

非完全熔合碎裂模型与核液气相变*

王 辉 郑玉明 萨本豪 张孝泽

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1995-12-13 收稿

摘 要

用非完全熔合碎裂模型来分析 600MeV / u Au+Au 反应中弹剩余核的多重碎裂现象. 理论计算得到的弹剩余核质量数、激发能及热力学温度与实验数据基本一致, 很好地解释了 Au+Au 反应中热力学温度随每核子激发能变化而出现的回弯现象, 使衰变模式相变和液气相变统一起来.

关键词 ALADIN 多重碎裂数据, 弹剩余核, 衰变模式, 热力学温度, 液气相变.

1 引 言

近来德国 GSI-ALADIN 实验组研究了 100、400、600、1000MeV 入射能量下 Au 与各种靶核(C, Al, Cu, Au 和 Pb 等)碰撞后弹剩余核的多重碎裂现象^[1-5], 观测到中等质量碎块 ($3 \leq Z \leq 30$) 平均多重性 ($\langle M_{MF} \rangle$) 随 Z_{bound} (事件内所有 $Z \geq 2$ 碎块电荷总和, 能够反映碰撞的剧烈程度) 的变化: 从大 Z_{bound} 值的类蒸发过程一直到小 Z_{bound} 值的弹剩余核完全分解. 还观察到各电荷有关量与 Z_{bound} 的关联: 最大碎块电荷平均值 $\langle Z_{\text{max}} \rangle$, 最大三碎块电荷量间两体不对称性 a_{12} , a_{23} 和三体不对称性 a_{123} , 电荷组合矩 γ_2 , 以及 Dalitz 三角形图和 Campi 图 ($\ln \langle Z_{\text{max}} \rangle$ 随着 $\ln \langle M_2 / M_1 \rangle$ 变化). 这些观测结果与靶核大小无关, 也与入射能量无关; 有力证实了弹剩余核的形成先于衰变, 并表明了热核衰变的统计性质. 这些 ALADIN 数据, 已被统计模型、动力学统计混合模型、动力学渗流混合模型^[4-11], 以及非完全熔合碎裂模型^[12-17] 等许多模型所解释.

最近, ALADIN / LAND 实验组^[18,19] 研究 600MeV / u Au+Au 反应中弹剩余核的衰变, 根据实验测得的碎块质量、电荷分布, 在推导出弹剩余核的质量数 A_0 、电荷数 Z_0 、相应激发能 E_0 以及同位素温度 T_{HeLi} 后, 发现随每粒子平均激发能 $\langle E_0 \rangle / \langle A_0 \rangle$ 的变化, 温度 T 曲线可以明显分为三段: $\langle E_0 \rangle / \langle A_0 \rangle < 3\text{MeV}$ 时具有类费米液体性质; $\langle E_0 \rangle / \langle A_0 \rangle$ 在 3—10MeV 之间 T 保持 4.5—6MeV 范围内不变; $\langle E_0 \rangle / \langle A_0 \rangle > 10\text{MeV}$ 时, T 以斜率 2/3 稳定增加, 表现出类费米气体热力学性质. 证实了核液气相变的存

* 国家自然科学基金资助.

在. 此液气相变的新结果尚未见有理论解释.

本文用非完全熔合碎裂模型来分析 600MeV /u Au+Au 反应中弹剩余核的多重碎裂现象. 在稍微调整与激发能有关的模型参数以再现 $\langle M_{\text{IMF}} \rangle - \langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 关联后, 不但理论计算得到的弹剩余核质量数, 激发能及热力学温度与实验数据基本一致, 而且很好地再现了 Au+Au 反应中热力学温度随每核子激发能变化而出现的回弯现象——液气相变, 并使衰变模式相变和液气相变统一起来.

2 模型描述

我们建议的非完全熔合碎裂模型^[12-17]本身就是动力学和统计的结合. 它把中能核—核碰撞简单地划分为热核形成和热核衰变(碎裂)两个阶段. 此模型认为热核形成是动力学过程(非完全熔合过程), 热核衰变是统计过程.

