第14卷 第6期　　高能物理与核物理　　Vol. 14, No. 6
1990年6月　　HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS　　June, 1990

费米能区重离子碰撞动力学*

(I) 动力学的能量关系

张丰收　　葛凌霄
(中国科学院近代物理研究所,兰州)

摘　　要

本文基于包括了平均场效应,两体碰撞和泡利阻塞效应的 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck理论,系统研究了^{20}Ne+^{20}Ne碰撞系统在轰击能量为5—150MeV/u能区内中心碰撞时,反应机制从全融合、非全融合向碎裂变迁的过程. 讨论了平均场、两体碰撞和泡利阻塞效应随轰击能量的变化及它们对反应机制的影响.

一、引　　言

在稍高于库仑位垒能区的重离子碰撞中,相互作用时间比核内核子的弛豫时间长[1],平均场理论,如 TDHF 较好地解释了实验结果; 在轰击能量高于 150MeV/u 的高能区重离子碰撞中,相互作用时间小于核内核子的弛豫时间,核内核子的约化波长小于核内核子间的距离,此时核子-核子碰撞起主要作用,仅考虑核子-核子碰撞的 Cascade 模型已经用来解释部分实验结果. 随着近几年国际上几台中能重离子加速器先后投入运行,为人们研究从库仑位垒到 150MeV/u 的费米能区的重离子碰撞提供了可能. 实验和理论研究表明,费米能区重离子碰撞是平均场效应,两体碰撞效应和泡利阻塞效应竞相起作用的区域. 不论是仅考虑平均场的 TDHF, 还是仅考虑两体碰撞效应的 Cascade, 在解释此能区重离子碰撞中都遇到了困难, 所以迫切需要能够恰当考虑包含这三种动力学效应的理论. 近年来发展的 BUU[2] 或 VUU[3] 理论是处理此能区重离子碰撞的较好的理论方法之一.

基于上述考虑,我们采用了包含自洽平均场、两体碰撞效应和泡利阻塞效应的 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck (BUU) 或叫 Vlasov-Uehling-Uhlenbeck (VUU) 理论,在仅考虑平均场影响的 Vlasov 动力学框架下和包括了平均场和两体碰撞的 BUU 动力学框架下,分别计算了 ^{20}Ne + ^{20}Ne 碰撞系统在 E_L = 5MeV/u, 10MeV/u, 20MeV/u, 40MeV/u, 60MeV/u 和 150MeV/u 时反应平面中密度分布随时间的发展, 重迭区极大密度随

本文1989年6月28日收到.
* 国家自然科学基金和中科院课题资助.

时间的发展以及发射粒子的特征和泡利阻塞效应的影响．我们试图探索 Vlasov 理论和 BUU 理论对低能重离子碰撞的适应性，系统了解在轰击能量升高时反应机制由全融合、非全融合向碎裂变迁的情况，考查平均场效应、两体碰撞效应和泡利阻塞效应在不同能量下的变化及其对反应机制的影响，以及在不同轰击能量下碰撞体系在压缩和膨胀阶段的特征．

通过能量依赖的系统研究，本文着重探索在兰州重离子加速器能区范围内，碰撞的压缩和膨胀两阶段的形成过程，以及压缩效应主要是什么因素引起的？我们知道，处理高能重离子碰撞的核内级联模型，由于核子-核子碰撞产生了碰撞过程的压缩阶段，而在低高能过渡区，压缩阶段的产生是不是主要来自于平均场效应？另外，我们希望找到某些区分不同反应机制的标志，用单粒子密度分布随时间的发展不能直观地反映出定量的判别，能不能通过重叠区极大密度随时间的发展来辨别此能区不同的反应机制呢？它比较直观又定量，便予预言对一确定反应系统不同反应机制随能量的发展，不同反应机制时，压缩和膨胀两阶段的关系．已有一些计算[2,3,7,10]仔细讨论了 BUU 方程对重离子碰撞的适用性，但有待于做更系统性的研究和比较．

