

# 重离子碰撞中的多重碎裂研究\*

张 劭 光    刘 建 业

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1993 年 9 月 6 日收到

## 摘 要

把量子分子动力学模型(QMD)与重构模型耦合,我们称之为改进的QMD(IQMD),研究了重构与非重构情形的差异.用改进了的QMD模型研究了状态方程、动量相关势和介质效应对多重碎裂动力学过程的影响,以及这种影响随入射能量的依赖关系.

**关键词** 多重碎裂,状态方程,动量相关相互作用,介质效应.

## 1 引 言

在中高能重离子碰撞中,中等质量碎片的形成(多重碎裂)在理论上和实验上都引起了人们很大的兴趣.在BUU模型的理论计算中,很多次模拟(一般一百次)必须同时进行,以消除掉平均场巨大的涨落,这种系综平均的方法亦消除了单次模拟中对多重碎裂至关重要的涨落和关联.因此近年来一方面发展了数种改进的BUU模型,另一方面则发展了QMD模型.在QMD模型中,模拟是建立在单次事件基础上的,因而保留了涨落和关联;另一方面,用高斯波包表示单个粒子,以取代BUU中的实验粒子加网格化的光滑化方法.我们已经知道QMD能很好地描述多重碎裂前系统的动力学过程,但在描述碎块形成过程中,会出现一些非物理的线状核,为此我们把QMD与重构模型(RAM)耦合,以消除非物理的线状碎片.用这种改进的QMD模型,研究了状态方程、动量相关势、介质效应对多重碎裂的影响.

## 2 模 型

### 2.1 量子分子动力学模型

在量子分子动力学中,用高斯波包表示单个核子的波函数,通过维格纳变换,可得到单核子分布函数为:

\* 国家自然科学基金委,国家基础项目和中国科学院自然科学基金支持.

$$f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}) = \frac{1}{(\pi\hbar)^3} \exp\{-[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)]^2/2L - [\mathbf{p} - \mathbf{p}_i(t)] \cdot 2L/\hbar^2\}. \quad (1)$$

系统总的分布函数为单核子分布函数的和:

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}) = \sum_i f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}). \quad (2)$$

在相空间中对动量积分, 得到坐标空间中的密度函数:

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \int f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p}^3. \quad (3)$$

系统 Skyrme 形式的相互作用量为:

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m} + V^{\text{loc}} + V^{\text{Yuk}} + V^{\text{Coul}}, \quad (4)$$

其中  $V^{\text{loc}}$  为同时包含两体和三体相互作用的局域相互作用:

$$V^{\text{loc}} = t_1\delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) + t_2\delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)\delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_3), \quad (5)$$

$V^{\text{Yuk}}$  为长程汤川势,  $V^{\text{Coul}}$  为库仑势. 对局域相互作用在相空间中积分, 可得如下形式的平均场:

$$U^{\text{loc}} = \alpha\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) + \beta\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\gamma. \quad (6)$$

式中参数值  $\alpha, \beta, \gamma$  列于表 1 中:

表 1

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	K	EOS
-124MeV	70.5MeV	2	380MeV	H
-356MeV	303MeV	7/6	200MeV	S

如在以上形式的平均场中附加如下动量相关的势:

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2[t_5(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2), \quad (7)$$

式中  $t_4 = 1.57\text{MeV}$ ,  $t_5 = 5 \times 10^{-4}\text{MeV}^{-2}$ , 为了得到基态性质, 必须重新调整表 1 中的参数(见表 2).