模型中假设: 靶核的核子以及弹核和靶核几何重迭区内的弹核核子 N_p 构成靶剩余核(热核之一), 交迭区外的弹核核子构成弹剩余核(另一热核), 分别用以描写与靶剩余核碎裂和弹剩余核碎裂有关的反应末态核产物及其各种物理量分布.

位于弹核与靶核交迭区内的弹核核子数

$$N_p(b) = \rho_0 \int dV \theta \{ R_p - [x^2 + (b-y)^2 + z^2]^{1/2} \} \theta \{ R_T - (x^2 + y^2)^{1/2} \}, \quad (1)$$

式中 $\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$ 是正常核密度, $\theta(x)$ 是阶梯函数, b 是碰撞参数. 进而得到了弹和靶的剩余核的质量数 A_p 和 A_T . 假设弹剩余核的荷质比 Z/A 等于弹核的相应比值, 就得到弹和靶的剩余核的电荷数 Z_p 和 Z_T .

假设在非完全熔合情形下, 弹旁观者核子作为整体(弹剩余核)以束流速度飞出. 那么, 由质量守恒可得到反应能 Q . 再由能动量守恒, 可求得沉积于热复合核系统(靶和弹剩余核)的能量

$$E_{\text{avai}} = \frac{N_p}{A_p^0} \frac{A_T^0}{A_T^0 + N_p} E_{\text{in}} + Q, \quad (2)$$

以及沉积于弹剩余核的能量

$$E_p = f_p \frac{A_p}{A_p + A_T} E_{\text{avai}}. \quad (3)$$

(沉积于靶剩余核的能量亦可类似求得). 进而得到弹剩余核的总激发能量

$$E_p^* = C_p \times E_p \quad (4)$$

和相应的每核子激发能量 $e_p^* = E_p^* / A_p$. 上述公式中 A_p^0 和 A_T^0 分别是弹核和靶核质量数; E_{in} 是入射能量, f_p 是弹剩余核核子分得总沉积能量的权重因子, C_p 是沉积于弹剩余核的能量转化为激发能的部分数. 另一部分消耗于趋向热平衡的过程中, 如预平衡发射、膨胀流等. 部分数 $C_p^* = f_p \times C_p$ 作为一个模型参数.

如上形成的热核接着按统计规律衰变. 这里延用瞬时多重碎裂统计模型(Berlin-Beijing 模型)^[20,21]. 即假设热核瞬时衰变到由完整力学数量组 $\{N_c, N_n, \{A_i, Z_i\}_{i=1}^{N_c},$

$\{\mathbf{r}_i\}_1^{N_c}$, $\{\mathbf{p}_i\}_1^{N_c}$, $\{\varepsilon_i\}_1^{N_c}$, $\{\mathbf{r}_j\}_1^{N_n}$, $\{\mathbf{p}_j\}_1^{N_n}$ 所描写的组态, 这儿 N_c 和 N_n 分别是荷电碎块(含质子)数和中子数, $\{A_i, Z_i\}_{i=1}^{N_c}$ 是碎块的质量数和电荷数序列; 其余变数依次分别是碎块的坐标、动量和内禀激发能序列, 以及中子的坐标和动量序列. 满足质量、电荷和能守恒的上述组态, 被假设为正则或微正则分布. 用蒙特卡罗方法和相应的 Metropolis 技巧, 产生了大量(如 10^7)的组态后, 物理观察量就是相应的物理算符对这些组态的平均, 必要时最后再对碰撞参数平均, 即可与实验比较.

3 结果与讨论

图 1 给出了 600MeV/u Au+Au 反应弹剩余核碎裂中作为 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 函数的中等质量

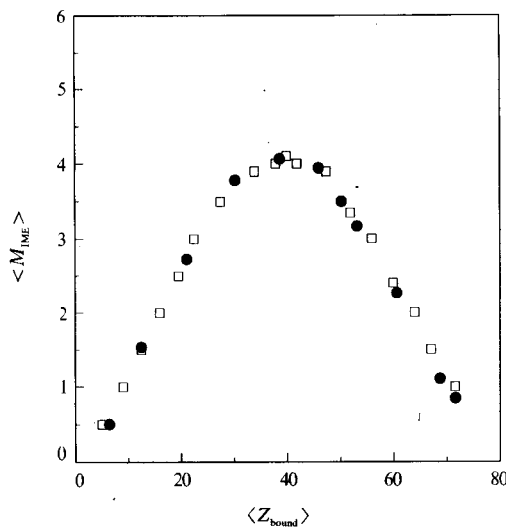


图 1 600MeV/u Au+Au 反应中中等质量碎片的平均多重性 $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$

