

# 重离子碰撞碎裂动力学过程中的 压缩和热激发效应\*

葛凌霄 曾祥华 刘建业

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

曾保生

(兰州大学现代物理系)

## 摘 要

在 Vlasov 方程框架下, 计算了中高能重离子碰撞所形成热核系统的膨胀动力学过程. 结果表明, 压缩效应对于碎裂显得更有效.

## 一、引 言

在中高能重离子碰撞中核的碎裂研究是一个十分重要的课题. 它不仅牵涉到如何理解碎裂机制, 而且还牵涉到高温高压核物质的基本特征. 本文试图揭示一个高温高压的碰撞系统如何在平均场作用下膨胀和碎开, 以及它的动力学发展中的压缩和温度的效应.

近些年来, 已经有不少模型来揭示碎裂过程, 象液气相变<sup>[1]</sup>、统计过程<sup>[2]</sup>、并合过程<sup>[3]</sup>以及动力学过程等<sup>[4,5]</sup>. 我们知道中高能下的核-核碰撞在它的初期阶段就可形成一个高激发的、高压缩的核系统. 从 BUU 的计算可以看出<sup>[6]</sup>, 在中高能情况下两核碰撞仅仅在  $10\text{fm}/c$  的时间内就可迅速被压缩, 极大密度可达到  $2-4\rho_0$ ,  $\rho_0$  是基态的正常密度. 从压缩相很短暂这一点出发, 为研究膨胀相的动力学发展, 我们近似假定在  $t=0$  时, 碰撞系统相应于一个高温高密度的系统, 为膨胀相的开始时刻. J. Knoll<sup>[4]</sup> 基于这种考虑, 完成了二维 TDHF 计算, 讨论了膨胀过程, 在动力学模型中称为量子的一体图象.

在我们的研究中, 采用了三维的 Vlasov 模型, 每个单粒子按照 Vlasov 方程在适当的平均场中传播, 以便来讨论核物质的压缩效应和热激发效应对碎裂的贡献.

## 二、模 型

做为一个简单的动力学模拟, 我们仅仅采用了忽略了碰撞项, 只有平均场效应的 Vlasov 方程:

\* 国家自然科学基金资助. 本文 1989 年 3 月 6 日收到.

$$\frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) - \nabla_{\mathbf{r}} U(\rho) \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = 0, \quad (1)$$

$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$  是单粒子的分布函数,  $U(\rho)$  是密度依赖的平均场, 其组态空间密度为:

$$\rho(\mathbf{r}) = \int f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p}. \quad (2)$$

方程(1)仅仅是局域近似的结果, 即两体相互作用采用下面形式:

$$V(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_2, t_2) = V_0 \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \delta(t_1 - t_2), \quad (3)$$

方程(1)中第三项假设了平均场动量无关后取零级近似. 其详细推导见文献[7].

为方便讨论, 模型做出了下面的假设:

1) 正如引言中所指出的,  $t = 0$  为膨胀相的起点, 系统具有高温和高密度.

2) 初始组态的单粒子的分布  $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t = 0)$  假设为高斯分布, 在坐标空间, 它具有假设的极大压缩密度

$$\rho(\mathbf{r}, t = 0) = \left( \frac{\alpha}{\sqrt{\pi}} \right)^3 \sum_i e^{-\alpha(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}, \quad (4)$$

而在动量空间, 由具有参数温度  $T$  的 Maxwell 分布来表征. 温度参数  $T$  描述了初始组态的动量分布, 不能认为是核系统的温度.

方程(4)中的  $\alpha$  不同, 反映了不同的极大密度, 实际计算可得出:  $\alpha = 0.8$  时,  $\rho_{\max} = 4.4\rho_0$  而  $\alpha = 0.9$  时,  $\rho_{\max} = 7.5\rho_0$  等.

