

中能重离子碰撞中的涨落和中间质量碎片发射的机制*

张晓东 葛凌霄

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1994-09-09 收稿

摘 要

在 QMD 模型的基础上,系统研究了 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统的中间质量碎片随能量和时间的演化以及它们的动力学起源.集中讨论了反应机制的跃迁,动力学过程中密度涨落和平均中间质量碎片的关系以及碎裂的时间尺度.发现中间质量碎片随能量的上升和下降伴随着涨落的上升和下降.并预言对所研究的反应,当入射能量为 65MeV/u 时,彻底解体可能发生.碎裂的时间尺度大约为 $140\text{fm}/c$,且随能量的增大,此时间尺度不再减小,达到饱和.

关键词 涨落,平均中间质量碎片,时间尺度,多重碎裂,彻底解体.

1 引 言

中能重离子碰撞中观察到的多重碎裂现象是近年来很受人们关注的一个研究课题.多重碎裂意味着激发核系统同时碎裂成几个中间质量碎片 (IMF),已经由实验证实,伴随着核完全碎裂的 IMF 多次发射是最重要的反应道之一.人们提出很多理论来探索多重碎裂的物理根源.动力学过程中涨落增长的不稳定性,即平均场的涨落和热核的统计退激是其中最主要的观点. IMF 发射的时间尺度是对两种起源的一个很重要的判据.热核统计退激的时间尺度,已由统计模型预言,其时间尺度随裂变($\tau_f \sim 1660\text{fm}/c$)、蒸发中子等机制不同而不同.但平均场涨落引起碎裂的时间尺度,尚未有确切的结论.因此,在 QMD 模型的基础上,对以下问题的讨论是非常重要的.

(1) 通过中间质量碎片平均多重数随能量和时间的演化来认识中能重离子碰撞中反应机制的跃迁,寻找一个可观测量来反映反应机制的跃迁的特征,和它们的动力学起源.

(2) 动力学过程中密度统计涨落特征,以及它和平均中间质量碎片的关系.

(3) 通过密度的统计涨落来确定碎块发射的时间尺度,讨论碎裂机制.

在量子分子动力学 (QMD) 模型^[1,2]的基础上,通过对 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 系统能量从 $10—$

* 国家自然科学基金和中国科学院 LWTZ-1298 经费资助.

120MeV/u 变化时,中心碰撞的动力学过程的系统研究,我们发现,重离子碰撞系统进入不稳定区域后,涨落以指数形式增长,相对涨落在特定能区(50MeV/u—80MeV/u)时达到最大,伴随着此能区中,中间质量碎片数增多,通过密度涨落提取了碎裂的时间尺度,对 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统,碎裂的时间尺度大约为 140fm/c,且随能量的增大,此时间尺度不再减小,达到饱和,反映了平均场的涨落是碎裂的物理根源。同时,通过对不同反应机制下,电荷多重数分布的研究,我们发现 $Z = 1$ 的多重数和中间质量碎片平均多重数之比,明显有一个拐点,准确反映了反应机制从多重碎裂到彻底解体的跃迁。

2 模型和方法

QMD 模型中,假定每个核子在坐标空间及动量空间中可用一个双高斯波包表示。密度矩阵的 Wigner 表示是动量与坐标空间的高斯波包,

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

其中, L 在整个过程中保持常数 (2.0fm^2)。由(1)式得到粒子在坐标空间密度:

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

初始化后,系统内各波包中心的空间坐标和时间坐标按正则方程传播。在包括两体和三体力的情况下,每个粒子的 Hamilton 量为:

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

其中, T_i 为动能 $U_{ij}^{(2)}$ 及 $U_{ijk}^{(3)}$ 分别为两体力与三体力的贡献。核子-核子相互作用力包括零程的 Skyrme 力、长程的 Coulomb 相互作用力、Yukawa 表面相互作用力和中子质子的对称作用力,其具体表达式和参数见文献[2,3]。

