

10—100MeV/A 能区重离子碰撞 反应机制的演化*

朱全伶 葛凌霄

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

李祝霞

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要

在量子分子动力学模型框架下,研究了10—100MeV/A能区重离子碰撞的动力学过程;计算了集团的质量分布及其随时间的演化,以及密度分布随时间的发展。同时预言了该能区的反应机制及其特征,并与BUU模型作了比较。

一、引 言

八十年代,随着国际上的 CERN-SC、GANIL、MSU、RIKEN 和国内的 HIRFL 几台中能重离子加速器的先后运行,为研究库仑位垒至 150MeV/A 能区的重离子碰撞 (HIC) 提供了条件。实验和理论的研究表明:对于重离子碰撞来说,这个能区是平均场、两体碰撞和泡利阻塞效应竞相起作用的区域。已发展的 BUU 或 VUU 理论,可以较好地处理该能区的 HIC^[1]。同 TDHF 一样,BUU 方程是单体的密度矩阵方程,未能有效地考虑多体关联^[2]。为模拟 HIC,把核子作为类点粒子处理,采用试验粒子即多次模拟的方法,其结果阻止了平均场的涨落;此外,对密度分布使用了系综平均,可能会洗掉涨落和关联,这都不利于研究集团的形成和碎裂。新近,由经典分子动力学 (CMD) 方法发展起来的量子分子动力学 (QMD) 模型^[3],在研究集团的形成和碎裂中有突出的优点。在这个模型中,每个核子由一个双高斯波包来表示,直接通过两体、三体相互作用,考虑核子间的相互作用势,而不是通过平均场;不象 BUU 那样,对一个事件进行上百次的模拟,而是一个事件一个事件地模拟,从而保留了涨落和关联。其理论基础是否为多体密度矩阵的理论,现正在研究之中^[4]。当然,包括涨落和多体关联的 BUU 理论也已经出现^[5],但付诸于应用,还有一定困难。

利用 QMD 模型来研究 HIC,大都是在较高入射能量的能区(1.05GeV/A)^[3],最近,已有人将该模型应用到较低的能区^[6]来研究融合反应。本文试图用 QMD 方法,在一定能量范围内 (10—100MeV/A),研究 HIC 过程中反应机制随能量的演化。对不同入射

本文1991年6月13日收到。

* 国家自然科学基金资助项目。

能量的 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 系统, 分别计算了碰撞过程中集团的质量分布、不同质量分布随时间的演化以及反应平面中密度分布随时间的发展。

在 10—100MeV/A 能区, 实验和理论对中心碰撞都有了较好的了解, 已经预言了随着轰击能量的升高, 反应机制由全融合 (CF)、非全融合 (ICF) 向碎裂 (Frag.) 跃迁的趋势。但对于周边碰撞, 了解的却很少, 这是反应机制复杂实验上难以区分造成的。但在不同入射能量时, 通过对质量分布随碰撞参数和时间演化的分析, 我们看到: 反应机制随能量的变化并不是突然的跃迁, 而是一个连续的发展过程; 在某一能量下, 不同的反应机制可以并存和竞争; 在周边碰撞中, 随着入射能量的增加, 可能存在着由非完全深部非弹碰撞 (IDIC) 的图象向参加者-旁观者 (P-S) 的图象发展的趋势。

二、QMD 模型

假定一个核子在相空间中由一个双高斯波包来表示, 系统的 Wigner 分布函数为^[7]

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \sum_i f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \sum_i \frac{1}{(\pi \hbar)^3} \exp\left\{-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)^2}{2L} - \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{p}_i)^2 \cdot 2L/\hbar^2}{2L}\right\}, \quad (1)$$

其中, 坐标空间的分布宽度 L 固定为常数 ($L = 2.0\text{fm}^2$), 即不让波函数弥散。对于宽度 L 的选取要适中, 如太小, 会由于测不准关系, 出现一个不合理的高动量, 但也不能太大, 太大就得不到符合物理事实的核表面。由方程(1)可以得到系统在坐标空间中的密度为:

