsilon}_i\}_{i=1}^{N_c}, \{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{N_n}, \{\mathbf{q}_i\}_{i=1}^{N_n}\}$, 包括:

* 国家自然科学基金资助项目。

本文1987年11月27日收到。

荷电碎块数 N_c ,

中子(瞬发和缓发)数 N_n ,

荷电碎块的质量和电荷数序列 $\{A_j, Z_j\}_{j=1}^{N_c}$,

碎块的位置序列 $\{\mathbf{r}_j\}_{j=1}^{N_c}$,

碎块的动量序列 $\{\mathbf{p}_j\}_{j=1}^{N_c}$,

碎块的内禀状态序列 $\{\epsilon_j\}_{j=1}^{N_c}$,

中子的位置序列 $\{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{N_n}$, 和

中子的动量序列 $\{\mathbf{q}_i\}_{i=1}^{N_n}$.

(这儿, 带电粒子的蒸发被忽略, 中子的蒸发在时间上近似地集中到破碎瞬时来考虑.)

破碎瞬时复合系统的状态, 构成一个正则^[2,4]或微正则系综. 因此在用蒙特卡罗方法完全随机地产生了复合系统状态之后, 就可根据正则或微正则系综的分布函数, 求得碎块的各种分布, 以与相应的实验数据作比较^[2,4-6].

由于蒙特卡罗模拟, 充分考虑了各种统计涨落效应, 能有效地用来研究相变现象. 结果表明: 高温低密有限核系统破碎过程中, 确实呈现有相变行为; 它是一类特殊的相变, 是在此过程中起主要作用的库仑力和有限大小效应竞争的结果.

二、相变的理论迹象

文献[2]给出了有关这类相变的第一个理论结果. 它是复合系统 $^{238}\text{U}^*$ 在破碎瞬间的热容量 C_v 对温度 T 的曲线中, 在 $T \simeq 5\text{MeV}$ 附近的峰结构^[2].

后来文献[6]又用微正则系综蒙特卡罗模拟进一步研究了这类相变行为; 他们发现: 复合系统 $^{131}\text{Xe}^*$ 在破碎瞬间的总激发能 E^* 与温度 T 的关系 (见图 1 中的点), 在温度为 5MeV 附近, 激发能有一个平台结构; 在平台范围 ($\sim 300-450\text{MeV}$) 内, 激发能的继续增加, 却不导致温度的上升; 这儿有约 150MeV 的潜热存在. 同样地, 在温度为 6MeV 左右, 似乎也有一个宽度为 100MeV 的激发能平台 ($\sim 650-700\text{MeV}$). 图 1 中的虚线是相应的无库仑力的结果; 实线是费米气体的相应结果, 即 $E^* = \frac{A}{8} T^2$.

作者还指出: 第一激发能平台结构, 是对应于从主要是蒸发破碎模式(所有碎块中只有一个碎块的质量数 $A_j \geq 10$, 其余都是小碎块), 到裂变模式(有两个 $A_j \geq 10$ 的大碎块, 其余为小碎块)开始出现并占相当重要地位的模式相变行为. 第二激发能平台, 可解释为: 碎裂模式(有三个以上 $A_j \geq 10$ 的大碎块)开始出现并占相当比重的模式相变行为.

那么, 除这些破碎模式相变之外, 是否还有液气相变呢? 为了回答这个问题, 本文扩展了微正则系综蒙特卡罗模拟程序; 把瞬发的中子, 质子以及 α 粒子, 视作气相; 其余的荷电碎块, 视为液相; 作两相模拟以研究此种两相系统的相发展行为, 亦即复合系统破碎模式的变化过程. 因为现在总碎块数的数目比较大, 不宜再像过去那样严格地计算碎块间的