通常情况下,核可看作由核子组成的均匀介质,其性质由核子贡献的平均场决定,此时,可用一个随空间位置缓慢变化的定域密度来描述此系统,而平均场可表示为此定域密度的泛函,由于平均场是缓慢变化的,其涨落较小。另外,若核子系统有些地方有核子(密度大),有些地方没有核子(密度小),则密度涨落很大。这样的系统显然不能用一个平均密度描述其性质,平均场有很大的涨落。故密度分布的涨落反映了平均场的涨落。

根据统计理论,密度分布的涨落可由密度分布的二极矩表示,密度分布的二极矩为:

$$\sigma^2 = \langle \rho(t)^2 \rangle - \langle \rho(t) \rangle^2, \quad (4)$$

则相对涨落为

$$\sigma_p^2 = \frac{\langle \rho(t)^2 \rangle}{\langle \rho(t) \rangle^2} - 1. \quad (5)$$

由方程(2),平均密度为 $\langle \rho(t) \rangle = \frac{1}{(4\pi L)^{3/2}} \sum_{ij} \exp\left\{-\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2}{4L}\right\}$, (6)

密度平方的平均值

$$\langle \rho(t)^2 \rangle = \frac{1}{3\sqrt{3}(2\pi L)^3} \sum_{ijk} \exp\left\{-\frac{[(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2 + (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k)^2 + (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k)^2]}{6L}\right\}, \quad (7)$$

这样,在 QMD 模型的数值模拟中,相对涨落为

$$\sigma_{\rho}^2 = \frac{1}{N_{\text{RUN}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{RUN}}} \left[\frac{\langle \rho(t)^2 \rangle_n}{\langle \rho(t) \rangle_n^2} - 1 \right]. \quad (8)$$

3 中间质量碎片发射和反应机制的跃迁

在中能重离子碰撞中,中间质量碎片发射(IMF)的增加是一个重要的特性,无论是实验还是理论,都对 IMF 的产生给与很大的注意.下面,我们从质量分布和平均中间质量碎片数来研究不同反应机制下的特征.从 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统在四种能量下的电荷分布,我们清楚地看到 10MeV/u 时,复合核(CF)形成;40MeV/u 时,非完全融合(ICF)形成;能量为 60MeV/u 时,非完全融合事件消失,中间质量碎片出现一个峰值(中间质量碎片定义为 $3 \leq Z \leq 12$).而入射能量为 120MeV/u 时,电荷分布类似于指数分布的形状.在 ALADIN 实验的定义下^[9],我们研究了反应的最大电荷数 Z_{max} 和所有电荷大于或等于 2 的碎块电荷之和 Z_{bound} 在能量为 10MeV/u、70MeV/u 和 120MeV/u 时的关系.如图 1 所示,对于低能 10MeV/u 时,我们所观察到的 Z_{max} 和 Z_{bound} 大约在 30—40 之间,反应最后产物是复合核.当能量为 70MeV/u 时, Z_{max} 分布在 5—12 之间, Z_{bound} 分布在 10—31 之间,绝大多数碎片在中间质量碎片的范围.当能量为 120 MeV/u 时, Z_{max} 和 Z_{bound} 都变得非常小,碎片主要集中在 $Z_{\text{max}} \sim 2-4$,反应的产物主要是单核子,中间质量碎片数较少,显示了汽化的特征.

图 1 清楚地反映出中心碰撞时, $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 随能量的增加,反应机制从 CF—ICF—多重碎裂到彻底解体的演化.为了得到一个从多重碎裂到彻底解体的能量,图 2(b) 为中间质量碎片的平均值 (M_{IMF}) 在入射能量为 10—120MeV/u 时的变化曲线.我们可

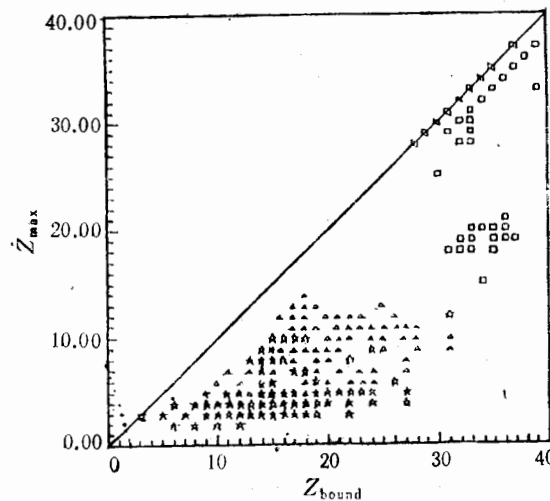


图 1 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统在三种能量下 Z_{max} 和 Z_{bound} 的关系
 \square 10MeV/u, \triangle 70MeV/u, \star 120MeV/u