二、模型描述

1933 年，Uehling 和 Uhlenbeck 考虑了泡利原理而发展了 Boltzmann 方程，得到了 BUU 方程[4]，它是描述单粒子分布函数随时间发展的微分-积分方程，最新的推导可看文献 [5]，其一般形式为：

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\boldsymbol{V}\cdot\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{r}}-\nabla U\cdot\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{P}}=-\int\frac{d^3P_2d^3P_1'd^3P_2'}{(2\pi)^9}\cdot$$
$$\sigma v_{12}[ff_2(1-f_1')(1-f_2')-f_1'f_2'(1-f)(1-f_2)]$$
$$(2\pi)^3\delta^3(P+P_2-P_1'-P_2') \tag{1}$$

其中 $f(\boldsymbol{r},\boldsymbol{P},t)$ 是时刻 t 时相空间中单粒子分布函数，σ 是核子-核子碰撞截面[6]，v_{12} 是碰撞核的相对速度，$U(\rho)$ 是平均场势，它与密度相关，而密度可表示为：

$$\rho(\boldsymbol{r},t)=\int f(\boldsymbol{r},\boldsymbol{P},t)d\boldsymbol{P} \tag{2}$$

方程 (1) 恰当地包含了平均场和泡利原理修正的两体碰撞项，是一自洽方程．当方程右边为零时，方程变为 Vlasov 方程，即经典近似下的 TDHF 方程；当取平均场为零时，此时变为 Cascaole 模型．

方程 (1) 中所考虑的平均场，我们选取的仅仅是密度相关的参数势[7]：

$$U(\rho)=A\rho+B\rho^{\sigma} \tag{3}$$

参数 A，B 和 σ 使它能够适合核物质的基态性质：即饱和密度为 0.15—0.17fm^{-3}，基态结合能为— 16MeV/u．通常采用两类参数：

(1) $A=-124$MeV，$B=70.5$MeV，$\sigma=-2$ 称为硬势，它给出的不可压缩系数为 $K=380$MeV；

(2) $A=-386$MeV，$B=303$MeV，

$$\sigma = \frac{7}{6}$$

称为软势，它给出的不可压缩系数为 $K = 200\text{MeV}$.

此两类参数都重现了基态核物质的结合能和饱和密度，它们在低于饱和密度区有类似的形状而只在强压缩区出现差别.

方程(1)的求解采用了试验粒子和网格化方法[8]，在我们的计算中每一真实核子的试验粒子数取为 100，网格大小为 1 fm^3. 试验粒子随时间的演化遵循牛顿力学方程：

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\boldsymbol{r}_i}{dt} &= \frac{\boldsymbol{P}_i}{m}, \\ \frac{d\boldsymbol{P}_i}{dt} &= \nabla \boldsymbol{U}_i. \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

初始时刻，把试验粒子均匀分布于半径参数为 $r_0 = 1.124\text{fm}$ 的球内，动量分布由Woods-Saxon 分布给出，对每一试验粒子的初始坐标和动量的确定可在上述分布下由蒙特卡罗模拟给出.

在每一时间步长，试验粒子之间所发生的弹性和非弹性碰撞也由蒙特卡罗方法模拟，碰撞几率正比于泡利阻塞后的核子-核子碰撞截面. 两个试验粒子之间要发生碰撞必须满足下列条件：

(1) 粒子通过最近点；

(2) 试验粒子之间的最近距离小于 $\sqrt{\pi\sigma_{NN}}$；

(3) 试验粒子碰撞满足泡利原理.

在边长为 1.27fm^{-1} 的动量空间和边长为 1 fm 的坐标空间组成的相空间中，通过对其中心处参加碰撞的粒子数目的计数，可得到占据几率：

$$f(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{P}, t) = \frac{1}{N\Omega}\sum_{i=1}^{N} n_i, \tag{5}$$

其中 $N = 100$ 是模拟的次数，n_i 是此相元中第 i 次模拟时的试验粒子数.

