

中能重离子反应中“neck”的形成和碎裂^{*}

陈列文 葛凌霄 张丰收

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1996-11-07收稿

摘 要

在不同碰撞参数下,应用量子分子动力学模型对 $30\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 碰撞系统进行了计算. 观察到周边碰撞 $b = 6\text{fm}$ 时碰撞系统产生的中等质量碎片最多,发现这是由于碰撞过程中“neck”碎裂造成的,同时还发现“neck”结构形成过程中碰撞系统相对密度涨落增长较慢,饱和值较小,体现了形状不稳定性的特征.

关键词 “neck”碎裂,中等质量碎片,相对密度涨落,形状不稳定性,动力学不稳定性.

1 引 言

中能重离子反应中观察到的中等质量碎片(IMF)的发射是近年来人们非常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 IMF. 人们已提出了很多理论来探索 IMF 发射的物理根源,其中最主要的有两种观点,即动力学涨落和热核的统计退激. 所建立的产生 IMF 的物理图象主要集中于中心碰撞,涉及对核物质的整体不稳定性,也就是 Spinodal 不稳定性. 近年来,人们又发现形状不稳定性也是 IMF 发射的一种非常有趣的机制^[1-3],例如中心碰撞中的 Bubble、Ring 和 Disklike 等奇异结构,这些都有利于 IMF 的产生. 在周边碰撞过程中,特别在稍低的能量下,“颈”(“neck”)结构的形成也是产生 IMF 的一种可能途径.

在低能深部非弹性碰撞(DIC)中早就发现了“neck”结构^[6]. 在DIC过程中,类弹和类靶余核通过“neck”结构相连并发生核子交换,产生能量、角动量、质量、电荷等物理量的输运.“neck”结构形成于弹靶核开始接触以及开始分离的时刻. 在反应的后期阶段由于表面不稳定性的增大,“neck”结构开始断裂,导致两核分离. 在中能区的周边碰撞中,IMF 发射的“neck”碎裂机制是近年来理论核物理学家和实验核物理学家都非常感兴趣的一个研究课题^[3-5].

^{*} 国家自然科学基金和中国科学院LWTZ-1298经费资助.

在中能重离子碰撞过程中,“neck”结构有利于 IMF 的产生,研究它的形成及衰变将对多重碎裂的探索有非常重要的意义. 为此目的在量子分子动力学(QMD)模型的基础上,对 30MeV/u $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 碰撞系统在不同碰撞参数下进行了系统的计算. 结果表明:在 $b = 6\text{fm}$ 时,碰撞过程中产生的 IMF 最多,并明显观察到碰撞过程中“neck”结构的形成及碎裂,同时发现 $b = 6\text{fm}$ 时相对密度涨落指数增长最慢,相对涨落饱和值较小,这反映了形状不稳定性的特征.

2 模型及方法

在 QMD 模型中,整个系统在相空间中的 Wigner 密度分布函数为:

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

这说明每个核子在相空间中都是一个双 Gauss 波包. 式中 r_i 和 p_i 分别代表核子的平均坐标和动量, L 是 Gauss 波包宽度,这里固定为常数 $L = 2.0\text{fm}^2$. r_i 和 p_i 满足正则运动方程,其 Hamilton 量可表示为:

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2\mu} + U^{\text{dd}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{sym}}, \quad (2)$$

式中 μ 为每核子的质量,其中 U^{dd} 、 U^{Yuk} 、 U^{Coul} 和 U^{sym} 分别为密度相关势 (Skyrme 势)、Yukawa(表面)势、库仑势和对称能,其具体形式及参数见文献 [7]. 由于本文讨论的是 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 系统,取对称能强度系数 $C = 0$.

在核子-核子碰撞过程中,采用了实验提取的核子-核子碰撞截面,具体形式见文献 [7].

重离子碰撞过程中平均场的涨落体现了动力学涨落,而密度分布的涨落又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阶矩来表示. 密度分布的二阶矩定义为:

$$\sigma^2 = \langle \rho^2(t) \rangle - \langle \rho(t) \rangle^2, \quad (3)$$

则相对涨落为:

$$\sigma_\rho^2 = \frac{\langle \rho^2(t) \rangle}{\langle \rho(t) \rangle^2} - 1, \quad (4)$$

平均密度 $\langle \rho(t) \rangle$ 和密度平方的平均值 $\langle \rho^2(t) \rangle$ 的具体表达式见文献 [8]. 这样在 QMD 模型的数值模拟中,相对密度涨落为:

$$\sigma_\rho^2 = \frac{1}{N_{\text{run}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{run}}} \left[\frac{\langle \rho^2(t) \rangle_n}{\langle \rho(t) \rangle_n^2} - 1 \right], \quad (5)$$

其中 N_{run} 为模拟事件数. 计算表明相对密度涨落以指数增长,到一定时刻将偏离指数增长达到饱和,饱和值的大小与平均 IMF 的多少是一致的 [8].