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \sum_i \frac{1}{(2\pi L)^{3/2}} \exp\{-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)^2}{2L}\}, \quad (2)$$

归一化条件为:
$$\iint f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{r} d\mathbf{p} = A, \quad (3)$$

其中, A 为原子核的核子数。

模型中, 直接通过两体和三体相互作用, 得到核子间的相互作用势。我们选用了 Skyrme 类型的短程相互作用势, 对长程相互作用势, 考虑了 Yukawa 相互作用(表面弥散)势及库仑相互作用势。对任意一个粒子 i , 总能量 H_i 为:

$$H_i = T_i + \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} U_{ij}^{(2)} + \frac{1}{3} \sum_{j, k (j \neq k, i, k \neq i)} U_{ijk}^{(3)}. \quad (4)$$

两体及三体相互作用势部分由下式来得到:

$$U_{ij}^{(2)} = \int f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \cdot f_j(\mathbf{r}', \mathbf{p}', t) V^{(2)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r} d\mathbf{p} d\mathbf{r}' d\mathbf{p}', \quad (5.1)$$

$$U_{ijk}^{(3)} = \int f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \cdot f_j(\mathbf{r}', \mathbf{p}', t) \cdot f_k(\mathbf{r}'', \mathbf{p}'', t) V^{(3)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{r}'') d\mathbf{r} d\mathbf{p} d\mathbf{r}' d\mathbf{p}' d\mathbf{r}'' d\mathbf{p}'', \quad (5.2)$$

其中:

$$V^{\text{tot}} = V^{(2)} + V^{(3)} = V^{\text{loc}} + V^{\text{Yuk}} + V^{\text{Coul}}, \quad (6.1)$$

$$V^{\text{loc}} = t_1 \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') + t_2 \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \cdot \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}''), \quad (6.2)$$

$$V^{\text{Yuk}} = V_Y \cdot \exp\{-\gamma \cdot |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| / |\mathbf{r} - \mathbf{r}''|\}, \quad (6.3)$$

$$V^{\text{Coul}} = V_c \cdot \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (6.4)$$

由(5)式,作用在第 i 个核子上的势能分别为:

$$U_{\text{loc}}^{(2)} = t_1 \sum_{j(j \neq i)} \frac{1}{(4\pi L)^{3/2}} \exp\{-(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2/4L\}, \quad (7.1)$$

$$U_{\text{loc}}^{(3)} = t_2 \sum_{j(j \neq i)} \frac{1}{(4\pi L)^{3/2}} \exp\{-(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2/4L\} \left(\sum_{k(k \neq i, j)} \frac{1}{(4\pi L)^{3/2}} \exp\{-(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k)^2/4L\} \right), \quad (7.2)$$

$$U_{\text{Coul}}^{(2)} = V_c \sum_{j(j \neq i)} \frac{1}{r_{ij}} \operatorname{erf}\left(\frac{r_{ij}}{\sqrt{4L}}\right), \quad (7.3)$$

$$U_{\text{Yuk}}^{(2)} = \frac{1}{2} V_Y \sum_{j(j \neq i)} \frac{1}{r_{ij}} \cdot \exp\{L\gamma^2\} \left[\exp\{-\gamma r_{ij}\} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{L}\gamma - \frac{r_{ij}}{\sqrt{4L}}\right) - \exp\{\gamma r_{ij}\} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{L}\gamma + \frac{r_{ij}}{\sqrt{4L}}\right) \right], \quad (7.4)$$

其中, $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$, $\operatorname{erf}(x)$ 和 $\operatorname{erfc}(x)$ 分别为误差函数及余误差函数. 各式的系数由满足原子核的基态性质来确定, 分别为 $t_1 = -124/\rho_0 \text{ MeV}$, $t_2 = 70.5/\rho_0^2 \text{ MeV}$ ($\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$), $V_c = \left(\frac{Z}{A}\right)^2 e^2$ (Z 为原子核的核电荷数, A 为其质量数), $V_Y = -7 \text{ MeV}$, $\gamma = 0.8 \text{ fm}^{-1}$. 同 BUU 模型中平均场的形式^[8]相类似, 由这组系数给出的是硬势 ($K = 380 \text{ MeV}$).