为求解方程(1), 采用了试验粒子和网格化的方法<sup>[8]</sup>, 试验粒子数  $\tilde{N} = 100$ /每个核子. 试验粒子  $A \times 100$  ( $A$  为系统核子数) 按照初始分布  $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t = 0)$ , 随机地依坐标和动量来确定, 蒙特卡罗抽样<sup>[9]</sup>完成初始化. 试验粒子随时间的发展由牛顿方程来表征, 它等效于求解 Vlasov 方程<sup>[6]</sup>. 因此, 动量和坐标的时间发展就由简单的一级微分方程来表示, 在  $\Delta t$  内, 第  $i$  个试验粒子的运动服从

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \frac{\mathbf{p}_i}{\sqrt{m_i^2 + \mathbf{p}_i^2}}, \quad (5)$$

$$\frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = -\nabla_{\mathbf{r}} U(\rho(\mathbf{r})) \quad (6)$$

方程. 平均场  $U$  采用参数化硬势<sup>[8]</sup>

$$U(\rho) = -124\rho + 70.5\rho^2 \text{ (MeV)} \quad (7)$$

由方程(2), 其密度由下式决定

$$\rho(\mathbf{r}) = \frac{N}{\tilde{N}\Delta V}, \quad (8)$$

$\Delta V$  为所取网格的体积,  $N$  为  $\Delta V$  体积中的试验粒子数. 方程(7)给出了无穷大核物质基态密度为  $\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$ 、结合能  $E/A = -16 \text{ MeV}$ 、压缩系数  $K = 375 \text{ MeV}$  和  $\rho_0$  处的极大位势为  $\sim 50 \text{ MeV}$ , 软势和其它形式的势<sup>[10]</sup>还未试验, 因为对简单的模拟, 势场的效应并不明显.

### 三、计算结果和讨论

做为一个例子,我们考虑了由  $A = 40$  个粒子组成的系统. 计算时,取时间步长为  $0.5 \text{ fm}/c$  和  $60 \times 60 \times 60 \text{ fm}^3$  的网格,  $\Delta V = 1 \text{ fm}^3$ . 计算分别在初始极大密度  $\rho_{\max} = 4\rho_0, 4.4\rho_0, 5.7\rho_0, 7.5\rho_0$  和几个不同的动量分布温度参数  $T = 7 \text{ MeV}, 15 \text{ MeV}, 25 \text{ MeV}$  和  $50 \text{ MeV}$  完成,并且只考虑了对心碰撞情况. 假设  $x-z$  平面为反应平面,图 1(见图版 I)和图 2(见图版 II)给出了对所有  $y$  方向积分后,  $x-z$  反应平面内系统的密度分布随时间发展. 图 1 比较了在固定  $T = 15 \text{ MeV}$  时,三个不同的初始极大密度的不同时间发展. 图 2 比较了在固定初始极大密度  $\rho_{\max} = 4.4\rho_0$  时,三个不同温度参数的不同时间发展.  $t = 0$  时的分布都是典型的高斯分布,没有在图中画出.

我们看到,当系统的密度分布按 Vlasov 图象传播时,有一个很清楚的发展图形. 随着时间的发展看到碎裂的发生和发展,单峰的高斯分布逐渐被很多峰所代替,极大密度将迅速地下降并低于正常密度  $\rho_0$ . 计算发现,碎裂开始时的极大密度都发生在大约  $(0.2-0.5)\rho_0$  处. 这里,我们讨论压缩相发生之后的情况,在固定动量分布时(图 1)如果压缩相初始的极大密度  $\rho_{\max} = 5.7\rho_0$ ,碎裂起始时间大约在  $12.5-25 \text{ fm}/c$  之间,如果  $\rho_{\max} = 4.4\rho_0$  碎裂起始时间大约在  $25-37.5 \text{ fm}/c$  之间,而  $\rho_{\max} = 4\rho_0$  时,这个起始时间要到  $37.5 \text{ fm}/c$ . 在固定空间分布(图 2),随着动量分布参数  $T$  的增加,初始分布在  $T$  大时明显变宽,高温时的大的弥散,使之在  $T = 7 \text{ MeV}$  时,仅有几个孤立的峰,而在  $T = 50 \text{ MeV}$  时,整个  $60 \text{ fm} \times 60 \text{ fm}$   $X-Z$  平面中有很多峰出现,以致于当时间发展至  $75 \text{ fm}/c$  时,每个碎片的密度的极大值都很接近. 计算还发现,随着  $T$  增加,膨胀过程会发生更加迅速(图 3),如果系统发展到同一时刻(例如  $12.5 \text{ fm}/c$ ),  $T = 50 \text{ MeV}$  极大密度下降远比  $T =$