表 2

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	K	EOS
-129.2MeV	59.4MeV	2.09	380MeV	HM
-390.1MeV	320.3MeV	1.14	200MeV	SM

在以上的相互作用下, 通过 Hamilton 方程, 用定步长方法得到波包中心的坐标和动量如下:

$$r_i = \nabla_{p_i} \rightarrow r_i(n+1) = r_i(n) + p_i(n+1/2)/m\Delta t, \quad (8)$$

$$p_i = -\nabla_{r_i} \rightarrow p_i(n+1) = p_i(n-1/2) - \nabla_{r_i} U_i(n)\Delta t. \quad (9)$$

其中  $U_i(n)$  表示第  $n$  个步长时第  $i$  个核子处的平均场。

## 2.2 能量相关的核子-核子碰撞截面

尽管现在对介质中核子-核子碰撞截面与自由核子-核子碰撞截面的相对大小及其随入射能变化的知识还有争论,有待结合实验数据继续进行研究,但仍可根据从核物质理论中得到的介质中核子-核子碰撞与自由核子碰撞截面随入射能量的相对变化关系,来研究介质效应对中能重离子碰撞中多重碎裂的影响。

计算中,自由核子-核子碰撞截面采用文献[1,4]中参数化公式,其弹性截面随入射能量的增加而减小,非弹性截面随入射能量的增加而增加。

介质中非弹性截面采用如下参数化公式<sup>[6]</sup>:

$$\sigma_{nn \rightarrow n\Delta}^{\text{eff}} = \sigma_{nn \rightarrow n\Delta}^{\text{free}} \left[ 1 - 0.07 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) + 0.24 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^2 \right], \quad (10)$$

其中  $\sigma_{nn \rightarrow n\Delta}^{\text{eff}}$ 、 $\sigma_{nn \rightarrow n\Delta}^{\text{free}}$  分别为有介质和无介质情况下的核子-核子非弹性截面,它是密度相关的,从而也是能量相关的。

对介质中核子-核子非弹性截面,我们采用了 Ter Haar 和 Malfliet<sup>[5]</sup> 的计算结果。

核子-核子总截面在  $\frac{E_1}{A} = 200$  和  $400\text{MeV}$  时有以下关系:

$$\sigma_{nn \rightarrow n\Delta}^{\text{eff}} + \sigma_{nn \rightarrow nn}^{\text{eff}} < \sigma_{nn \rightarrow n\Delta}^{\text{free}} + \sigma_{nn \rightarrow nn}^{\text{free}}. \quad (11)$$