基态时,在相空间中每个波包的中心位置无规地分布在半径为 $R = 1.142A^{1/3}$ 和半径为 P_F 的球内;在坐标空间中,两核子之间的距离大于 1.7 fm ;核子的坐标和动量满足测不准关系. 初始化后,高斯波包的中心位置按正则方程传播:

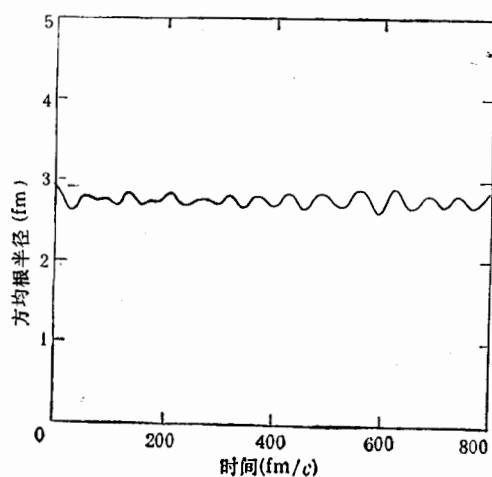
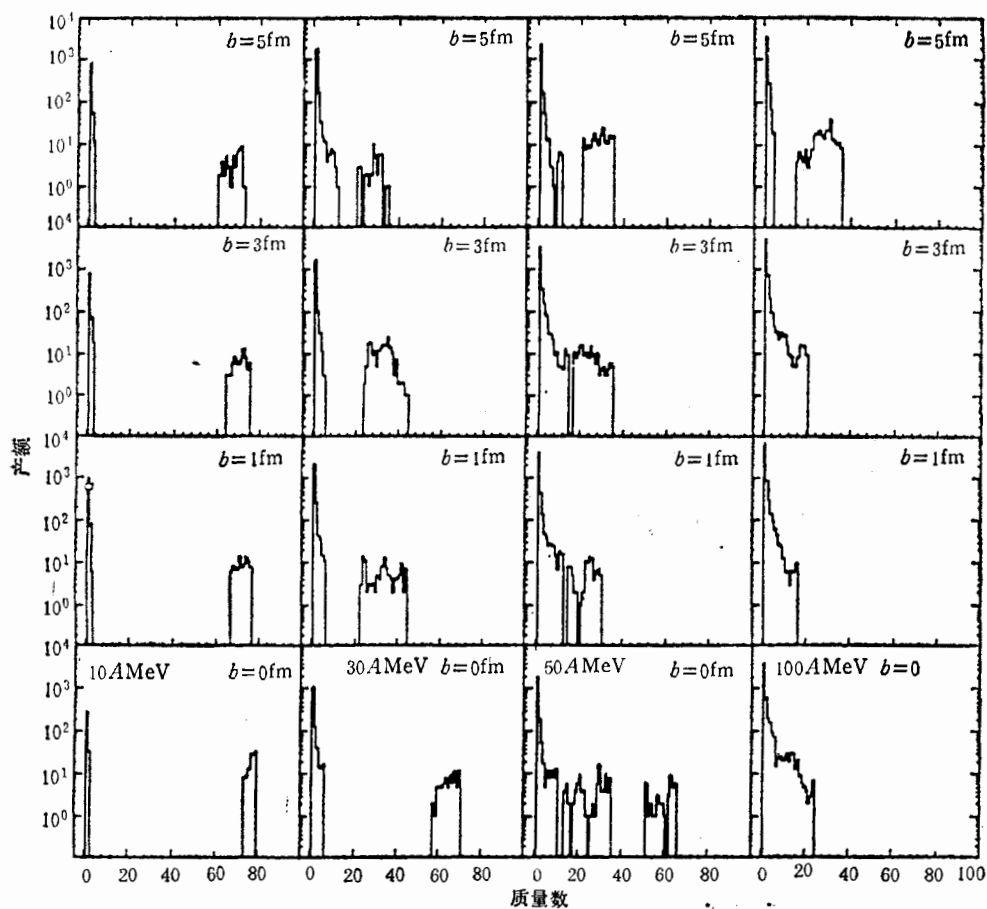
$$\dot{\mathbf{p}}_i = -\frac{\partial H_i}{\partial \mathbf{r}_i}, \quad (8.1)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \frac{\partial H_i}{\partial \mathbf{p}_i}. \quad (8.2)$$

核子间碰撞的考虑,同 BUU 方法一样^[8],即假设了独立核子的碰撞,但未考虑关联.