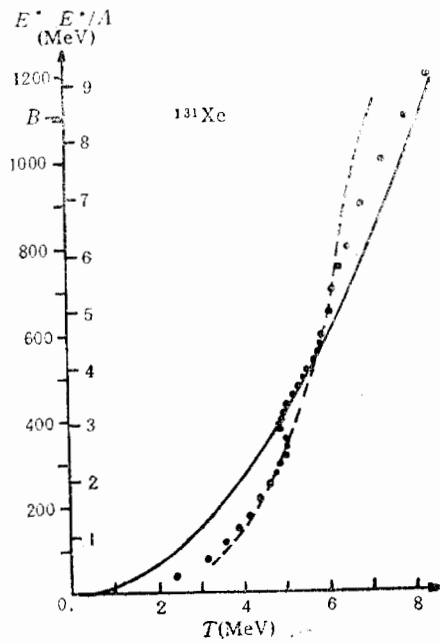


图1 复合系统 $^{131}\text{Xe}^*$ 破碎瞬间的热力学温度与激发能的关系

点: 微正则系综蒙特卡罗模拟的结果.

虚线: 相应的无库仑力的结果.

实线: 费米气体的结果, 即 $E^* = (A/8)T^2$.

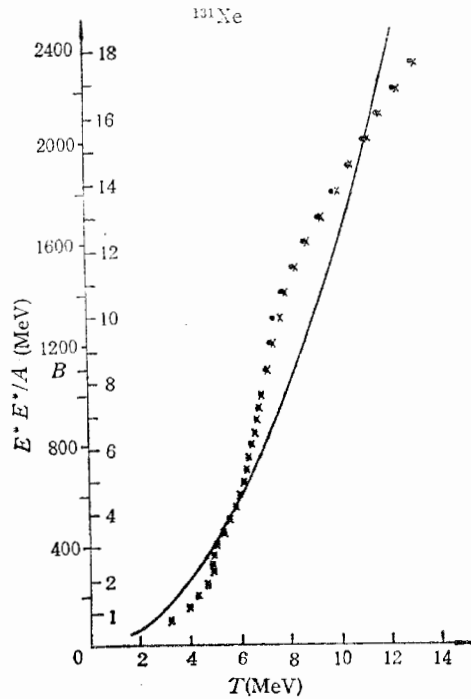


图2 复合系统 $^{131}\text{Xe}^*$ 破碎瞬间的热力学温度与系统激发能的关系(两相模拟)

库仑相互作用, 而代以它的一种很好的简化的近似办法^[7].

图2给出了复合系统 $^{131}\text{Xe}^*$, 破碎瞬间的总激发能 E^* 与温度 T 关系的两相模拟的结果. 图中 \bullet 和 \times 分别对应于考虑和不考虑气相基态能量的结果, 实线是费米气体相应的结果. 相应的破碎模式比重随激发能的变化给在图3中; 这儿除蒸发破碎模式 E 、裂变破碎模式 F 和碎裂模式 C 外, 还引进了全轻碎块模式 L (所有碎块中没有一个碎块的质量数 $A_i \geq 10$).

由图2和3可见, 在加进气相后的两相模拟的结果中, 原壹相模拟结果的第一激发能平台, 依然明显存在. 第二激发能平台, 则模糊了; 这主要是因为: 现在 C 模式不再占绝对优势. 更重要的事实是: 在总激发能约为 1500MeV (每核子激发能为 11MeV 或温度为 8MeV) 以上, 气相将开始增加并逐渐占主导地位; 也就是液气相变将开始出现.

