

费米能区重离子碰撞动力学*

(II) 动力学与碰撞参数的关系

张丰收 葛凌霄

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

摘要

借助于 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck 理论, 对 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统, 在不同碰撞参数下, 系统地研究了费米能区的碰撞机制。结果表明: 深部非弹性碰撞已由非完全深部非弹性碰撞所取代; 随着轰击能量升高, 非完全深部非弹性碰撞分量变小, $50\text{MeV}/u$ 时已有碎裂发生, $150\text{MeV}/u$ 时已是典型的碎裂过程。同时对中间质量碎片发射的起因做了讨论。

在 BUU 理论框架下, 我们已讨论了费米能区中心碰撞时反应机制与轰击能量的关系^[1]。在整个反应过程中, 非完全融合反应其重迭区的极大密度始终围绕着基态核密度 ρ_0 涨落; 完全碎裂发生在重迭区极大密度小于 $0.5\rho_0$ 以后, 随着轰击能量的升高, 重迭区维持的时间变短。在此能区内, 压缩的产生主要来自于平均场的贡献。同 Vlasov 模型相比较, BUU 模型中由于考虑了碰撞项而有助于非完全融合的形成。

本文讨论中能重离子碰撞在不同碰撞参数下的动力学特征。在低能重离子碰撞中, 深部非弹性碰撞 (DIC) 是介乎于直接反应和全融合反应的中间过程。而在费米能区, 深部非弹性碰撞是否继续存在? 其特征有哪些不同于低能深部非弹性碰撞? 此机制随轰击能量升高如何改变? 无论是从实验上或是理论上回答这些问题都是必需的, 但目前这方面的研究尚少^[2]。为此, 我们采用了包含自洽平均场, 两体碰撞和泡利阻塞效应的 BUU^[3] (或 VUU^[4]) 理论, 对 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统, 在不同碰撞参数时, 轰击能量分别为 $10, 20, 40, 60$, 和 $150\text{MeV}/u$ 的碰撞动力学进行了研究。结果表明: 深部非弹性碰撞已被非完全深部非弹性碰撞 (IDIC) 取代, 其主要特征是靶炮相粘后, 二者之间的旋转依然存在。由于粒子的发射, 出射的两大碎片质量之和小于入射的弹核靶核质量之和。由于非平衡粒子的发射和碰撞过程中出现的压缩及膨胀也耗散了相当的相对运动动能。在一定的轰击能量下, 重迭存在的时间范围随碰撞参数 b 的减小而增加, 重迭区内极大密度随碰撞参数 b 的减小而增加, 当 b 减小到一定程度时变为非完全融合图象。随着轰击能量的增加, 非完全深部非弹性碰撞分量减小, 对 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统, $50\text{MeV}/u$ 轰击能量时已有碎裂发生, 到 $150\text{MeV}/u$ 轰击能量时不可能再有非完全深部非弹性碰撞分量, 能量

本文 1989 年 11 月 24 日收到。

* 国家自然科学基金和中科院科学基金资助

的区分同中心碰撞十分类似^[4]。

Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck^[5] 方程描述了单粒子分布函数 $f(\vec{r}, p, t)$ 随时间的演化：

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} - \nabla U \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} = - \int \frac{d^3 p_2 d^3 p'_1 d^3 p'_2}{(2\pi)^9} \\ \sigma_{nn} v_{12} [f f_2 (1 - f'_1) (1 - f'_2) - f'_1 f'_2 (1 - f) (1 - f_2)] \\ (2\pi)^3 \delta^3 (P + P_2 - P'_1 - P'_2). \quad (1)$$

其中 σ_{nn} 是核子-核子碰撞截面^[6], v_{12} 是碰撞核的相对速度, 平均场 $U(\rho)$ 仅仅采用密度：

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \int f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p} \quad (2)$$