Z_{bound} 是所有 $Z \geq 2$ 碎片的电荷总和. \square 表示 ALADIN 实验数据, \bullet 表示熔合碎裂模型计算结果.

碎块平均多重数 $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$. ALADIN 实验数据^[18,19]与熔合碎裂模型计算结果完全一致. 从图中可以看出, 随 Z_{bound} 的减小, 即随碰撞趋向剧烈, 中等质量碎块平均多重性 $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$ 逐增直至 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 为 40 附近达到最大值(4.2), 然后转而减小. 这反映了热核衰变的从类蒸发模式到多重碎裂模式再到气泡化模式的自然过渡过程^[22-24], 说明了热核的多种衰变模式的共存性及随碰撞剧烈程度的变化及其主次地位的相应变化.

用熔合碎裂模型计算时, 参数 C_f^F (约为 $0.10 \times 0.70 = 0.07$) 的调节与图 1 中 $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$ 的最大值有关. $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 小时 ($\langle Z_{\text{bound}} \rangle < 20$), 弹剩余核很小, 每核子平均激发能变化范围相对要大得多, 因此 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle < 20$ 时, 参照实验 $\langle E_p \rangle / \langle A_p \rangle$ 对 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 曲线的走向, 逐步加大模型中每核

子平均激发能, 而不象过去那样^[4,6-12,17] 让其渐趋饱和.

在给定 Z_{max} (最大碎块电荷) 间隔内的弹剩余核的质量数 $\langle A_p \rangle$ 随 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 的变化, 以不同的符号给在图 2 中. ALADIN 实验结果与熔合碎裂模型计算结果基本一致, 仅在 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 很小时, 熔合碎裂模型结果较 ALADIN 实验值稍小. 理论与实验结果均表明, $\langle A_p \rangle$ 随 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 的减小而近似线性地减小, 与 Z_{max} 大小无关.

在图 3 中给出了作为 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 函数的给定 Z_{max} 间隔内的弹剩余核每核子平均激发能 $\langle E_p \rangle / \langle A_p \rangle$. $\langle E_p \rangle / \langle A_p \rangle$ 较大值对应于 Z_{max} 较小值, 即对应一个给定质量数的热核系统的更彻底地分解.

实验的平均激发能是按 Campi 建议^[18,25] 计算的. 即对每一给定事件, 平均激发能 $\langle E_p \rangle$ 由能量守恒得到

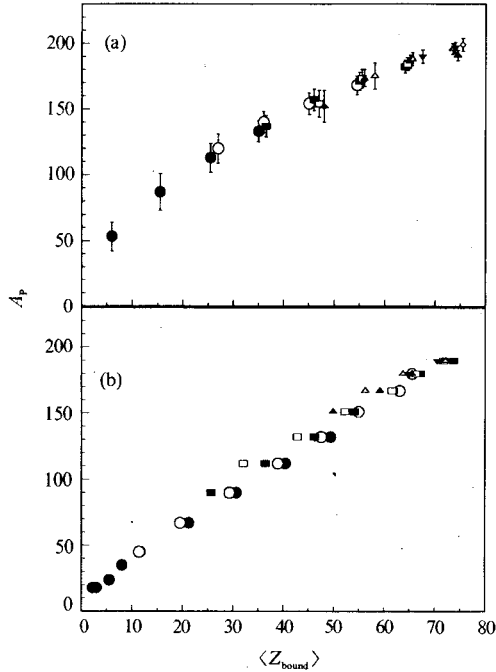


图 2 600MeV /u Au+Au 反应中给定 Z_{max} 间隔内的弹剩余核的质量数 $\langle A_p \rangle$

(a) ALADIN 实验结果, (b) 熔合碎裂模型结果. 按 Z_{max} 分间隔: ● 2—10, ○ 11—20, ■ 21—30, □ 31—40, ▲ 41—50, △ 51—60, ▼ 61—70, ◇ 71—80.