三、计算结果和讨论

在仅考虑平均场的 Vlasov 动力学和包括了平均场和两体碰撞的 BUU 动力学框架下，分别计算了轰击能量为 5、10、20、40、60、100 和 150MeV/u 时，$^{20}\text{Ne} + {}^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统的动力学发展. 本文仅对中心碰撞时的情况做了研究，不同碰撞参数时的动力学情况及不同碰撞系统时的动力学情况将在以后的文章中讨论.

1. Vlasov 动力学

表 1 给出了 $^{20}\text{Ne} + {}^{20}\text{Ne}$ 碰撞系统在不同轰击能量时，求解Vlasov 方程给出的碰撞过程中压缩和膨胀情况，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，其相应的重迭区最大密度随时间的发展由图 1 中的左图给出. 不同能量时在 $x-z$ 反应平面内单粒子密度分布的时间发展由图 2 中"只有平均场"的那一部分给出. 显而易见，在 5 MeV/u和 10MeV/u的低入射能时，重迭区

表 1

E_u(MeV/u)	5	10	20	40	60	100	150
ρ_{max}/ρ_0	1.415	1.574	1.466	1.614	1.647	1.818	1.838
t_1(fm/c)	60	45	40	20	20	20	15
t_2(fm/c)	40	30	25	15	15	10	10
t_3(fm/c)	——	90	65	50	45	35	30
Δt(fm/c)	——	60	40	35	30	25	20

在整个过程中保持存在,这是融合的图象,没有显示膨胀的过程，图1左图中显示的小的涨落是平均场涨落引起的。当入射能量超过 10MeV/u 后，靶炮重迭区变短，20MeV/u

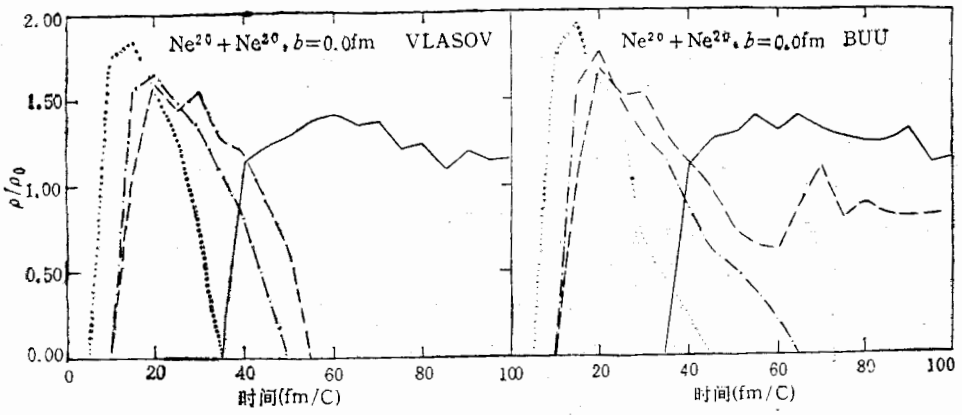

图 1 $^{20}Ne+^{20}Ne$ 碰撞系统在轰击能量为 5、40、60 和 150MeV/u 时在 Vlasov 动力学和 BUU 动力学下重迭区最大密度随时间的发展

——5MeV/u

---40MeV/u

-·-·-60MeV/u

·····150MeV/u

时重迭区持续时间为 40fm/C，150MeV/u 时持续时间仅为 20fm/C。从图2可以看出密度分布在 X-Z 反应平面(对所有 Y 积分)的时间发展规律,例如 $E_L=20$MeV/u 时，碰撞时间在 40fm/C 时弹靶有最大重迭范围,产生高于正常核的密度区域。40fm/C 以后，碰撞核系统发生拉长形变,到 80fm/C 时有颈出现,100fm/c时颈已很明显,到120fm/C 时分成两个碎片,这种结果不符合实验已观察到的现象。