相关的形式：^[7]

$$U(\rho) = A\rho + B\rho^\alpha, \quad (3)$$

参数 A, B 和 α 使其能满足核物质的基本性质。库仑相互作用没有考虑。

方程 (1) 的求解采用试验粒子加网格方法^[8], 初始状态假设试验粒子均匀分布于半径 $R = 1.124 A^{1/3}$ fm 的球内, 核子的起始动量由费米动量为半径的球内均匀抽样, 同时考虑密度的 Woods-Saxon 分布, 对每一试验粒子的初始坐标和动量的确定可在上述分布

表 1

b (fm)	1.0	3.0	5.0
ρ_{max}/ρ_0	1.607	1.435	1.283
r_1 (fm/c)	20	25	30
r_2 (fm/c)	15	20	25
r_3 (fm/c)	—	80	60
Δr (fm/c)	—	60	35

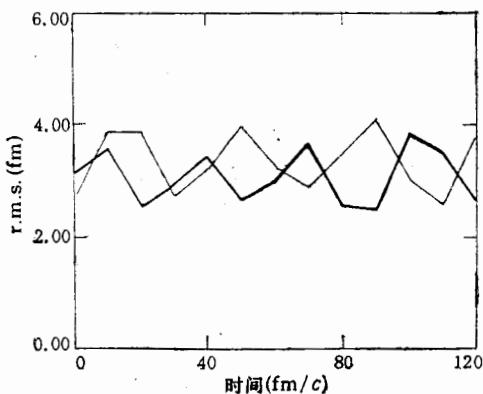


图 1 ^{20}Ne , ^{40}Ar 核均方根半径 rms 随时间的发展
— ^{20}Ne ^{40}Ar

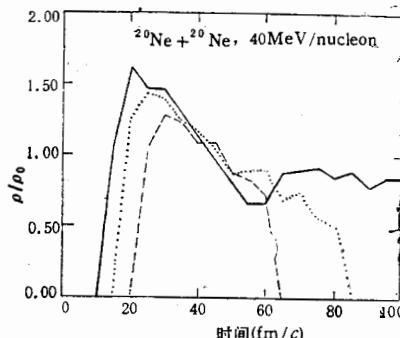


图 2 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统在轰击能量为 40 MeV/u 时不同碰撞参数下重迭区最大密度随时间的发展
— $b = 1.0$ fm $b = 3.0$ fm ---- $b = 5.0$ fm

下由蒙特卡罗模拟给出。方程(1)求解的稳定性已在 $120\text{fm}/c$ 范围内做了检验, 对 ^{20}Ne 和 ^{40}Ar 核, 其均方根半径 r_{rms} 随时间的发展由图 1 给出。当时间间隔 $\Delta t = 0.5\text{fm}/c$, 每一