在碰撞过程中,集团的选取方法见文献 [9],这里取临界距离 $d_{\text{cr}} = 3.5\text{fm}$. 用 Z 表示集团的电荷数,对于 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 碰撞系统,IMF 定义为 $3 \leq Z \leq 12$ 的集团,这足以排除 α 集团、质子以及蒸发余核等非 IMF 成份 [10].

3 计算结果及分析

用以上介绍的模型和方法,在能量为 30MeV/u 时,对碰撞系统 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 在不同碰撞参数下进行了系统的研究(以下的计算结果都是 50 个碰撞事件的模拟结果). 表 1 给出了不同碰撞参数下碰撞系统的平均 IMF 数 ($\langle M_{\text{IMF}} \rangle$). 不难看到 $b = 0-5\text{fm}$ 时, $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$ 变化不大,而当 $b = 6\text{fm}$ 时, $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$ 出现最大值,当 $b = 7, 8\text{fm}$ 时 $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$ 明显地减少. 这完全不同于高能量时所发生的周边碰撞 IMF 的增多,例如 400MeV/u 时的 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$, 在这种能量下由于近中心碰撞时系统发生了汽化, IMF 很少,而周边碰撞时旁观者碎裂使得 IMF 出现最大值^[11]. $b = 6\text{fm}$ 时 $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$ 最大是否由于此时碰撞过程中形成了“neck”结构? 在中能重离子碰撞中,特别在费米能附近, DIC 仍然是很重要的反应机制,同低能 DIC 特征相比较,其主要差别在于 IMF 发射变为它的质量或电荷分布的一个重要分量. 30MeV/u 的 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 碰撞,在碰撞参数 $b = 6-8\text{fm}$ 时显示了 DIC 特征和多重碎裂机制的混合. 图 1 给出了 $b = 6, 7$ 和 8fm 时的质量分布. 从图中可以看出,当 $b = 6\text{fm}$ 时, IMF 较多,此时反应机制主要是 DIC 和多重碎裂,另外还有少量的非完全融合 (ICF) 成份. 当 $b = 7\text{fm}$ 时, IMF 相对减少,此时反应机制主要是 DIC, 而 ICF 和多重碎裂占次要地位. $b = 8\text{fm}$ 时, IMF 已经很少,此时 DIC 占绝对优势.

表 1 不同碰撞参数时的平均中间质量碎片数

| $b(\text{fm})$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$ | 1.196 | 1.238 | 1.231 | 1.378 | 1.353 | 1.231 | 1.413 | 1.113 | 0.320 |

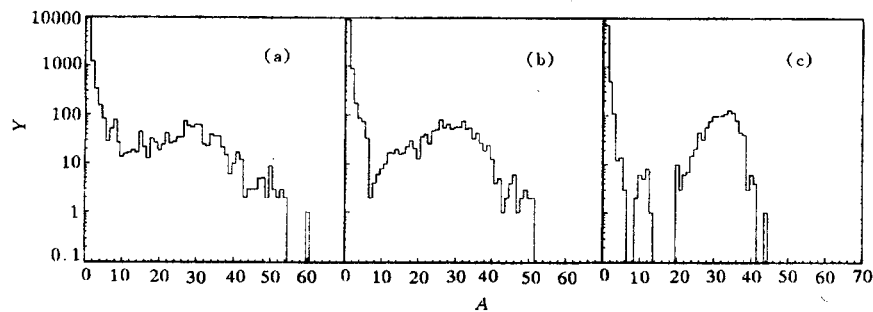


图 1 30MeV/u $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 在不同碰撞参数时的质量分布

(a) $b=6\text{fm}$; (b) $b=7\text{fm}$; (c) $b=8\text{fm}$.

可以认为 $b = 6\text{fm}$ 时 IMF 主要有两个来源: DIC 过程的炮弹碎裂和“neck”碎裂,而前平衡发射及类弹和类靶余核的退激蒸发只会贡献极少量的 IMF,因为在 30MeV/u 的入射能量下系统的激发能较小,蒸发 IMF 是比较困难的. 为了考察碰撞过程中“neck”结构形成及碎裂的几何结构和时间尺度,图 2 给出了碰撞过程中反应平面内的等密度线的时间演化(一个碰撞事件). 从图中可以清楚地看到“neck”形成及其碎裂的几何结构和时间尺度. 大约 $t = 80\text{fm}/c$ 时,类弹和类靶核之间开始形成“neck”结构,直到大约 $t =$