三、反应机制随能量及碰撞参数的演化

同 BUU 理论相比, QMD 方法保留了涨落和关联, 这有利于碎片形成的研究. 同时,分布函数选为高斯分布,便于计算表面能及库仑能,把无穷大核物质变成了有限核. 形成集团的判据与文献[9]的方法相同,即考虑核子为每个集团的组成部分,如果两核子间的距离小于临界值 $d_{\text{crit}} = 3 \text{ fm}$,就判断为属于相同的集团. 这样对所有核子重复判断后,系统就分为孤立的一些核子和某些集团. 选择 $d_{\text{crit}} = 4 \text{ fm}$ 和 5 fm ,发现 d_{crit} 对集团的选择结果并不是十分灵敏,另外,本文对动量空间未采用特殊截断的方法.

图 1 ^{40}Ca 方均根半径稳定性的检验图 2 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 不同能量、不同碰撞参数的质量分布

对原子核在基态传播时的稳定性做了仔细的检验。图 1 是 ^{40}Ca 在基态时的方均根半径随时间变化的情况。

对 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 的对称系统, 当入射能量为 10、30、50 和 $100\text{MeV}/A$, 碰撞参数 b 为 0、1、3、5fm 时分别进行了计算, 得到在碰撞过程中的质量分布, 如图 2 所示, 产额是十个反应事件模拟的结果.

1. 对头碰撞

在图 2 中, 当 $b = 0\text{fm}$ 时, 可以清楚地看到, 在低能范围 ($10\text{MeV}/A$), 碎片的质量分布由一个重碎片和少数核子组成. 随着入射能量的增加, 碎片质量分布朝着较轻的一方移动, 核子和小集团的数目也相对增多. 这意味着, 反应机制从 CF 向 ICF 变化. 入射能量为 $30\text{MeV}/A$ 时, 估计 75% 的线动量转移 (LMT) 给融合核; 而在 $10\text{MeV}/A$ 时, LMT 接近 95%, 这已被 BUU^[1] 和文献[6]的计算结果所证明. 当入射能量为 $50\text{MeV}/A$ 时, 我们看到碎片质量分布十分复杂, 除有围绕 $A = 60$ 的大集团外, 还有 $A = 20$ 附近的中间质量碎片, 且与 $A < 40$ 的碎块区域相连接, 反应了不同反应机制间的竞争过程. 重的集团反映了 ICF 的贡献, 而中间质量集团, 来自于 Frag. 及 P-S 的图象. 而入射能量为 $100\text{MeV}/A$ 时, 对头碰撞造成了完全的碎裂 (TE). 同时, 反应机制演化的图象, 可以从 $X-Z$ 反应平面的密度分布随时间的演化中直观地看到, 图 3 给出了 $50\text{MeV}/A$ 时对头碰撞的例子. 由图 4 可见, 轻集团、中间质量碎片和较重的集团都出现在整个反应过程中. 图 3、4 都是十个反应事件模拟的结果.