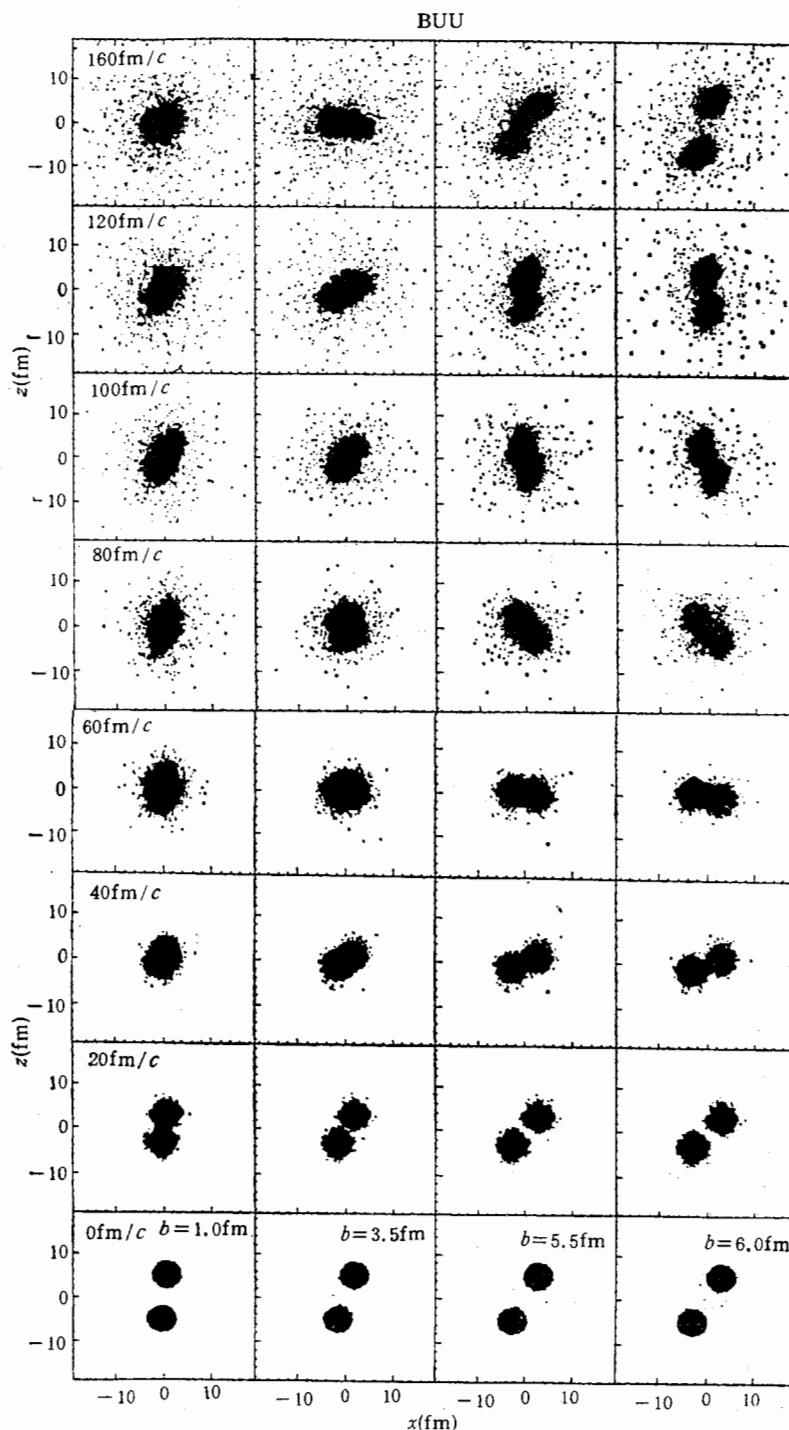


图 3 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统在轰击能量 20MeV/u 时, 不同碰撞参数下反应平面内试验粒子密度分布随时间的发展示意图

真实粒子的试验粒子数为 100 时,试验粒子逃逸率小于 1.5%,能量守恒保持在 99.8%.

表 1 给出了 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统在轰击能量为 40MeV/u 时,不同碰撞参数下的压缩和膨胀情况. 其中 t_1 为压缩到最大密度的时刻, t_2 和 t_3 分别为碰撞系统重迭开始和结束的时刻, Δt 为重迭区保持的时间,其相应重迭区最大密度随时间的发展由图 2 给出. 不同碰撞参数的比较可看出, $b = 1.0\text{fm}$ 是中心碰撞下的非完全融合, 它产生的重迭区在整个碰撞过程中围绕正常密度 ρ_0 涨落^[1], 而 $b = 3.0\text{fm}$ 和 5.0fm 属于周边碰撞, 其重迭区极大密度随 b 的增大而减小, 相互作用时间(重迭区维持的时间)大小也随 b 增大而减小. 在 $b = 3.0\text{fm}$ 时, 重迭区最大密度为 $1.435\rho_0$, 持续时间为 60fm/c ; 而 $b = 5.0\text{fm}$ 时, 重迭区最大密度只有 $1.283\rho_0$, 持续时间仅为 35fm/c . 由于碰撞中粒子的发射, 出射的两片质量已小于入射的弹核和靶核质量, 但仍接近于靶核炮弹核的质量. 有关出射碎片质量分布情况在我们的后继工作中给出.