随着能量的增加,二者差别逐渐变小,到  $\frac{E_1}{A} = 800\text{MeV}$  时,二者近乎相等,以后非弹

性截面越来越重要,入射能量超过某个值 ( $\sim 800\text{MeV}$ ) 后,使介质中总截面超过自由核子-核子碰撞截面。

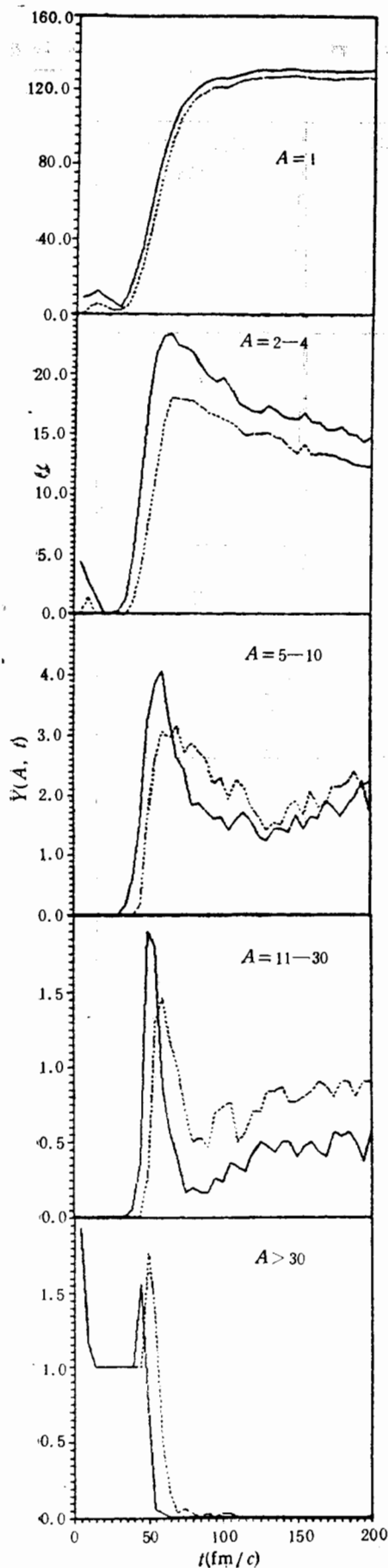
## 2.3 重构机制

在计算中,我们把 QMD 与重构模型(RAM)耦合,关于重构模型的详细情况参看文献[2],这里简单介绍它的主要思想。重构的过程是这样的:当核子之间距离小于核力力程(取  $r_0 = 2.06$ ) 时,则认为在一个碎块内,当碎块形成后,把碎块等价于圆心在碎块质心,半径  $R = 1.15A^{1/3}$  的球形核 ( $A$  为碎块质量数),看等价的球形核碎块之间是否重叠,若重叠,则作为一个碎块,化为球形核,再判断碎块之间是否重叠,这样的过程一直进行下去,直到碎块数不再发生变化为止。该模型目的在于去掉原 QMD 模型所产生的非物理的线状核。

# 3 计算结果与讨论

## 3.1 碎块多重性的时间谱

为了检验碎块多重性分布随时间的变化何时趋于稳定,以及对于 QMD 和 IQMD



两种构成碎块方式所得结果随时间的变化和差别,我们计算了反应系统  $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$ ,  $\frac{E_1}{A} = 200$  MeV, 碰撞参数  $b = 3.0\text{fm}$  在软势情况下碎块多重性随时间的变化情况示于图 1. 碎块质量分为五个间隔,  $A = 1$ ,  $A = 2-4$ ,  $A = 5-10$ ,  $A = 11-30$  和  $A > 30$ . 从图 1 中可以看出, 由于碎片不断地发射单粒子而使单粒子 ( $A = 1$ ) 的数目开始一段时间较快地增加, 随后逐渐趋于饱和. 除  $A > 30$  的碎片没有稳定, 随后很快衰变外, 其余四个质量间隔的碎片多重性大都在  $130-150\text{fm}/c$  附近趋于稳定和饱和, 这意味着  $150\text{fm}/c$  之后碎片的形成已完成, 此后仅有少数核子蒸发, 并主要通过发射  $\gamma$  射线而退激.

对于两种碎片构成方式 QMD 和 IQMD 而言, 各质量间隔的碎片多重性随时间的分布形状大致相似, 但其绝对值有差异. 如对于  $A \leq 4$  的碎片, IQMD 的值大于 QMD 的值, 而对  $A \geq 5$  的各质量间隔, 其 IQMD 的值小于 QMD 的值. 这种差别主要是由于 QMD 构成方式所产生的非物理线状核造成的.

### 3.2 介质中核子-核子碰撞截面对多重碎裂的影响

我们计算了  $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$  在  $\frac{E_1}{A} = 200, 400$  和  $800\text{MeV}$ , 碰撞参数  $b = 3.0\text{fm}$  情况下的碰撞动力学和多重碎裂过程, 其碎片多重性分布  $Y(A)$  表示在图 2 中. 计算结果表明, 对于入射能量  $\frac{E_1}{A} = 200$  和  $400\text{MeV}$  时, 由于介质中核子-核子碰撞截面相对于自由核子-核子碰撞截面减小, 从而导致碰撞数、核物质阻止和碰撞系统激发能的减少, 结果相对于自由核子-核子碰撞过程而言, 介质效应产生了较少的碎裂, 即有较多的重碎片存留下来. 如图 2a 和 2b 所示.