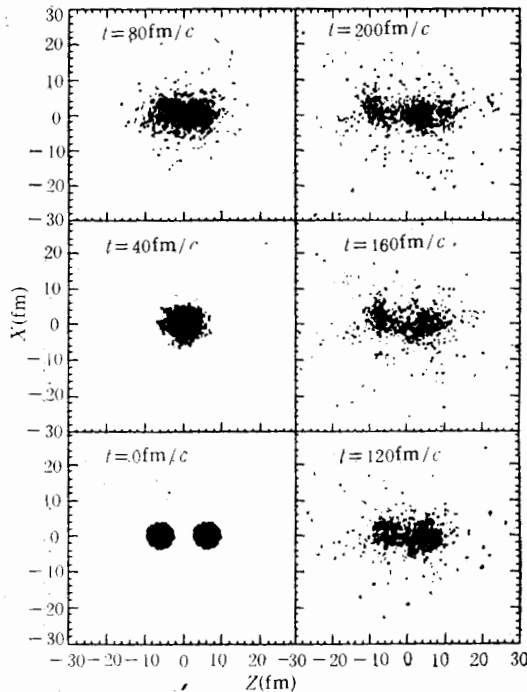


图 3 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$, $E_{\text{inc}} = 50\text{MeV}/A$, $b = 0\text{fm}$, 反应平面内密度分布随时间的发展

当入射能量为 $30\text{MeV}/A$ 时, 碎片成份一块是围绕稍小于炮弹和靶质量的分布, 其它是一些核子和较小的集团, 而中间质量碎片却很少. 同低能时的 DIC 相比较, 这是类

由此看出, 反应机制随能量的发展, 并不是突然的跃迁, 而是一个连续变化的过程. 在某些能量下, 不同的反应机制可以同时存在并发生竞争, 这也造成了实验观测和理论处理的困难.

2. 近中心和周边碰撞

从低能 HIC 的理论和实验研究知道, 对 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 反应, 融合截面占总反应截面的绝大部分, 很多碰撞参数都贡献给融合事件. 从图 2 可以看出, 在 $10\text{MeV}/A$ 时, 碰撞参数从 $b = 0-5\text{fm}$, 质量分布都是一个重碎片、少数核子及小的集团. 但随着碰撞参数的增大, 融合几率明显变小, 重碎片的分布宽度变宽, 并朝着轻质量一方移动. 对于更大的碰撞参数, 反应机制将会出现的深部非弹碰撞 (DIC) 和准弹 (QE) 反应, 这里未做计算.

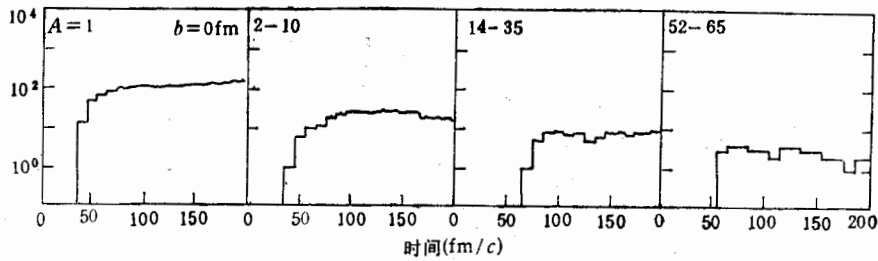


图 4 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$, $E_{\text{inc}} = 50 \text{ MeV}/A$, $b = 0 \text{ fm}$, 不同的质量分布随时间的发展

DIC 的分量。我们知道,低能时的 DIC 有一个围绕着炮、靶质量的质量分布,其峰值出现在接近炮、靶质量处,宽度随总动能损失的增大(碰撞参数减小)而逐渐变宽。当能量较高 ($30 \text{ MeV}/A$) 时,由于前平衡发射核子和小集团的数目增多,使质量中心较小于炮、靶质量。又由于炮、靶进行核子交换的缘故,仍然存在着大于炮、靶的质量碎片,随着碰撞参数的发展,可以看出一个弛豫过程。为了与低能时的 DIC 图象加以区别,我们称这种机制为 IDIC。

当能量增加到 $50 \text{ MeV}/A$ 时,大于炮、靶质量的碎片不再出现,显示了质量碎片不会重于炮、靶质量的特征。同 IDIC 的特征相比,中间质量碎片明显增多,这是 P-S 的图象。参加者及炮、靶旁观者明显出现在 X-Z 反应平面的密度分布随时间演化图(图 5)中。随着碰撞参数的减小,中间质量碎片出现的几率逐渐增大。这意味着, b 较小时,参加者范围内的核子数会更多一些,即擦去的核子数较多,使得炮、靶旁观者的质量变小,故 $b = 1 \text{ fm}$ 时,最重的炮、靶剩余比 $b = 3 \text{ fm}$ 和 $b = 5 \text{ fm}$ 时要小(图 2)。