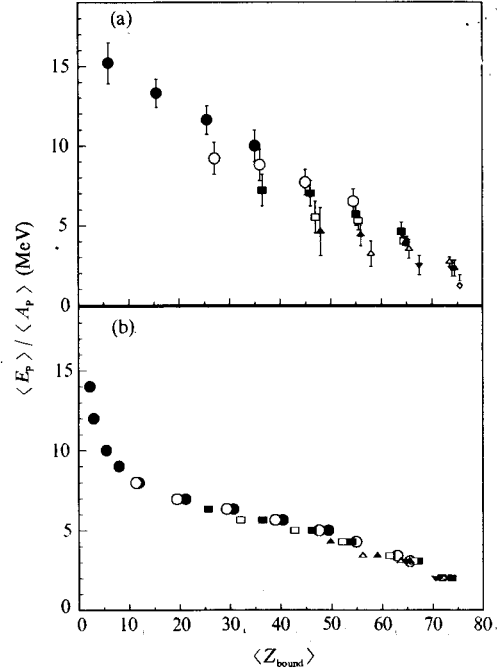


图 3 600MeV /u Au+Au 反应中给定 Z_{max} 间隔内的弹剩余核每核子平均激发能 $\langle E_p \rangle / \langle A_p \rangle$

(a)、(b) 及符号说明同图 2.

$$\langle E_p \rangle = \left(\langle \sum_i m_i \rangle + \langle \sum_i K_i \rangle \right) - (\langle m_0 \rangle + \langle K_0 \rangle), \quad (5)$$

这里 m_i 是碎块质量, K_i 是碎块动能, m_0 和 K_0 是质量数 A_p 电荷数 Z_p 的弹剩余核的质量和动能. 必须指出, 这里的“激发能”其实是非完全熔合碎裂模型中沉积于弹剩余核的能量, 它只有一部分转化为弹剩余核的真正的激发能, 而另一部分则消耗于预平衡发射和膨胀流等过程中. 其实 Campi 在文献[25]中已经指出了这一点. 这就是理论结果系统地低于实验值, 特别是这种偏差随 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 的减小愈趋加大(因为消耗于预平衡发射和膨胀流的能量亦愈趋加大)的原因.

图 4 是 600MeV /u Au+Au 反应中弹剩余核的热力学温度 T 与每核子平均激发能 $\langle E_p \rangle / \langle A_p \rangle$ 的关系. 这里

$$T = \left\langle \frac{2E'_0}{3(N_c + N_n) - 5} \right\rangle, \quad (6)$$

式中 N_n 是瞬发中子数目, E'_0 是碎块和瞬发中子的总动能. 熔合碎裂模型结果(实圆点)与 ALADIN 实验数据(空圆点)符合得较好. 考虑到实验激发能实际算大了, 纠正过来后, 估计实验的温度平台将略微变窄, 从而与理论更趋一致. 这个温度平台可看成核液

气相变的证据.

由图4中熔合碎裂模型结果的局域放大可以看到明显的回弯结构(A),(B)和(C),它们分别对应于下列衰变模式转变:(A) $E \rightarrow E+F$; (B) $E+F \rightarrow M$; (C) $M, F, E \rightarrow V$. 这里, E, F, M 和 V 分别表示类蒸发模式, 类裂变模式, 多重碎裂模式及汽化模式. 由于实验只给出碎块电荷分布, 这里根据参考碎块电荷数

$$Z_r = \frac{Z_h}{C} \quad (7)$$

(式中 Z_h 是热核电荷数, C 是常数, 约为 10) 来定义各种衰变模式: 若热核衰变成的碎块中只有一块碎块电荷数 $Z_r \geq Z_r$, 其余为轻碎块的事件属类蒸发(E)模式; 类裂变(F)模式是指只有两块碎块电荷数 $Z_{r1}, Z_{r2} \geq Z_r$, 其余为小碎块的事件; 多重碎裂(M)模式则为有三块或三块以上碎块电荷数 $Z_{r1}, Z_{r2}, Z_{r3} \geq Z_r$ 的事件; 而仅有质子、中子和一些轻电荷碎块 ($Z_r \leq 2$) 的事件则属于汽化(V)模式.

