

# 费米能区重离子碰撞动力学\*

## (Ⅲ) 碎裂与极限激发能

左维

(兰州大学现代物理系, 730001)

葛凌霄 张丰收

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

### 摘 要

在 Boltzmann-Uehling-Uhlenback 理论框架内, 研究了 $^{20}\text{Ne}+^{20}\text{Ne}$  碰撞系统在入射能量从 10MeV/u 到 100MeV/u 变化时, 碎裂发生的机制, 并讨论了极限激发能以及反应过程中热平衡与非热平衡问题。

### 一、引 言

中能区 ( $E_{\text{lab}}=10-100\text{MeV/u}$ ) 重离子碰撞中碎裂过程的研究是一个十分重要的课题<sup>[1-6]</sup>, 一方面对重离子碰撞研究本身有很重要的意义, 有助于加深对重离子碰撞中动力学过程的认识和理解; 另一方面反应过程中能够形成高激发 ( $\epsilon^*=3-6\text{MeV/u}$ ) 的复合系统, 为研究热核问题 (如高温核状态方程, 热核衰变等) 提供了条件. 中能区重离子碰撞是平均场、两体碰撞和泡利阻塞效应共同起作用的区域<sup>[2]</sup>, 存在这三种效应相互竞争的过程, 并且在反应过程中, 热平衡与非热平衡过程相互竞争, 这使得该能区的重离子碰撞显示出与低能区和高能区不同的新特点, 其中最重要的特点之一是随入射能量升高, 中心碰撞反应机制由全融合到非全融合进而向碎裂跃迁的过程.

实验上发现, 在中能区, 对于中心碰撞, 当入射能量增大到某一阈值时, 融合反应截面 ( $\sigma_F=\sigma_{\text{ER}}+\sigma_{\text{fs}}$ ) 将消失, 此时, 复合系统激发能  $\epsilon^*$  达到极限值 (3-6MeV/u, 视反应系统而不同). 当入射能量超过这一阈值时, 激发能不再增大, 复合系统变得不稳定, 许多实验结果都在一定程度上表明, 此时将发生碎裂反应. 近年来, 人们从理论上用各种模型对碎裂及极限激发能问题进行了大量的研究工作<sup>[1-7]</sup>, 但仍有许多问题有待进一步深入地研究, 例如碎裂的机制问题, 即碎裂究竟是一个瞬时的动力学过程, 还是通常的蒸发过程? 若是前者, 它就反映了一种新的反应机制, 那么碎裂究竟为什么会发生呢? 碎裂反应中究竟能否达到热平衡呢? 如何标识碎裂的发生及激发能极限的理论预言和解释

\* 国家自然科学基金和中科院科学基金资助.

等等. 这些问题, 尤其是碎裂机制和极限激发能问题, 是当前中能区重离子碰撞研究的热点. 本文在BUU的理论框架下, 对上述问题作了一些定性的探讨和研究, 并得到了一些有益的结论, 这对更进一步细致和系统的研究有很重要的指南作用.

## 二、模型

BUU方程是描述相空间分布函数  $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$  随时间演化的动能方程<sup>[2]</sup>, 即

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f - \nabla_{\mathbf{r}} U(\mathbf{r}) \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f = I_{\text{coll}}[f], \quad (1)$$

其中  $U(\mathbf{r})$  为密度相关的参数平均场

$$U(\mathbf{r}) = A\rho + B\rho^\lambda, \quad (2)$$

本文计算中, 采用硬势参数化 ( $A = -124 \text{ MeV}$ ,  $B = 70.5 \text{ MeV}$ ,  $\lambda = 2$ , 压缩系数  $K = 380 \text{ MeV}$ ).  $I_{\text{coll}}$  是碰撞项, 即

$$I_{\text{coll}}[f] = - \int \frac{d^3 p_2 d^3 p'_1 d^3 p'_2}{(2\pi)^9} \sigma v_{12} [ff_2(1-f'_1)(1-f'_2) - f'_1 f'_2(1-f)(1-f_2)] \\ \times (2\pi)^3 \delta^{(3)}(\mathbf{p} + \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}'_1 - \mathbf{p}'_2), \quad (3)$$

其中  $\sigma$  是核子-核子碰撞截面<sup>[8]</sup>,  $v_{12}$  是碰撞核的相对速度. 方程(1)的求解采用了试验粒子和网格化方法, 稳定性问题已经检验<sup>[8]</sup>.