三、相变机理的讨论

文献8和9研究了热的无限核物质的解体过程. 他们发现: 假如核物质的平均核子密度低于正常核密度 $\rho_0 = 0.15\text{fm}^{-3}$, 而且温度不太高时(譬如十几 MeV), 核物质的性质就很像范德瓦耳系统. 核力将使核子凝结成小集团(小液滴), 从而发生由核物质整体

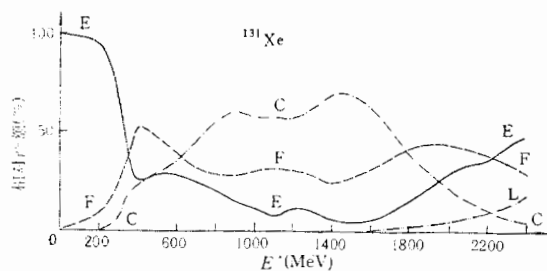


图 3 复合系统 $^{131}\text{Xe}^*$ 的破碎模式随激发能的变化(两相模拟的结果)

- E: 所有碎块中只有一个质量数 $A_f \geq 10$ 的大碎块,其余为小碎块的蒸发破碎模式;
 F: 有两个 $A_f \geq 10$ 的大碎块的裂变破碎模式;
 C: 有叁个以上 $A_f \geq 10$ 的大碎块的碎裂模式;
 L: 所有碎块中没有质量数 $A_f \geq 10$ 的全轻碎块模式.

到许许多多小液滴的液气相变. 予期的临界温度,约为 12—20MeV. 文献[9]中还指出,倘若理论模型中所含的参数(如核子结合能等),用有限核的相应值代替,临界温度值还可大大降低.

前面所揭示的呈现于复合系统破碎过程中的,从破碎模式相变到液气相变的整个相变行为,是高温低密有限核系统所固有的一种特殊的相变行为. 它完全不同于热的无限核物质解体为轻碎块的液气相变;后者是由于核力的缘故;前者则是库仑力与有限效应竟

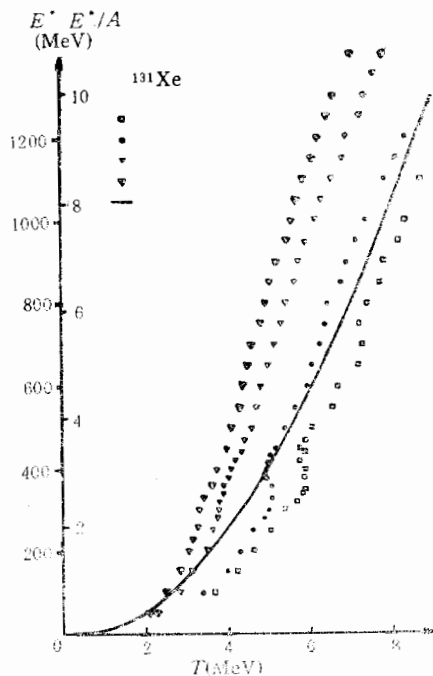


图 4 复合系统 $^{131}\text{Xe}^*$ 破碎瞬时的激发能对温度曲线随破碎体积参数 R_{T0} 的变化

\square : $R_{T0} = 1.70\text{fm}$, \odot : $R_{T0} = 2.05\text{fm}$,

∇ : $R_{T0} = 2.70\text{fm}$, \blacktriangledown : $R_{T0} = 3.20\text{fm}$, —: $E^* = \frac{A}{8} T^2$

争的结果, 详见下面分析.

图1中的虚线, 是不考虑库仑力下复合系统 $^{131}\text{Xe}^*$ 破碎瞬时的总激发能 E^* 与温度 T 的关系; 将它与考虑库仑力的相应结果即图1中的点线相比较; 我们看到: 关闭了库仑力后, 激发能平台结构全部消失, 即前面所述的相变行为统统消失.

另一方面, 我们又研究了上述相变行为随复合系统破碎瞬时的体积的变化情形(见图4). 图4中的空方块, 实点, 空三角和实三角所示的 $E^*(T)$ 曲线, 分别对应于破碎体积参数 $R_{T_0} = 1.70, 2.05, 2.70$ 和 3.20fm 的结果(破碎体积 $V_T = \frac{4\pi}{3} R_{T_0}^3 A_T$, A_T 是复合系统的质量数). 由这些曲线我们看到: 上述的相变行为, 即激发能曲线的平台结构, 随破碎体积的加大而模糊, 最后趋于消失(这儿需要补充说明一下, 图1—3的结果, 都是对应于 $R_{T_0} = 2.05\text{fm}$ 的).