当入射能量为 $100 \text{ MeV}/A$ 时, $b = 5 \text{ fm}$, 是 P-S 的图象。将图 2 和图 6 结合起来可以看出, $b = 3 \text{ fm}$ 时,是炮、靶碎裂(P.T.Frag.)的图象,同较高能量 ($1.05 \text{ GeV}/A$) 时 $^{197}\text{Au} +$

^{197}Au 的 QMD 计算结果^[4]比较,就会发现,两种能量下的计算结果在某些方面有类似之处。在能量为 $100 \text{ MeV}/A$ 的中心碰撞情况下,没有重的集团存在,看到的是 $5 < A < 24$ 的集团。周边碰撞 ($b = 5 \text{ fm}$) 时,炮、靶剩余物的质量数在 $A < 35$ 的范围内。然而,在此能量下,从密度分布随时间的演化图中,看不到较高能量 ($1.05 \text{ GeV}/A$) 时所看到旁流

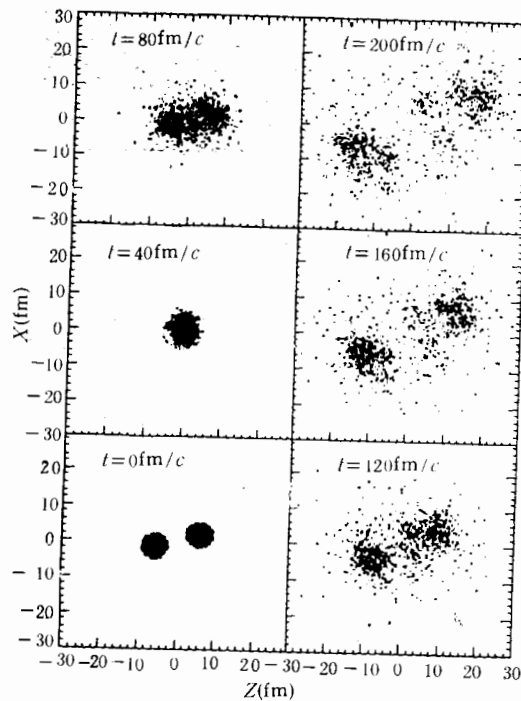


图 5 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$, $E_{\text{inc}} = 50 \text{ MeV}/A$, $b = 3 \text{ fm}$, 反应平面内密度分布随时间的演化

特征。图7是在该能量时4个碰撞参数贡献的质量分布。从图中可以看出,在 $A < 15$ 之前,似乎存在有 $A^{-\tau}$ 的趋势,从整个质量分布来看,其趋势偏离于液-气相变的预言,但对

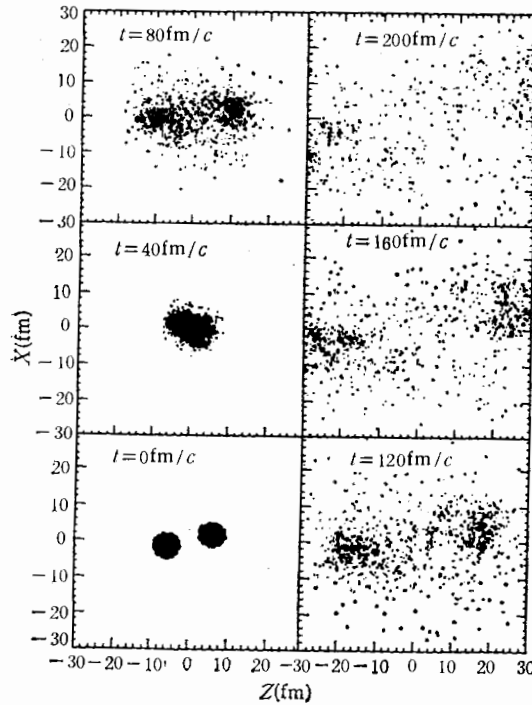


图6 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$, $E_{\text{inc}} = 100 \text{ MeV}/A$, $b = 5 \text{ fm}$,
反应平面内密度分布随时间的发展