为了计算激发能, 应用文献[1]中的方法, 总能量  $E_{\text{tot}}$  可分为两部分

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{int}} + E_{\text{coll}}, \quad (4)$$

其中  $E_{\text{coll}}$  是集体能, 利用集体流矢量计算

$$E_{\text{coll}} = \frac{1}{2} m \int \frac{j^2}{\rho} d^3 r, \quad (5)$$

$$j = \int \frac{\mathbf{p}}{m} f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d^3 p. \quad (6)$$

而内能  $E_{\text{int}}$  又可分为两部分

$$E_{\text{int}} = E_{\text{int}}^0 + E^*, \quad (7)$$

其中  $E^*$  为激发能,  $E_{\text{int}}^0$  为冷能量, 定义为

$$E_{\text{int}}^0 = E_{\text{int}}(\rho, T = 0), \quad (8)$$

用方程(1)中的平均场参数计算<sup>[1,2]</sup>

$$E_{\text{int}}^0 = \int \rho E_{\text{int}}^0 d\mathbf{r} \quad (9)$$

$$\rho E_{\text{int}}^0 = \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3\pi^2}{2}\right)^{2/3} \rho^{5/3} + \frac{A}{2} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \rho + \frac{B}{1+\lambda} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\lambda \rho, \quad (10)$$

另外, 本文还计算了动量四极矩, 其定义为

$$\hat{Q}_{xx} = 2p_x^2 - p_y^2 - p_z^2, \quad (11)$$

$$\langle \hat{Q}_{xx} \rangle = \int \hat{Q}_{xx} f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d^3 r d^3 p. \quad (12)$$

它是复合系统能否完全热化的判据之一.

### 三、计算结果

采用包含了平均场、两体碰撞和泡利阻塞效应的BUU方程,分别计算了当入射能量为10、20、30、40、50、60、70、80、100MeV/u时,在 $^{20}\text{Ne}+^{20}\text{Ne}$ 系统中心碰撞的动

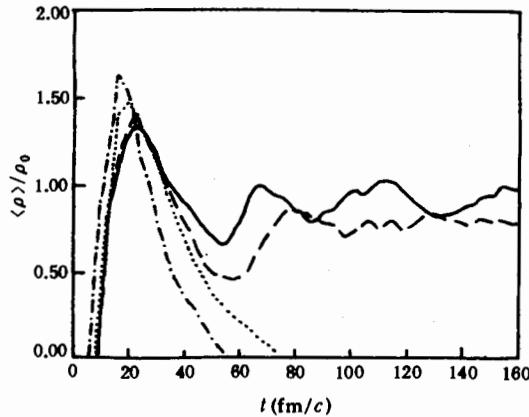


图1  $^{20}\text{Ne}+^{20}\text{Ne}$  碰撞系统在入射能量为30、50、60、100MeV/u时重叠区平均密度随时间的发展

— 30MeV/u    - - 50MeV/u  
 ..... 60MeV/u    - · - · 100MeV/u

力学过程中,重叠区平均密度、复合系统的集体能、内能、激发能、动量四极矩、单位时间内碰撞数随时间的演化. 计算结果表明,这些量对研究碎裂过程的总体特征是很重要的.

图1给出了在不同入射能量下,重叠区平均密度随时间的演化. 从计算结果能够看出,碰撞初期,两核迅速压缩,形成复合系统,然后开始膨胀,且入射能量越大,压缩越大,膨胀越快. 当入射能量  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} \leq 50 \text{ MeV/u}$  时,整个碰撞过程中都发生密度重叠,重叠区平均密度围绕一平均值 (当  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} = 30 \text{ MeV/u}$  时约为