随着能量的增加, 弹性核子-核子截面减少而非弹性截面增加, 同时原子核阻止、碰撞系统

图 1 显示了反应  $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$ ,  $\frac{E_1}{A} = 200\text{MeV}$ ,  $b = 3.0\text{fm}$  和软势情况下, 两种碎块构成方式的碎块多重性的时间谱  
实线代表 QMD, 虚线代表 IQMD.

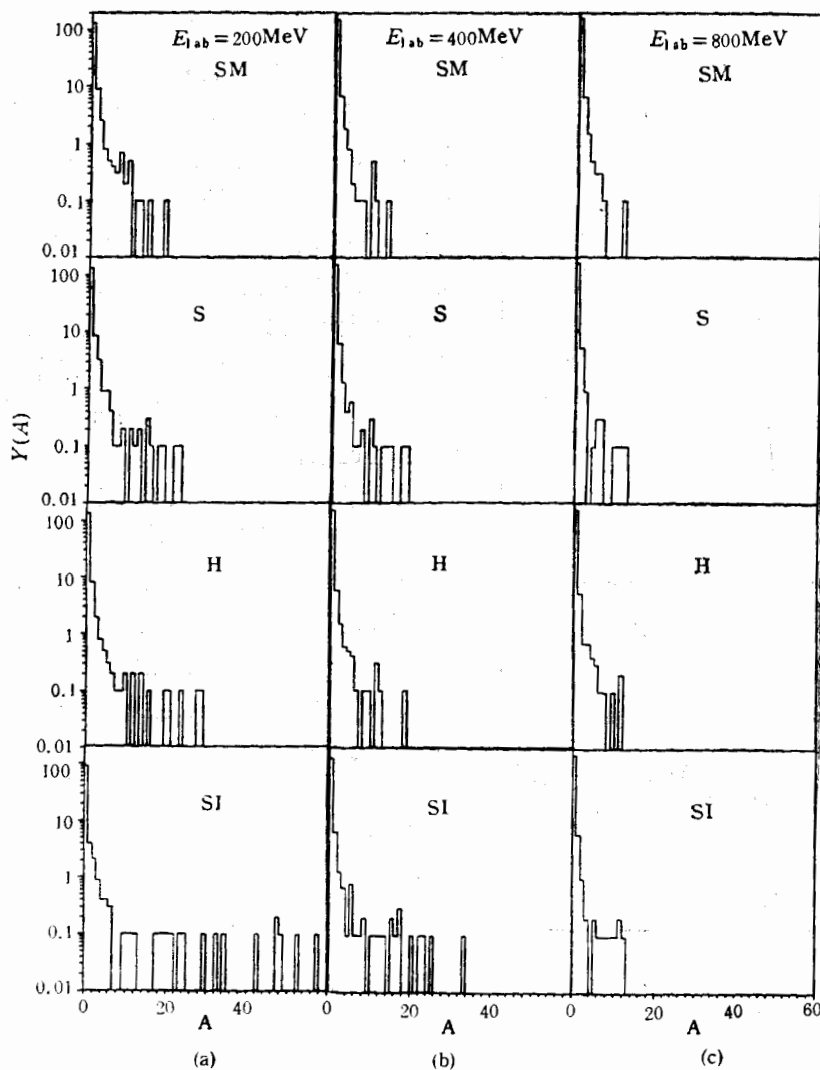


图2 在  $200\text{fm}/c$ , 反应  $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$  在  $\frac{E_1}{A} = 200, 400, 800\text{MeV}$ ,  $b = 3\text{fm}$  时的碎块多重性分布

S 表示软势, SI 表示软势加介质效应, SM 表示软势加动量相关势, H 表示硬势.