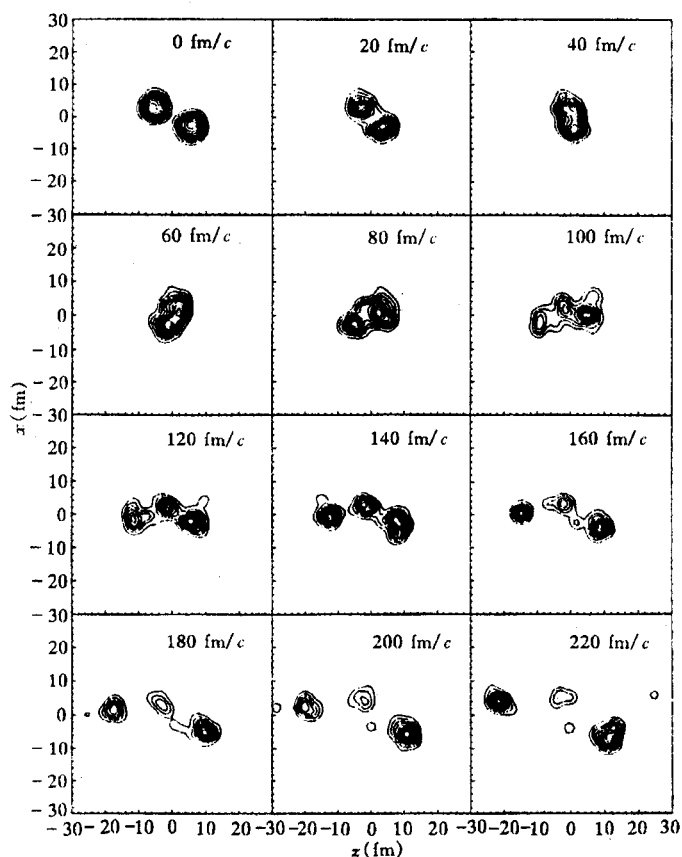


图2 反应平面内等密度线的时间演化

160 fm/c 时, “neck”开始碎裂成 IMF. 同时还可以看到从类弹和类靶余核跑出的一些小碎块. 这充分表明了“neck”碎裂是 IMF 发射的一种非常有趣的机制.

为了探索形状不稳定性 and 动力学不稳定性之间的关系, 采用了相对密度涨落分析的方法^[8]对 30 MeV/u $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 碰撞系统在不同碰撞参数下进行了探讨. 相对密度涨落增长的不同情况是区别由“neck”碎裂和 Spinodal 不稳定性 (动力学不稳定性) 所造成的多重碎裂的一种可能途径. 由 Spinodal 不稳定性所造成的相对密度涨落是呈指数增长的, 而“neck”碎裂是由形状或几何不稳定性造成的, 它所造成的相对密度涨落将是很复杂的, 涨落增长的速度应当较慢. 在图 3 中

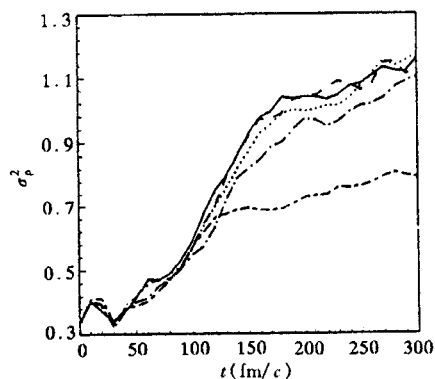


图3 不同碰撞参数时相对密度涨落的时间演化

— $b=0\text{fm}$; -- $b=2\text{fm}$; ... $b=4\text{fm}$;
- · - $b=6\text{fm}$; - - - $b=8\text{fm}$.

给出了碰撞参数 $b = 0, 2, 4, 6$ 和 8fm 时相对密度涨落的时间演化. 由图可以看到, 对于不同的碰撞参数在一定的时间区域内都存在着相对密度涨落的指数增长, 然后偏离指数增长而进入一个基本达到饱和的区域. 对于指数增长区域可用公式

$$\sigma_\rho^2 = A \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (6)$$

进行最小二乘法拟合, 式中 A 为一个常数, τ 为弛豫时间, 它反映了相对密度涨落的增长快慢, 其愈小说明相对密度涨落增长愈快. 相对密度涨落的平均饱和值定义为偏离指数增长后各时刻相对密度涨落的算术平均值. 表 2 给出了不同碰撞参数下的弛豫时间 τ 和相对密度涨落的平均饱和值, 从表中可看到 $b = 6\text{fm}$ 时相对密度涨落的平均饱和值较 $b = 0-5\text{fm}$ 时都要小. 这说明 $b = 6\text{fm}$ 时 IMF 最多并不完全是由动力学不稳定性所造成的. 同时还可以清楚地看到, $b = 6\text{fm}$ 时弛豫时间最长, 约为 $134\text{fm}/c$. 以上结果表明 $b = 6\text{fm}$ 时, IMF 的发射存在着一种“冷”的发射机制, 即“neck”碎裂机制, 它是由形状不稳定性所造成的, 此时相对密度涨落增长较慢而其平均饱和值较小.