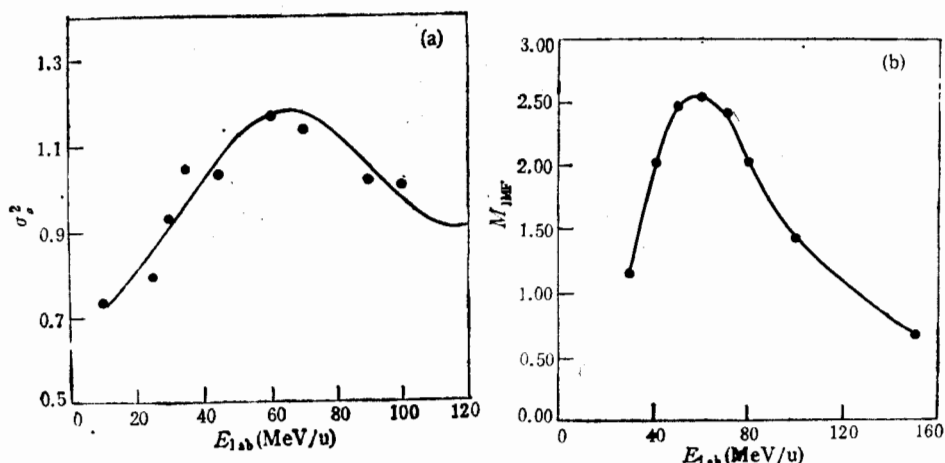


图 2 对 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统,以及涨落随入射能量的关系(a)中间质量碎片的平均值随入射能量的关系 (b)

以看到,入射能量在 50—80 MeV/u 时, M_{IMF} 大约在 2.0—2.5 之间,且明显在 $E \cong 65\text{MeV/u}$ 时,出现一个峰值。而无论能量低于 40MeV/u 或高于 80MeV/u, M_{IMF} 都减少。这种演化趋势与早期测量的从 27MeV/u—220MeV/u Ar + Au IMF 截面随能量的演化^[5]一致。新近报道的 Au + Au 系统 M_{IMF} 能量演化的测量^[6],也证实了 IMF 的多重性随能量初始上升,而超过 100MeV/u 后, IMF 的多重性却随能量上升而下降。

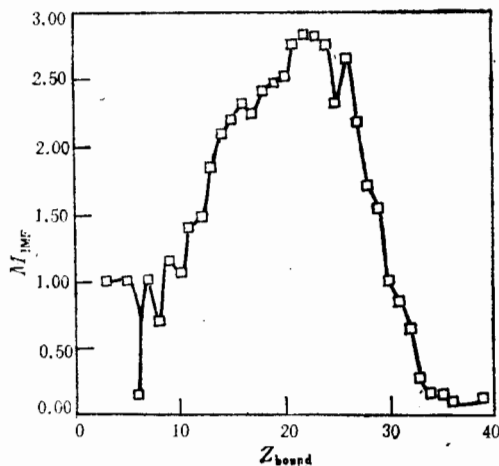


图 3 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统在不同能量下, M_{IMF} 和 Z_{bound} 的关系