最后必须指出, 以上关于封闭库仑力的结果, 出自壹相模拟; 估计两相模拟的结果不会有太大改变, 但有待于证实. 另外, 为了更好的分析液气相变, 还有必要考察液相成份(如 $A_f > 5$ 的碎块)和气相成份(如 $A_f \leq 5$ 的碎块), 随系统激发能的变化曲线. 还有, 到了激发能 $E^* = 2000\text{MeV}$ 处, 平均瞬发质子数和荷电粒子总数, 已分别达到19和37; 离模拟中允许有的最多瞬发质子数(21)和复合系统电荷数($Z_T = 54$), 已不远. 这种瞬发质子数的截断和荷电粒子数的上限, 对 $E^* > 2000\text{MeV}$ 的理论结果的效应, 也有待于进一步作研究.

参 考 文 献

- [1] J. Randrop and S. E. Koonin, *Nucl. Phys.*, **A356**(1981), 223.
G. Fai and J. Randrop, *ibid.*, **A381**(1982), 557; **A404**(1983), 551.
- [2] Sa Ben-Hao and D. H. E. Gross, *Nucl. Phys.*, **A437**(1985), 643.
D. H. E. Gross and Zhang Xiao-ze, *Phys. Lett.*, **161B**(1985), 47.
D. H. E. Gross, Zhang Xiao-ze and Xu Shu-yan, *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 1544.
- [3] J. Bandorf, R. Donangelo, I. N. Mishustin, C. J. Pethick, H. Shulz and K. Sneppen, *Nucl. Phys.*, **A443**(1985), 321, **A444**(1985), 460, **A448**(1987), 753.
- [4] Zhang Xiao-ze, D. H. E. Gross, Xu Shu-yan and Zheng Yu-ming, *Nucl. Phys.*, **A461**(1987), 641.
- [5] Zhang Xiao-ze, D. H. E. Gross, Xu Shu-yan and Zheng Yu-ming, *Nucl. Phys.*, **A461**(1987), 668.
- [6] Zheng Yu-ming, H. Massmann, Xu Shu-yan, D. H. E. Gross, Zhang Xiao-ze, Lu Zhao-qi and Sa Ben-hao, *Phys. Lett.*, **194B**(1987), 183.
D. H. E. Gross, Zheng Yu-ming and H. Massmann, *Phys. Rev. Lett.*, (in press).
- [7] 张东, 萨本豪, 张孝泽和金星南, 很热的余核多破碎过程中的凝结体积效应, 即将发表于高能物理与核物理.
- [8] U. Mosel, P. G. Zint and K. H. Passler, *Nucl. Phys.*, **A236**(1974), 252.
- [9] H. Jaqaman, A. Z. Mekjian and L. Zamick, *Phys. Rev.*, **C27**(1982), 2782.

ON THE BEHAVIOR OF PHASE TRANSITION SHOWN IN DISASSYMBLY PROCESSES OF VERY HOT AND DILUTE FINITE NUCLEAR SYSTEMS

SA BENHAO ZHENG YUMING ZHANG XIAOZE LU ZHAOQI XU SHUYAN

(Institute of Atomic Energy, Beijing)

D. H. E. GROSS

(Hahn-Meitner-Institute, Berlin, W-GERMANY)

ABSTRACT

The behaviors of phase transition shown in disassembly processes of very hot and dilute finite nuclear system have been exposed by using canonical (microcanonical) ensemble Monte Carlo simulation. It is explained that they result from the competition between Coulomb interaction and the effect of finiteness.

1443

-hao,

勿理.

卷
度
库
图
积
系
自
破
拉
不
份
有,
37;
瞬
于