图 3 和图 4 给出了轰击能量为 20MeV/u 时, 碰撞参数分别为 $b = 1.0, 3.5, 5.5$ 和 6.0 fm 时 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统在 $x-z$ 反应平面内试验粒子密度分布和弹核靶核质心距离随时间的发展. 如图 3 示, 炮弹和靶核相粘重迭后, 绕二者的质心旋转($b = 3.5, 5.5$ 和 6.0fm), 以 $b = 6.0\text{fm}$ 为例, 45fm/c 时两核相粘结; 60fm/c 时旋转 30.00° ; 80fm/c 时旋转 66.43° ; 100fm/c 时旋转 86.95° ; 120fm/c 时两核分离, 总共旋转 94.13° , 最终以负角分离. 这与 Wilczynski^[2]关于 DIC 的假设有一致之处. 当 b 减小时, 旋转角度会增大, 如到 120fm/c 时, 对 $b = 5.5\text{fm}$ 的碰撞, 弹核从相粘起已旋转 123.81° , $b = 3.5\text{fm}$ 时, 弹核从相粘起已旋转 197.74° , 它反映了弹靶核相互作用时间的大小, 从图中明显可看到旋转时有颈形成.

由于这里讨论的是轻核系统, 来自于靶核和参加者区域的裂变几率可以忽略, 但对重靶核系统, 深部非弹性碰撞和非全融合都存在且与之发生竞争, 仔细的区分是必须的. 从图 4 弹靶核质心距离随时间的发展也可看出: 20 MeV/u 轰击能量时, $b = 1.0$ 和 3.5fm 的碰撞属融合机制, $b = 5.5$ 和 6.0fm 的碰撞属深部非弹性机制, $b = 6.5\text{fm}$ 的碰撞则属于直接反应机制.

在轰击能量为 10MeV/u 和 20MeV/u 的较低轰击能量时, $b < 5.5\text{fm}$ 的碰撞都贡献给融合机制见图 3, 图 5, $b > 5.5\text{fm}$ 的碰撞是典型的周边反应, 即非完全深部非弹性碰撞和直接反应. 当轰击能量到 60MeV/u 时, 大部分碰撞参数都贡献给周边过程(图 5(c)), 虽仍有组合系统形成, 但旋转图象并不十分明显, 组合系统维持的时间明显变短, $b = 1.5\text{fm}$ 的碰撞过程中已有碎裂出现, 并同非完全深部非弹性过程和非完全融合过程竞争. 前轰击能量增加到 150MeV/u 时, 由图 5(d) 看出, 既无非完全融合反应, 也无非完全深部非弹性碰撞过程, 是典型的碎裂反应, 它伴有明显的热膨胀效应及中间质量碎片

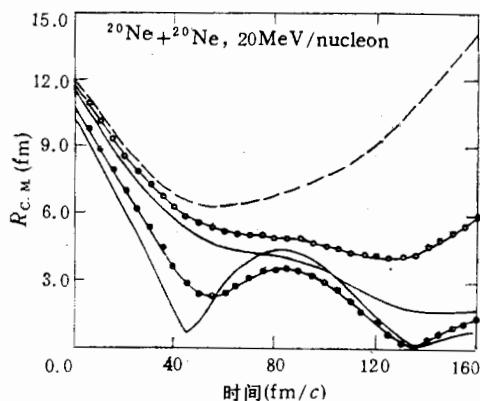


图 4 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统在轰击能量为 20MeV/u 时在不同碰撞参数下弹核靶核的质心距离随时间的发展

— $b = 1.0\text{fm}$ ······ $b = 3.5\text{fm}$ $b = 5.5\text{fm}$
 ○○○ $b = 6.0\text{fm}$ - - - $b = 6.5\text{fm}$

5(c)), 虽仍有组合系统形成, 但旋转图象并不十分明显, 组合系统维持的时间明显变短, $b = 1.5\text{fm}$ 的碰撞过程中已有碎裂出现, 并同非完全深部非弹性过程和非完全融合过程竞争. 前轰击能量增加到 150MeV/u 时, 由图 5(d) 看出, 既无非完全融合反应, 也无非完全深部非弹性碰撞过程, 是典型的碎裂反应, 它伴有明显的热膨胀效应及中间质量碎片