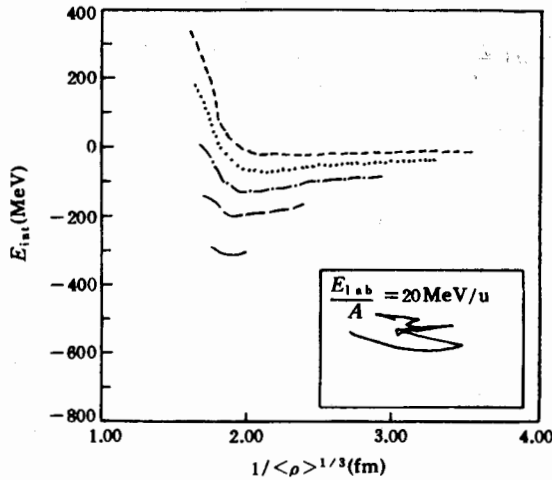


图2 在入射能量为20、40、60、80、100MeV/u时,系统的动力学状态方程

— 20MeV/u    - - 40MeV/u  
 - · - · 60MeV/u    ..... 80MeV/u    - - - 100MeV/u

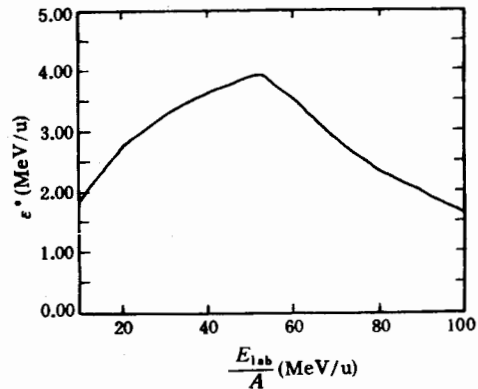


图3 激发能随入射能量变化关系

0.9 $\rho_0$ , 而当  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} = 50 \text{ MeV/u}$  时约为 0.75 $\rho_0$ ) 振荡,这是非完全融合(ICF)的典型特征.

而当  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} \geq 60 \text{ MeV/u}$  时, 碰撞系统达到最大压缩后, 迅速膨胀, 重叠区密度降为零, 这反映了在入射能量为  $50-60 \text{ MeV/u}$  之间, 反应机制有一变迁, 由非完全融合占优势转变为碎裂开始占优势, 而且随入射能量  $E_{\text{lab}}$  增大, 碎裂过程发生得越迅速. 同时, 还计算了复合系统的动力学状态方程 (即复合系统的内能  $E_{\text{int}}(\rho, T)$  随  $\frac{1}{\langle \rho \rangle^{1/3}}$  的演化, 图 2), 与图 1 中结论一致, 当入射能量较低时 ( $20 \text{ MeV/u}$ ), 复合系统在一平衡密度附近 ( $\rho_0$ ) 小振幅集体振荡 (如图 2 中的小图所示), 而随入射能量增大 ( $40 \text{ MeV/u}$ ), 振荡范围越来越大, 当  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} \geq 60 \text{ MeV/u}$  后, 由于集体动能, 势阱已不再能束缚住复合系统, 从而系统变得不稳定, 将发生碎裂. 在  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} = 100 \text{ MeV/u}$  时, 这一特点显示得更加清楚.

为了估算极限激发能, 图 3 画出了激发能  $\epsilon^*$  随入射能量  $E_{\text{lab}}$  变化的曲线, 图中在  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} \lesssim 52 \text{ MeV/u}$  时,  $\epsilon^*$  随  $E_{\text{lab}}$  增大而增大而增加, 而当入射能量  $\frac{E_{\text{lab}}}{A}$  增大到一定值后 ( $\sim 52 \text{ MeV/u}$ ),  $\epsilon^*$  开始随入射能量增大而下降, 从图中估计的入射能阈约为  $52 \text{ MeV/u}$ , 极限激发能约为  $3.9 \text{ MeV/u}$ . 当  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} \geq 52 \text{ MeV/u}$  后,  $\epsilon^*$  随  $E_{\text{lab}}$  增大而下降, 这似乎表明, 在碎裂过程中, 有大量入射能量可能在膨胀过程中变为碎片及独立核子的集体能而发射出