的激发能和热化在增加。特别是入射能量超过每核子  $800\text{MeV}$  时,非弹性截面变得越来越重要,导致总截面接近自由核子-核子碰撞截面,因此具有介质效应的碰撞系统,其激发能、系统热化接近甚至大于自由核子-核子碰撞的情形,故有介质和无介质两种情况下碎片多重性的差异变得不明显(参看图 2c)。

### 3.3 动量相关的相互作用 (MDI) 对于多重碎裂的影响

由于重离子碰撞中的动量相关作用在核子之间产生一种附加的排斥作用,从而减小了碰撞数和碰撞系统的热化过程,但是在相同条件下,重离子碰撞过程中介质中的核子具

有比冷核物质中核子要高的平均横动量,从而在给定的动量条件下,具有 MDI 的碰撞系统中核子与没有 MDI 的情况下的核子相比,前者以较高速度运动,即具有 MDI 的系统将更有效地转移横动量和能量,因此尽管由于排斥作用减少碰撞数,但由于更有效地在碰撞系统中储存能量,因而与没有 MDI 的系统相比较,具有 MDI 的系统更容易发生碎裂(参看图 2)。

比较软势加 MDI (记为 SM)与硬势的多重碎裂结果是很有趣的。在我们以前的工作中<sup>[3]</sup>,就标度核物质压缩效应的横动量而言,似乎 SM 的横动量趋近于硬势,然而比较两种情况下的多重碎裂分布花样(参看图 2),在 200 和 400MeV 入射能量下,SM 的碎片分布显然比硬势的分布要窄,即前者的碰撞系统比起后者来更易碎裂,这就意味着尽管 SM 就压缩效应而言趋于硬势,但在转移储存能量方面,SM 则更有效。

随着入射能量的增加,对于各种情况下的碰撞系统而言,其激发能都在增加,故更易碎裂,即软势、软势加 MDI 以及硬势的分布花样差别不大。

### 3.4 状态方程对多重碎裂的影响

我们以前的工作<sup>[3]</sup>表明集体流和核物质密度同样对状态方程很敏感,然而从图 2 软势和硬势的多重碎裂花样来看,两者差别并不明显。

## 4 小 结

由于改进的 QMD 比较精确地处理了多体关联和碎片构成过程,因而它能够描述重离子碰撞中多重碎裂过程。碎片多重性随碎片质量的分布花样对核子-核子碰撞截面和动量相关相互作用是敏感的。较低能区(200 和 400MeV),介质中核子-核子碰撞截面相对于自由碰撞截面的减小导致碰撞数减少,从而更多的重碎片在碰撞中存活下来。随着能量的增加,弹性截面越来越重要,致使介质中总截面接近或大于自由碰撞截面,使碎裂差别的情况减小。动量相关势则由于在碰撞中核子之间更有效地转移动量和能量,导致碰撞系统较多的热化和激发,因而较易碎裂。然而状态方程对多重碎裂影响是不明显的。

综上所述,核子-核子碰撞截面,动量相关相互作用以及状态方程对不同物理量的影响是不同的。

## 参 考 文 献

- [1] G. F. Bertsch and S. Das Gupta, *Phys. Rep.*, **160**(1988)189.
- [2] C. NGO, H. NGO, S. Leray and M. E. Spina, *Nucl. Phys.*, **A499** (1989)148.
- [3] Liu Jianye, Ge Yucheng and Yang Fuzhong, *Z. Phys.*, **A345** (1993) 187.
- [4] G. Cugnon, T. Tizutani and J. Vandermeulen, *Nucl. Phys.*, **A352** (1981) 505.
- [5] B. Ter Haar, R. Malfliet, *Phys. Rev.*, **C36** (1987) 1611.
- [6] G. Bertsch, G. E. Brown, V. Koch and Bao-an Li, *Nucl. Phys.*, **A490** (1988) 745.

## Multifragmentation in Heavy Ion Collisions

Zhang Shaoguang Liu Jianye

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

Received on September 6, 1993

### Abstract

The QMD model is coupled with the restructured aggregation model (RAM), which is named as improved QMD (IQMD). By IQMD, the influences of the medium effect, momentum dependent interaction and the equations of state on the multifragmentation process at different beam energies have been investigated.

**Key words** multifragmentation, equations of state, momentum dependent interaction, medium effect.