最近, GSI 的 ALADIN 实验小组,观察了 600MeV/u 能量下, Au + C, Al, Cu 三个反应系统的 Z_{max} , Z_{bound} , N_{IMF} 和轻带电粒子多重性 M_{lp} 。他们观察到, Au + C 未发生彻底解体, Au + Al 和 Cu 显示了彻底解体的特征。同时发现,在包括中心碰撞和周边碰撞的不同碰撞参数下, M_{IMF} 和 Z_{bound} 的关系在四个反应系统中,竟然落到了同一条曲线上,极大 $M_{\text{IMF}} \sim 3-4$ 发生在 $Z_{\text{bound}} \sim 40$ 处。ALADIN 的实验反映了系统在相同的能量下,不同反应系统在不同碰撞参数下的特征。我们发现,如果把不同入射能量下,同一反应系统在中心碰撞中的 M_{IMF} 和 Z_{bound} 相关联(图 3)也得到了类似于 ALADIN 的趋势,当 $Z_{\text{bound}} \sim 27$ 时,极大 $M_{\text{IMF}} \sim 2.8$ 。很明显,低能时, M_{IMF} 很小,接近于 0, Z_{bound} 很大;对多重碎裂过程, M_{IMF} 最大, Z_{bound} 位于中间;高能时, M_{IMF} 减小, Z_{bound} 也很小,显示了彻底解体的特征。

图 4(b) 为 $E = 50\text{MeV/u}$ 时,中间质量碎片的平均值随时间的演化关系,我们看

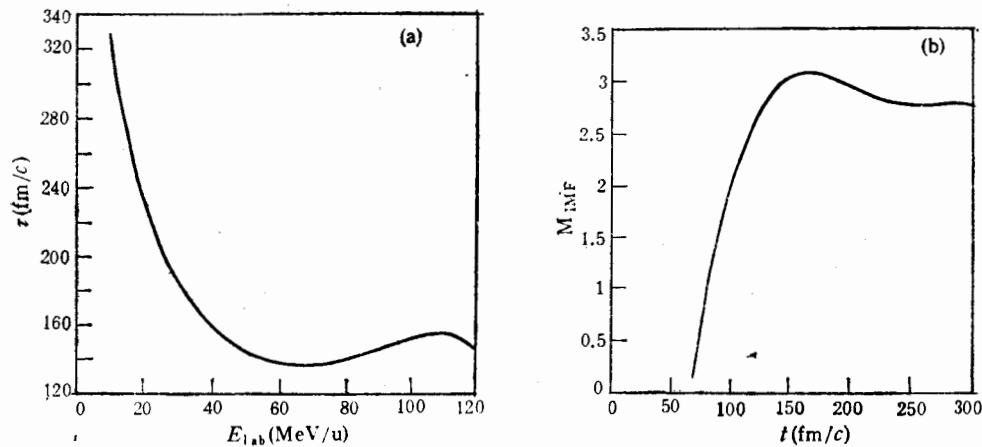


图 4 对 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统, 碎裂的时间尺度随能量的关系 (a) 以及中间质量碎片的平均值随时间的演化关系 (50MeV/u) (b)

到 M_{IMF} 在 $t \geq 140\text{fm/c}$ 时, 没有明显地增长, 表明 IMF 发射时间尺度饱和性。

当然, 反应机制的跃迁, 除 IMF 的发射外, 也会表现在其它方面^[7], 例如, 碰撞系统密度的时间演化、激发能随能量的变化以及碰撞系统的内能和密度随轰击能量的改变, 都发现在此跃迁能量范围, 出现了显著地变化。为了表示从多重碎裂到彻底解体的跃迁, 我们定义 $\eta = N(Z=1)/M_{\text{IMF}}$, 其中, $N(Z=1)$ 为电荷为 1 的多重数。我们发现, 当能量大约为 $50\text{--}80\text{MeV/u}$ 时, η 明显有一个拐点。

4 密度涨落和中间质量碎片的发射

根据动力学的观点, 平均场的涨落在多重碎裂中起了很重要的作用。平均场涨落反映了系统同时碎裂成为几个中间质量碎片。因此, 涨落和中间质量碎片发射之间有一定的联系。相对涨落 (σ_r^2) 的能量和时间的依赖关系可以使我们对中间质量碎片发射机制有一个非常直观的理解。