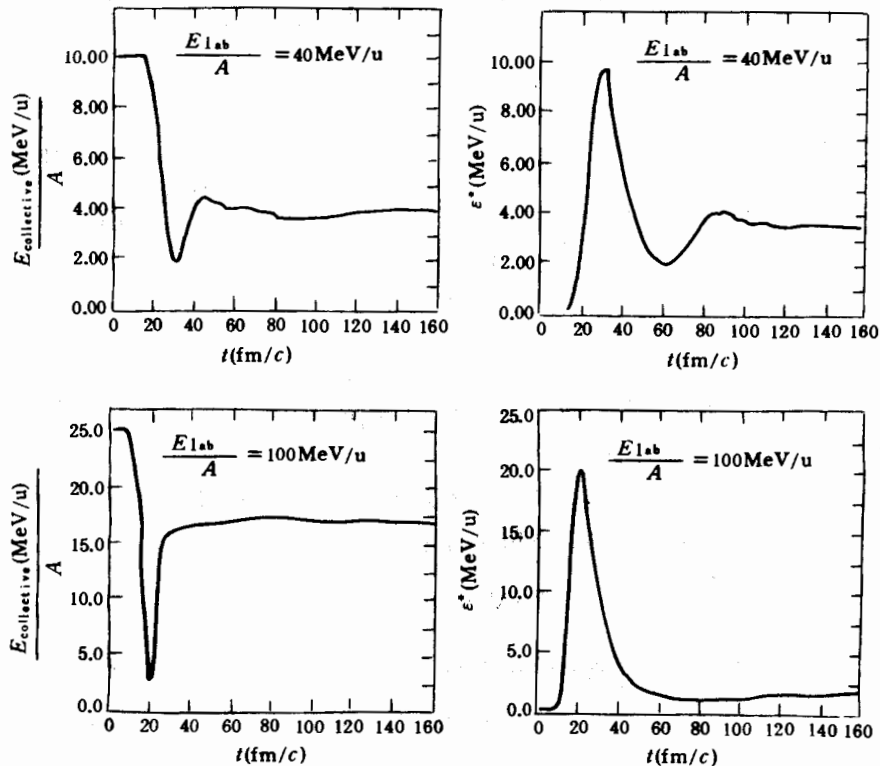


图 4  $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$  碰撞系统在入射能量为  $40 \text{ MeV/u}$ 、 $100 \text{ MeV/u}$  时, 集体动能 (图中第一列) 和激发能 (图中第二列) 随时间的发展

去. 为了更清楚地显示这一点, 图4给出了  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} = 40\text{MeV/u}, 100\text{MeV/u}$  两种情况下, 集体动能  $\frac{E_{\text{collective}}}{A}$  (图4中第一列) 和激发能  $\epsilon^*$  (图4中第二列) 随时间的发展. 从图中看到, 当  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} = 40\text{MeV/u}$  时, 膨胀过程中, 仅有约40%的入射能量被变为集体动能; 而当  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} = 100\text{MeV/u}$  时, 几乎70%的入射能量最终变为碎片及独立核子的集体动能.

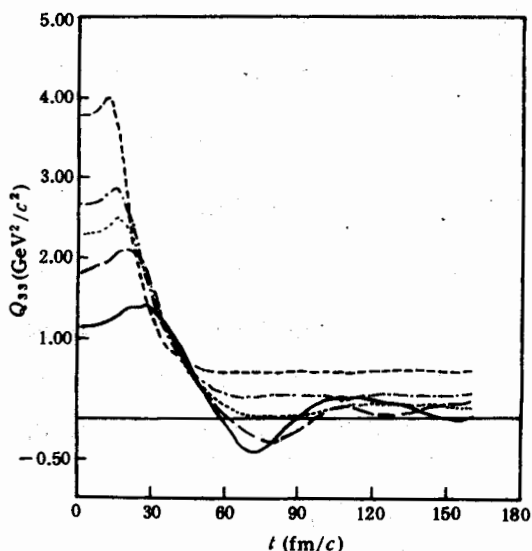


图5  $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$  碰撞系统在入射能量为 30、50、60、70、100 MeV/u 时, 动量四极矩随时间的发展

—30 MeV/u    --50 MeV/u  
 .....60 MeV/u    - · - · 70 MeV/u  
 ---100 MeV/u

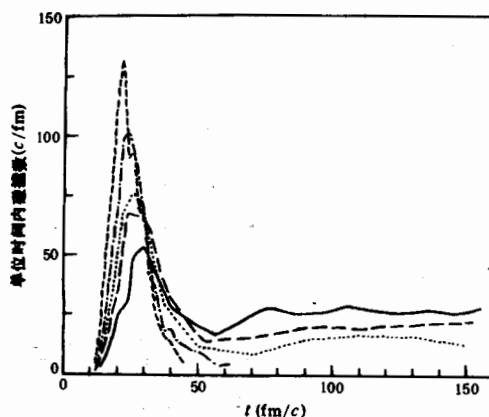


图6 在入射量为 30、50、60、80、100 MeV/u 时, 单位时间内碰撞数随时间的发展

—30 MeV/u    --50 MeV/u  
 .....60 MeV/u    - · - · 80 MeV/u  
 ---100 MeV/u

为了讨论在碎裂反应过程中, 复合系统能否完全达到热平衡这一问题, 我们计算了热平衡的两个判据. 图5是在不同入射能量下, 动量四极矩  $\langle Q_{33} \rangle$  随时间的演化, 随入射能量增大,  $\langle Q_{33} \rangle$  下降越陡, 表明压缩后的热化过程越快 (热化主要由两体碰撞引起), 热化过程所需时间越短. 这体现了随入射能量升高, 两体碰撞越来越重要. 在较低能量下,  $\langle Q_{33} \rangle$  下降到零, 这是完全热化的标志, 而后在零附近振荡, 体现了热化后的集体振荡效应. 而当  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} \geq 60-70\text{MeV/u}$  后, 压缩后的复合系统已不能完全达到热平衡 ( $\langle Q_{33} \rangle$  不能下降到零), 可能表明在达到完全热化前已开始碎裂. 当  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} \approx 60\text{MeV/u}$  时, 显示了碎裂过程中热平衡与非热平衡的竞争. 碰撞过程中, 单位时间内平均碰撞数随时间的变化关系 (图6) 表现出与图5一致的趋势, 入射能量越高, 单位时间内碰撞数所能达到的最大值越大, 下降得也越陡. 在较低能区 (30—60 MeV/u), 单位时间内碰撞数下降到某一固定值附近涨落, 标志热平衡的出现, 而当  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} > 60\text{MeV/u}$  后, 很快下降