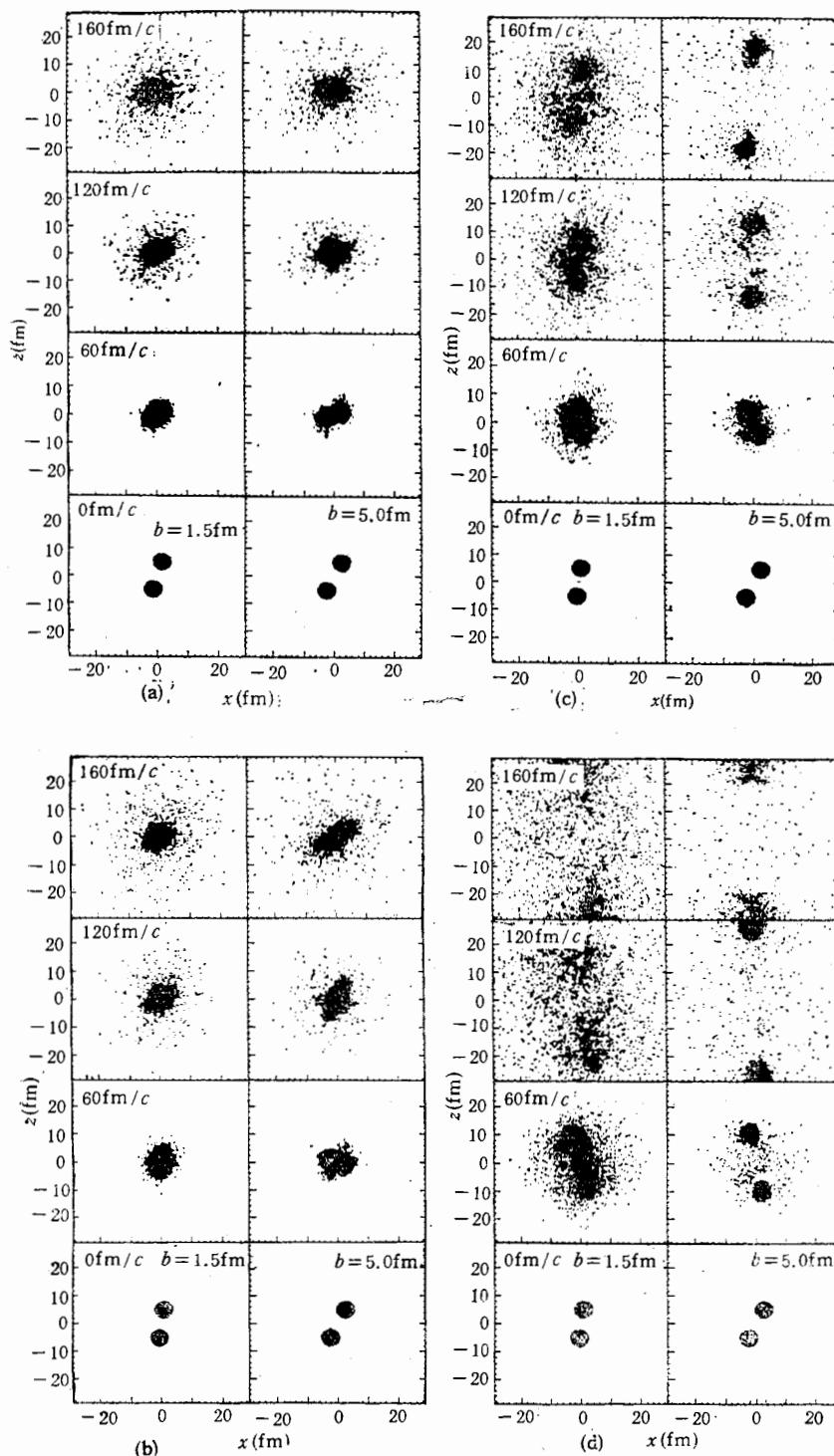


图 5 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统在碰撞参数 $b = 1.5, 5.0\text{ fm}$ 下, 轰击能量分别为 10, 20, 60, 150 MeV/ ν 时反应平面内试验粒子密度分布随时间发展示意图