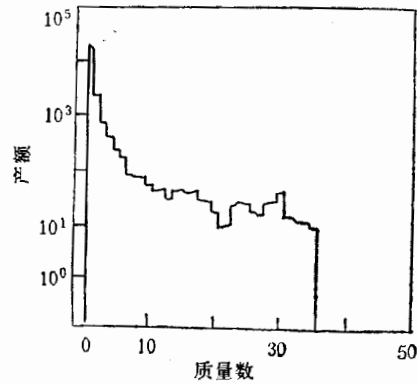


图7 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$, $E_{\text{inc}} = 100 \text{ MeV}/A$,
 $b = 0, 1, 3, 5 \text{ fm}$ 四个碰撞参数贡献的
质量分布

于中心碰撞情况,却存在接近于幂定律 (Power-law) 的趋势。

四、小 结

将碎片的质量分布及其随时间的发展和密度分布随时间的演化综合起来预言重离子的反应机制及特征,特别是在反应机制比较复杂的中低能过渡区,与BUU理论相比,要全面而清晰得多。这是QMD模型的优点之一。对于所做的计算结果见表1。

表1 反应机制随入射能量及碰撞参数的演化

能量(MeV/A)		碰撞参数 (fm)			
		10	30	50	100
碰撞参数 (fm)	5	CF	IDIC	P-S	P-S
	3	CF	IDIC	P-S	P.T.Frag.
	1	CF	IDIC	P-S	TE
	0	CF	ICF	ICF, P-S, Frag.	TE

我们得出下述几点结论:

1. 反应机制随能量的发展是连续的。对头碰撞时,反应机制的演化从 CF, ICF 直至破碎,存在着占优势的不同反应机制的共存和竞争。

2. 近中心和周边碰撞十分复杂。按照我们提出的判断,反应机制的演化从 CF 或 DIC 到 IDIC 直至 P-S, 最后发展至 Frag。

3. 非全熔合分量随能量的升高而减小,直至消失。除前平衡发射是主要原因外^[10],贡献给 ICF 的碰撞参数很少,也是一个可能的原因。

QMD 模型用于较轻系统时,其空间密度分布的弥散区域过大,计算结果对不同抽样的依赖也较灵敏,需要进一步加以改善。在较低的能量区域,对 DIC 和 IDIC 机制的研究工作目前正在进行之中。

参 考 文 献

- [1] 张丰收,葛凌霄,高能物理与核物理,**14**(1990),561.
- [2] 葛凌霄,卓益忠,高能物理与核物理,**13**(1989),652.
- [3] J. Aichelin et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988), 2451.
- [4] J. Aichelin, "Quantum" Molecular Dynamics a dynamical microscopic N-body approach to investigate fragment formation and the nuclear equation of state in heavy ion collisions, to be published.
- [5] J. Randrup and B. Remaud, *Nucl. Phys.*, **A514**(1990), 339.
- [6] T. Maruyama, A. Ohnishi, and Horiuchi, *Phys. Rev.*, **C42**(1990), 386.
- [7] P. Carruthers and M. Zachariasen, *Rev. Mod. Phys.*, **55**(1983), 245.
- [8] G. F. Bertch et al., *Phys. Rep.*, **160**(1988), 189.
- [9] C. Hartnack et al., *Nucl. Phys.*, **A495**(1989), 303.
- [10] Ge Lingxiao and Zhang Fengshou, *Chinese Journal of Nucl. Phys.*, **12**(1990), 207.

Evolution of Heavy Ion Reaction Mechanism in the Energy Region of 10 to 100MeV/A

ZHU QUANLING GE LINGXIAO

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

LI ZHUXIA

(Institute of Atomic Energy, China, Beijing 102413)

ABSTRACT

The dynamical process of heavy ion collisions in the energy region of 10 to 100 MeV/A has been investigated by Quantum Molecular Dynamics model. According to the calculated mass distribution of clusters, the time evolution of mass distribution and density distribution, the reaction mechanism and its characteristic are predicted and compared with those obtained from the BUU model.