图 5 为 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统能量在 $10, 55, 120\text{MeV/u}$ 时, 相对涨落随时间的演化关系。从中, 我们可以看出重离子碰撞中涨落的演化图像。 $t \leq 70\text{fm/c}$ 两核相互重叠压缩, 开始形成小密度涨落。 $t \cong 70\text{fm/c}$ 时, 系统进入不稳定区域, 此时, 涨落开始以指数形式增长, 但涨落增长到一定程度, 且开始偏离指数增长时, 系统开始进入一个新稳定 (饱和) 区域, 在这个区域中, 看到碎片的形成。我们提取了在饱和区域中的平均 σ_r^2 值, 来反映系统在不同能量时涨落的大小 (图 2 (a))。特别引人注目的是当入射能量在 $50\text{--}80\text{MeV/u}$ 时, σ_r^2 最大, 且明显在 $E \cong 65\text{MeV/u}$ 时, 出现一个拐点。也就是说, 涨落随能量增长不是一个单调函数, 而在某些特定能区, 涨落最大。即平均场涨落在能量为 65MeV/u 时最大, 同中间质量碎片的平均值 (M_{IMF}) 变化趋势完全一致, 同样地, 中间质量碎片数也在此能区中达到最大, 这些都证实了平均场涨落的大小, 必伴随着中间质量碎片的多少。

我们知道, 重离子反应中, 密度分布的二极矩反映了系统中核子数分布的均匀性, 即

涨落的大小。若系统由相互作用的核子组成一个融合系统,此系统可由能反映整体集团的

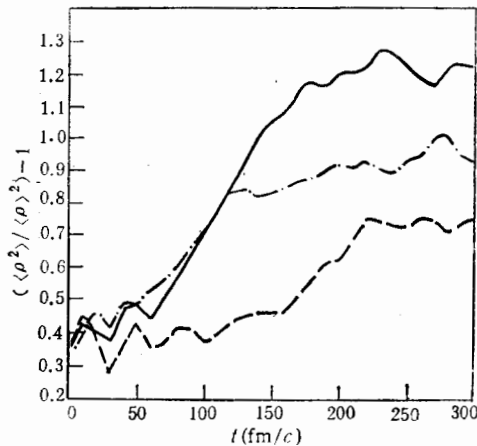


图 5 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统在不同能量下,相对涨落随时间的演化

---10MeV/u, —55MeV/u, -·-120MeV/u.

观察到碎块的发射,我们定义碎裂的时间尺度为系统进入此饱和区域时的时间。图 4(a) 为 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统碎裂的时间尺度随能量的变化关系。我们观察到碎裂的时间尺度从 $\tau \cong 250\text{fm}/c$ ($E = 10\text{MeV}/u$) 直至 $\tau \cong 140\text{fm}/c$ ($E \geq 50\text{MeV}/u$)。使人惊奇的是,当 $E > 50\text{MeV}/u$ 后,我们没有观察到 τ 的减小, τ 几乎达到饱和。我们观察的结果同 E. Bauge 等人在 Kr + Nb 实验中,用两碎块速度关联函数得到的结果一致^[9]。他们提取的 Kr + Nb 碎裂时间尺度为 $125\text{fm}/c$ 。同样发现,当 $E > 55\text{MeV}/u$ 后, τ 几乎没有变化,似乎表明, Kr + Nb 系统,多重碎裂的跃迁能量为 $55\text{MeV}/u$ 。比较 $E = 50\text{MeV}/u$ 时,中间质量碎片的平均值随时间的演化关系,我们看到 M_{IMF} 在 $t \geq 140\text{fm}/c$ 时,没有明显的增长,与 σ^2 随时间的演化一致。

的平均场决定,则平均场涨落必然很小,此外,密度分布二极矩也必然比较小,在入射能量为 $10-20\text{MeV}/u$ 时,符合这种情况,此时,系统除发射一些轻粒子外,剩余一个大的集团。与此相反, $E > 100\text{MeV}/u$, 系统由分立核子组成,已几乎成为气体,此时,密度涨落必然比较小,反应的最后阶段,系统发射核子和一些轻集团,反应系统称之为彻底碎裂。当能量在 $50-80\text{MeV}/u$ 时,系统处于液汽混杂区,可能进入 Spindal 区,密度涨落达到最大,伴随着复杂集团,即中间质量碎片的发射。