表2 不同碰撞参数时相对密度涨落增长的弛豫时间 τ 和平均饱和值

| b (fm) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| τ (fm/c) | 114.2 | 103.0 | 105.8 | 122.6 | 117.8 | 119.0 | 133.7 | 125.4 | 116.5 |
| 平均饱和值 | 1.071 | 1.103 | 1.069 | 1.059 | 1.056 | 1.004 | 0.972 | 0.881 | 0.738 |

区别 IMF 是从“neck”碎裂还是从 Spinodal 不稳定性来的仍然是一个很困难的工作, 本文计算的 $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$ 来自这两个方面. 不过从计算中发现 $b = 6\text{fm}$ 时, 在 50 个碰撞事件中大约有 7 个“neck”碎裂事件, 于是对于费米能区的周边碰撞, 可以粗略地估计“neck”碎裂所贡献的 IMF 约占总的 IMF 的 $1/7$.

4 总 结

在 QMD 模型的基础上, 通过对 $30\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 碰撞系统在不同碰撞参数下的计算, 观察到在周边碰撞 $b = 6\text{fm}$ 时 IMF 最多, 发现这是由“neck”碎裂造成的. 通过计算 $b = 6\text{fm}$ 时反应平面内的等密度线的时间演化, 可以清楚地看到“neck”结构形成及碎裂的几何结构和时间尺度. 大约当 $t = 80\text{fm}/c$ 时, “neck”结构开始形成, 直到大约 $t = 160\text{fm}/c$ 时, “neck”结构开始碎裂, 并产生 IMF.

利用相对密度涨落分析的方法, 对不同碰撞参数下的碰撞系统进行了系统的研究, 发现 $b = 6\text{fm}$ 时相对密度涨落指数增长速度最慢, 相对密度涨落的平均饱和值也较小. 这充分说明 $b = 6\text{fm}$ 时 IMF 发射的“neck”碎裂机制, 它是形状不稳定性所造成的. 另外, 粗略的估计表明, 对于费米能区的周边碰撞, “neck”碎裂所贡献的 IMF 约占总的 IMF 的 $1/7$.

本文的探讨希望对中能 DIC 中“neck”碎裂的实验提供一些可能的信息.

参 考 文 献

- [1] L. G. Morreto *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992)1884.
[2] W. Bauer, G. F. Berstch, H. Schulz, *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992)467.
[3] D. E. Fields *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992)3713.
[4] M. Colonna *et al.*, in XXXII Inter. Winter Meeting on Nucl. Phys., Bormio, Italy, 24—28 Jun. 1994, p232.
[5] C. Montoya *et al.*, in XXXII Inter. Winter Meeting on Nucl. Phys., Bormio, Italy, 24—28 Jun. 1994, p506.
[6] W. U. Schroder, J. R. Huizenga, in *Treatise on Heavy-Ion Science*, edited by D. A. Bromley(Plenum, New York, 1984)Vol. 2 and references therein.
[7] 陈列文、张晓东、葛凌霄, *高能物理与核物理*, **20**(1996)1091.
[8] 张晓东、葛凌霄, *高能物理与核物理*, **19**(1995)951.
[9] H. Horiuchi, T. Maruyama, A. Ohnishi, in *Inter. Symp. on Heavy-Ion Phys. and Application*, Lanzhou, China, Oct. 1990,p25.
[10] K. Hagel *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **68**(1992)2141.
[11] M. B. Tsang, in XXXII Inter. Winter Meeting on Nucl. Phys., Bormio, Italy, 24—28 Jun. 1994,p512.

“Neck” Formation and Fragmentation in Intermediate Energy Heavy-Ion Collisions

Chen Liewen Ge Lingxiao Zhang Fengshou

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

Received 7 November 1996

Abstract

Under different impact parameters, the collision system of $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ is investigated in terms of QMD model. It is shown that the number of IMFs is the largest at impact parameter $b = 6\text{fm}$, which is due to the formation of “neck” in collision process. Meanwhile, it is found that, in the process of formation of “neck”, the growth of the relative density fluctuation of the reaction system is very slow and the saturation value is small, which imply the character of shape instability.

Key words “neck” fragmentation, intermediate mass fragment, relative density fluctuation, shape instability, dynamics instability.