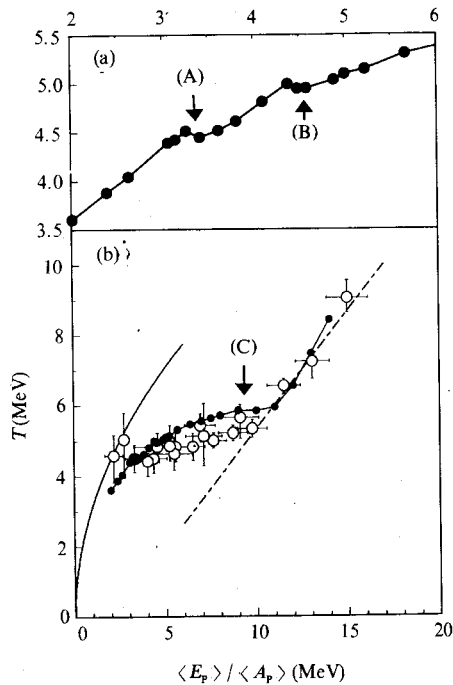


图4 600MeV / u Au+Au 反应中弹剩余核的热力学温度 T 与每核子平均激发能 $\langle E_p \rangle / \langle A_p \rangle$ 的关系
(a) 放大的部分区域内熔合碎裂模型结果, (b) 实验数据与模型结果的比较. ●是熔合碎裂模型结果, ○是ALADIN实验数据. 文中给出详细说明.

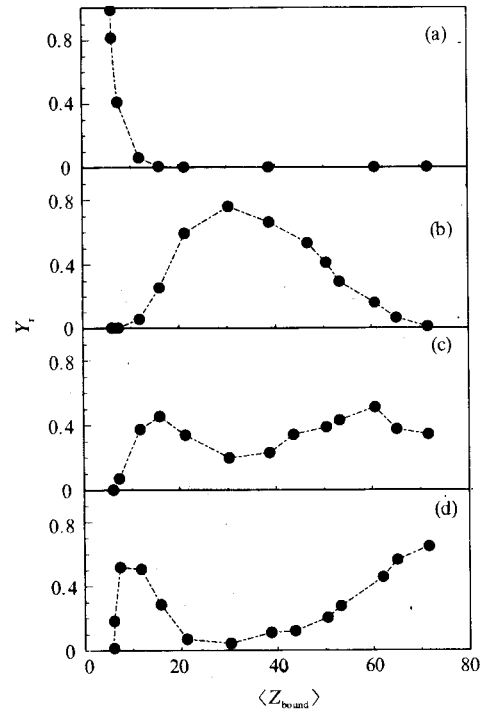


图5 600MeV / u Au+Au 反应中弹剩余核衰变模式相对产额随 $\langle Z_{bound} \rangle$ 的变化
(a) 汽化模式, (b) 多重碎裂模式, (c) 类裂变模式, (d) 类蒸发模式.

从图5可以更清楚地了解到上述衰变模式间的竞争和相互转换: 当 $\langle Z_{bound} \rangle$ 很大时, E 模式占很大部分, F 模式有一小部分, M 模式及 V 模式还没有出现. 随着 $\langle Z_{bound} \rangle$ 减

小, E 模式事件减少, 而 F 模式事件增多并达到极值, M 模式事件开始出现且增多, 无 V 模式事件, 此时出现 $E \rightarrow E+F$ 模式的转变. 当 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 再减小时, E 模式事件继续减少, F 模式事件开始减少, M 模式事件迅速增加, 无 V 模式事件, 出现 $E+F \rightarrow M$ 模式转变. 随着 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$ 的继续减小, M 模式产额迅速减小, F 和 E 模式事件增加直至极值后也迅速减少, 这时刚出现的 V 模式事件则迅速增多并占绝大多数, 于是出现 M, F, $E \rightarrow V$ 模式的转变, 和图 4 中出现的诸个回弯现象完全对应.