根据上述讨论,当涨落偏离指数增长,进入一个新的稳定和饱和区域时,我们可

5 总结和讨论

本文系统研究了中能重离子碰撞中,中间质量碎片随能量和时间的演化以及它们的动力学起源。集中讨论了反应机制的跃迁,动力学过程中密度涨落和平均中间质量碎片的关系以及碎裂的时间尺度。与实验观测结果趋势一致。说明量子分子动力学模型是描述动力学过程集团产生的一种很好的工具。

我们通过对 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 系统能量从 $10\text{MeV}/u-120\text{MeV}/u$ 变化时,中心碰撞的动力学过程的研究。发现,重离子碰撞系统进入不稳定区域后,涨落以指数形式增长,相对涨落开始随能量的上升而上升,当入射能量大于 $65\text{MeV}/u$ 后,相对涨落开始随能量的上升而下降。同时,中间质量碎片随能量的上升和下降伴随着涨落的上升和下降,密度涨落和中间质量碎片数的关系,反映了平均场的涨落是碎裂的物理根源。碎裂的时间尺度可由涨落偏离指数增长时的时间确定,对 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 中心碰撞系统,碎裂的时间尺度大约为 $140\text{fm}/c$,且随能量的增大,此时间尺度不再减小,达到饱和。并清楚看到,对所研究

的反应, 当入射能量为 65MeV/u 时, 彻底解体可能发生。观测中间质量碎片平均多重数是判断反应机制的一个重要工具。

尽管量子分子动力学模型给出了中高能重离子碰撞中完全的动力学描述, 但它当中的主要分量: 核子-核子相互作用和它在介质中的碰撞截面目前还不可能完全确定, 几个计算^[9]表明, 目前, QMD 模型预言了较少数目的中间质量碎片。改善和发展这种描述方法是非常重要的。但理论和实验总的趋势一致。本文给出的模型相关的计算结果, 对于认识中高能重离子碰撞和核物质在极端条件下的性质有非常重要的意义。

感谢朱全伶和中国原子能院李祝霞的热情帮助。

参 考 文 献

- [1] J. Aichelin, *Phys. Rep.*, **202** (1991)233.
- [2] 朱全伶、葛凌霄、李祝霞, 高能物理与核物理, **16**(1992)658.
- [3] 朱全伶、葛凌霄、张晓东, 高能物理与核物理, **18**(1994)850.
- [4] U. Lynn, P. Kreuz, J. C. Adloff et al., *Nucl. Phys.*, **A545** (1992) 329c.
- [5] A. Milkau et al., GSI Preprint, GSI 91008, 1991.
- [6] M. B. Tsang, Proceeding of the XXXII Int. Winter Meetings on Nucl. Phys., ed by IORI(Rice-rca Scientific ed Educazione Permanente) 1994, p512.
- [7] Ge Lingxiao, Zeng Xianhua, Zuowei, *Phys. Rev.*, **C50**(1994)2129.
- [8] E. Bauge, A. Elmani, A. Lacey et al., *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993) 3705.
- [9] G. Peilert et al., *Phys. Rev.*, **C39** (1989) 1402.

Fluctuation and Emission of Intermediate Mass Fragments in Heavy Ion Collisions at Medium Energy

Zhang Xiaodong Ge Lingxiao

(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Received 9 September 1994

Abstract

Based on the quantum molecular dynamics model, the time and energy evolutions of intermediate mass fragments (IMF) and its dynamical origin are systematically studied for $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ central collision. The transition of reaction mechanism, the relation between the density fluctuation and IMF and the time scale of IMF emission are discussed in detail. The relative density fluctuation attains to maximum at energy region of $50\text{--}80\text{MeV/u}$ corresponding to an obvious increase of IMF. The possible occurrence of total disassembly at incident energy of about 65MeV/u for the studied reactions is predicted. Meanwhile, a saturation value ($140\text{fm}/c$) for time scale of multifragmentation is obtained.

Key words fluctuation, intermediate mass fragments, time scale, multifragmentation, total disassembly.