到零, 这是没有完全热化的迹象. 在入射能量  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} \approx 60 \text{ MeV/u}$  附近, 明显存在碎裂过程中统计因素与动力学机制间的相互竞争.

#### 四、讨论

综合上面计算结果及分析, 可以得出, 在BUU框架内, 对于 $^{20}\text{Ne}+^{20}\text{Ne}$ 系统的中心碰撞:

(1) 随入射能量升高, 存在一激发能极限, 当 $\epsilon^*$ 达到这一极限后, 系统反应机制将发生从非全融合占优势到碎裂占优势的变迁. 对于 $^{20}\text{Ne}+^{20}\text{Ne}$ 系统, 本文估算当入射能量  $\frac{E_{\text{lab}}}{A} \sim 52 \text{ MeV/u}$  时, 达到极限激发能  $\epsilon^* \sim 3.9 \text{ MeV/u}$ .

(2) 在由非全融合向碎裂过渡时, 存在着统计因素与动力学机制间的竞争, 随入射能量增大, 碎裂的动力学机制越来越占优势. 碎裂过程发生很快, 在短时间内发生, 且入射能量越高, 碎裂过程越快, 这也表明碎裂是一个动力学因素逐渐占优势的过程.

(3) 碎裂发生时, 整个复合系统在整个反应过程中已逐渐不能达到完全热化.

本文定性地研究和讨论了碎裂动力学的各种迹象和趋势, 并粗略计算了极限激发能. 这为进一步更为精确和系统地研究碎裂提供了条件. 进一步精确的研究需要一个微观的, 能在同一基础上同时描述反应三阶段(压缩、膨胀和碎裂), 并真实描述多体关联的动力学方法. 这方面的工作正在进行中.

#### 参 考 文 献

- [1] E. Suraud, D. Cussol, Ch. Gregoire, D. Boilley, M. Pi, P. Schuck, *Nucl. Phys.*, **A495** (1989), 73c.
- [2] G. F. Bertsch, S. das Gupta, *Phys. Rep.*, **160c** (1988), 189.
- [3] S. Leray, C. Ngo, M. E. Spina, B. Remaud, F. Seville, *Nucl. Phys.*, **A495** (1989), 283.
- [4] Li Zhuxia, C. Hartnack, H. Stocker, W. Greiner, *Phys. Rev.*, **C44** (1991), 824.
- [5] J. Randrup, *Nucl. Phys.*, **A495** (1989), 245c.
- [6] J. Desbois, R. Boisgard, C. Ngo, J. Nemeth, *Z. Phys.*, **A328** (1987), 101; C. Ngo, R. Boisgard, C. Cerruti, S. Leray, M. E. Spina, J. Desbois, H. Ngo, J. Nemeth, *Nucl. Phys.*, **A495** (1989), 267.
- [7] K. Krishan, S. Bhattacharya, J. N. De, S. K. Samaddar, *Nucl. Phys.*, **A495** (1989), 65c.
- [8] 张丰收, 葛凌霄, 高能物理与核物理, **14**(1990), 1045; Ge Lingxiao, Zeng Xianghua, Liu Jianye, Zeng Baosheng, *Proceeding of the International Summer School on Heavy Ion Reaction Theory, Lanzhou, China, 1988*, edited by Shen Wenqing, Liu Jianye and Ge Lingxiao, (World Scientific, Singapore, 1989), p. 283.

**Heavy Ion Collision Dynamics in Fermi Domain**  
**(Ⅲ) Multifragmentation and Limiting Exciting Energy**

ZUO WEI

*(Lanzhou university 730001)*

GE LINGXIAO ZHANG FENGSHOU

*(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)*

ABSTRACT

In the case of central collisions, the mechanism of fragmentation is studied within the framework of Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck theory from 10MeV/u to 100MeV/u for  $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$  collision system. The exciting energy and the problem about whether completed thermalization be attained have also been discussed.