参 考 文 献

- [1] M. B. Tsang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **71**(1993)1502.
- [2] C. A. Ogilvie *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991)1214.
- [3] J. Hubele *et al.*, *Z. Phys.*, **A340**(1991)263; J. Hubele *et al.*, *Phys. Rev.*, **C46**(1992)R1577.
- [4] P. Kreutz *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A556**(1993)672.
- [5] W. Trautmann *et al.*, GSI preprint, 93—76(1993); also GSI 05—94.
- [6] A. S. Botvina, I. N. Mishustin, *Phys. Lett.*, **B294**(1992)23; A. S. Botvina *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A584**(1995)737.
- [7] H. W. Barz, W. Bauer, J. P. Bondorf *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A561**(1993)466.
- [8] Bao-An Li, A. R. DeAngelis, D. H. E. Gross, *Phys. Lett.*, **B303**(1993)225.
- [9] J. Pochodzalla *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A583**(1995)553c.
- [10] Y. M. Zheng, J. Richert, P. Wagner, *Chinese J. Nucl. Phys.*, **17**(1995)215.
- [11] Y. M. Zheng, J. Richert, P. Wagner, *J. Phys.*, **G22**(1996)505.
- [12] Zheng Yuming, Wang Fei, Sa Benhao *et al.*, *Phys. Rev.*, **C53**(1996)1868.
- [13] Sa Benhao, Zheng Yuming, Zhang Xiaoze, *Phys. Rev.*, **C40**(1989)2680.
- [14] Chih Tahai, Sa Benhao, Zhang Xiaoze *et al.*, *Phys. Rev.*, **C42**(1990)2187.
- [15] W. X. Li, T. Y. Sun, T. H. Chih *et al.*, *Phys. Rev.*, **C48**(1993)628.
- [16] Zheng Yuming, Chih Tahai, Li Wenxin *et al.*, *Chinese J. Nucl. Phys.*, **14**(1992)116.
- [17] 王 飞、郑玉明、萨本豪等, 高能物理与核物理, **20**(1996)644; 王 飞、萨本豪、郑玉明等, 高能物理与核物理, **20**(1996)729.
- [18] J. Pochodzalla *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **75**(1995)1040.
- [19] W. F. J. Müller *et al.*, Report No. GSI-Nachrichten-03-95, 1995.
- [20] Zhang Xiaoze, D. H. E. Gross, Xu Shuyan *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A461**(1987)641; 668.
- [21] Sa Benhao, D. H. E. Gross, *Nucl. Phys.*, **A437**(1985)643.
- [22] Zheng Yuming, H. Massmann, Xu Shuyan *et al.*, *Phys. Lett.*, **B194**(1987)183.
- [23] D. H. E. Gross, Yuming Zheng, H. Massmann, *Phys. Lett.*, **B200**(1988)397.
- [24] Sa Benhao, Zheng Yuming, Zhang Xiaoze, *Int. J. Mod. Phys.*, **A5**(1990)843.
- [25] X. Campi, H. Krivine, E. Plagnol, *Phys. Rev.*, **C50**(1994)R2680.

Incomplete-Fusion-Fragmentation Model and Nuclear Liquid-Gas Phase Transition

Wang Hui Zheng Yuming Sa Benhao Zhang Xiaoze

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Received 13 December 1995

Abstract

Incomplete-Fusion-Fragmentation Model is used to analyze the multifragmentation of the projectile remnant in 600MeV /u Au+Au reaction. The theoretical results of the mass number, the excitation energy and the thermodynamical temperature of the projectile remnant agree well with experimental data. The backbending structure in the curve of temperature as a function of the excitation energy per nucleon, i. e. the evidence of liquid-gas phase transition, is reproduced and reasonably related to the decay modes phase transformation from dominance of the multifragmentation mode to the vaporization mode.

Key words ALADIN multifragmentation data, projectile remnant, decay modes, thermodynamical temperature, liquid-gas phase transition.