(IMF) 发射。

在费米能区,发射粒子是碰撞过程中的一个重要特征。由于粒子的发射,使深部非弹性过程变得不完全。在反应初始阶段,就有非平衡粒子发射出来,且发射粒子的数目随轰击能量的增加或碰撞参数的减小而增加;在反应过程中及反应末期,会有大量的轻粒子发射出来,对 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统,计算结果还发现了中间质量碎片 (IMF) 的发射。从图 5(a)(b) 与图 5(c)(d) 的比较可以看出,60 fm/c 时,对轰击能量为 10, 20 MeV/u 的碰撞,碰撞系统的热膨胀很小,在碰撞过程中仅仅发射了一些轻粒子;而对 60 MeV/u 和 150 MeV/u 轰击能量时,到 60 fm/c 已有很大的热膨胀效应,且在碰撞过程中发射大量轻粒子的同时伴有大量中间质量碎片发射出来,它是一非平衡过程。可以认为,有相当部分的中间质量碎片来源于非完全深部非弹性过程。另一个值得注意的问题是,从动力学发展中我们发现,分开的类弹、类靶碎片由于膨胀过程,其体积大于初始核的尺寸。同低能情况不同(低能时分开后碎片膨胀很小,可以忽略),处于激发态的碎片有可能发生碎裂,使得实验观察到了中间质量碎片。它将会对原来的 DIC 图象做重大的修正。当然,这种图象仍需实验的证实,对于擦边碰撞的实验观测,仅有少量结果^[2],还不能确定是否存在来源于二次过程的中间质量碎片的发射。

实验上已发现有又集团结构的弹核破裂后剩余产物同靶核发生非完全深部非弹性碰撞^[10],这种机制本文没有研究。包括质子之间的库仑相互作用对于讨论非完全深部非弹性碰撞 (IDIC) 很重要,尽管需要很长的 CPU,但必须进一步考虑。

参 考 文 献

- [1] 张丰收、葛凌霄,高能物理与核物理, **14**(1990), 561.
- [2] G. Imme et al., "Dissipative collisions at intermediate energies", Nucleons Collision III, edited by C. DETRAZ et al., *Saint Malo*, **B49**(1988), 107.
- [3] J. Aichelin and G. F. Bertsch, *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 1730.
- [4] C. Gregoire et al., *Nucl. Phys.*, **A465**(1985), 317.
- [5] 葛凌霄、卓益忠,高能物理与核物理, **13**(1989), 652.
- [6] J. Cugon et al., *Nucl. Phys.*, **A352**(1981), 505.
- [7] 葛凌霄,核技术, **12**(1989), 479.
- [8] L. X. Ge, X. H. Zeng, J. Y. Liu and B. S. Zeng, proceedings of the International Summer School on Heavy Ion Reaction Theory, Lanzhou, China, 1988.
edited by W. Q. Shen, J. Y. Liu and L. X. Ge (World Scientific, Singapore, 1989), 283.
- [9] J. Wilczynski, *Phys. Lett.*, **47B**(1973), 484.
- [10] Zhu Yongtai, Shen Wenqing et al., *Nucl. Phys.*, **A488**(1988), 409c.

HEAVY ION COLLISION DYNAMICS IN FERMI DOMAIN (II) DYNAMICS DEPENDENCE OF IMPACT PARAMETER

ZHANG FENGSHOU, GE LINGXIAO

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

The peripheral collision mechanisms have been systematically studied via the Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck theory in the Fermi domain for $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ collision system. The characters of energy dependence and the intermediate mass fragment production in the process of incomplete deep inelastic collision were discussed.