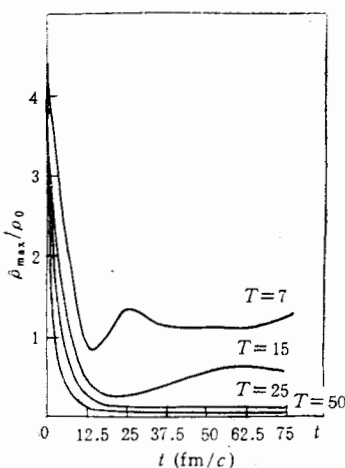


图 3 在不同温度系数时,系统迅速膨胀的比较(看正文)

$7 \text{ MeV}$  要快得多,而且都会有振荡发生,  $T$  小时发生的时间要早一些. 同样,对于不同压缩情况(相同  $T$ ),也观察到密度随时间发展的振荡<sup>[1]</sup>,总的说来振幅并不很大,直观地看,这是涨落的结果. 计算发现,温度  $T$  的变化并不对碎裂开始时的密度范围和时间有十分明显的影响.

我们知道一个高密度的热核按 Vlasov 动力学发展,其中心密度很快下降,应关联于径向膨胀和核子间的库仑相互作用. 在目前的研究中我们未考虑库仑相互作用. 膨胀碎裂仅仅是动力学过程中的平均场涨落所引起,并不意味着核子集团化和气泡的形成. 可以预料,这种简单的模拟,当碰撞时间达到无穷大时,几乎会变成单个的试验粒子或试验粒子团. 当然,时间无穷发展不符合物理事实, S. Dasgupta 计算了一个真实的碰撞系统<sup>[2]</sup>,用核内级联方法模拟了压缩相后,然后系统按 Vlasov 方法发展,计

算了碎裂过程中的质量分布, 并同实验做了比较. 因为相互作用时间的定义有一定的不确定性, 碎片分布也会存在不确定的因素.

值得提到的一点是初始单粒子分布采用了高斯分布的形式, 似乎有点偏离物理事实, 采用伍兹-萨克森分布代替高斯分布的研究正在进行中.

#### 四、小 结

在 Vlasov 动力学框架下, 三维动量和坐标空间的计算揭露了碰撞系统不稳定性随时间发展, 它类似于二维的 TDHF 动力学的计算. 计算结果表明: 系统碎裂发展紧密地连系于不可压缩的极大密度, 也联系于描述动量分布和弥散程度的温度参数. 系统压缩的极大密度愈高, 系统碎裂开始就愈迅速, 系统温度参数愈高, 膨胀就愈迅速. 计算结果似乎表明, 为达到碎裂, 压缩效应比热激发效应显得更有效.

#### 参 考 文 献

- [1] 葛凌霄、刘建业、王顺金, 高能物理与核物理, **13**(1989), 245.
- [2] J. Aichelin and G. F. Bertsch, *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 1730.
- [3] C. Gregoire et al., *Nucl. Phys.*, **A465**(1987), 317.
- [4] B. Serack and J. Knoll, *Z. Physik*, **A315**(1984), 249.
- [5] 葛凌霄、卓益忠, “非相对论 BUU 方程”, 高能物理与核物理, **14**(1989), 642.
- [6] J. Cugon et al., *Nucl. Phys.*, **A352**(1981), 505.
- [7] G. F. Bertsch et al., *Phys. Rev.*, **C29**(1984), 673.
- [8] 葛凌霄, “中能重离子反应”, 核技术, 待发表.
- [9] L. X. Ge, X. H. Zeng, J. Y. Liu and B. S. Zeng, Proceedings of the International Summer School on Heavy Ion Reaction Theory. Lanzhou, China, 1988, edited by W. Q. Shen, J. Y. Liu and L. X. Ge (World Scientific, Singapore, 1989), p. 283.
- [10] G. F. Bertsch et al., *Phys. Rep.*, **160**(1988), 189.
- [11] H. Tang et al., *Phys. Lett.*, **101B**(1981), 10.

## THE EFFECT OF COMPRESSION AND THERMAL EXCITATION FOR FRAGMENTATION DYNAMICS PROCESS OF HIC

GE LINGXIAO ZENG XIANGHUA LIU JIANYE

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ZENG BAOSHENG

(Department of Modern Physics, Lanzhou University)

#### ABSTRACT

The expansion dynamical process of a hot nuclear system for energetic heavy ion collision has been calculated and discussed in the frame of the Vlasov equation. It shows that the compression effects are more effective than the thermal excitation for the fragmentation process.