随着轰击能量升高，压缩可达到的最大密度增加(图3)，达到压缩最大密度的碰撞时间变得越来越短，150MeV/u 时,可压缩的最大密度为 $1.84\rho_0(\rho_0=0.168\text{fm}^{-3})$，达到最大压缩密度仅需 15fm/C。而且随轰击能量升高,膨胀发展越快，这与文献[9]的结果是一致的。

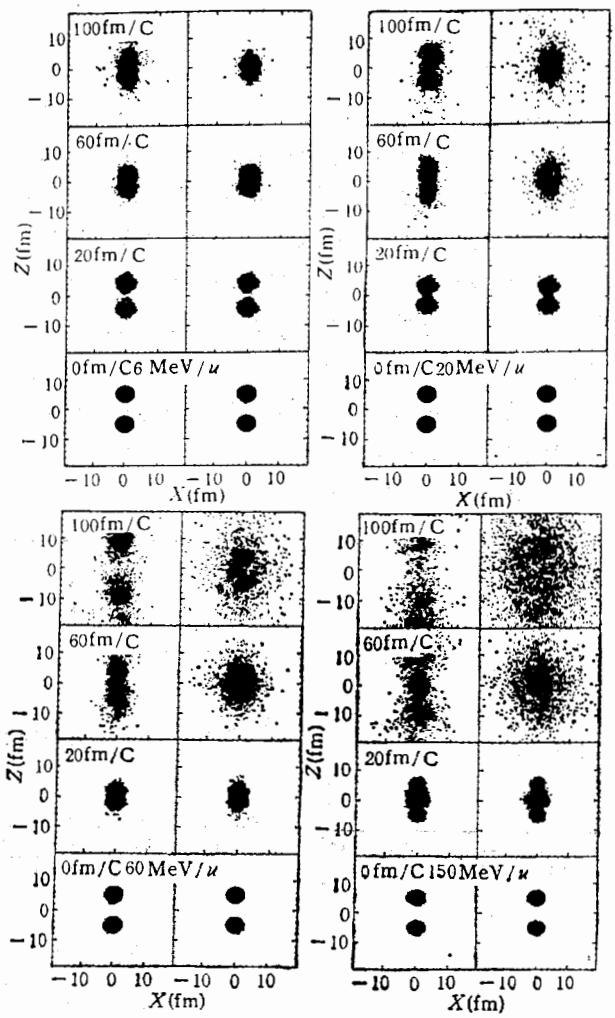

图 2　$^{20}Ne + ^{20}Ne$ 碰撞系统在轰击能量为 5、20、60 和 150MeV/u 时，Vlasov 动力学和 BUU 动力学在 X-Z 平面中密度分布随时间发展示意图

2. BUU 动力学

表 2 列出了 $^{20}Ne + ^{20}Ne$ 碰撞系统在不同轰击能量下，求解 BUU 方程给出的碰撞

表　2

E_u(MeV/u)	5	10	20	40	60	100	150
ρ_{max}/ρ_0	1.390	1.548	1.435	1.680	1.766	1.819	1.918
t_1(fm/C)	55	45	30	20	20	15	15
t_2(fm/C)	40	30	25	15	15	10	10
t_3(fm/C)	——	——	——	——	60	45	40
Δt(fm/C)	——	——	——	——	45	35	30

过程中压缩和膨胀的情况，其中 t_1, t_2, t_3 和 Δt 的物理意义同表 1 一致．同Vlasov 动力学结果相对应，图 1 中右图为重迭区最大密度随时间的发展，图 2 中“平均场＋碰撞”是不同能量时在 X-Z 反应平面内单粒子密度分布的时间发展．从表 2，图 1 右图和图 2 中“平均场＋碰撞”可看出，不同能量时达到最大密度后的动力学过程反映了不同的反应机制．

与 Vlasov 动力学不同（图 1，2），在 5—40MeV/u 能区发现整个碰撞范围内都发生密度重迭，反映了全融合和非全融合过程．由图 1 可看出，5MeV/u 时，重迭区的极大密度一直在极大压缩密度处涨落；而 40MeV/u 时，其重迭区极大密度基本上都小于正常核密度 ρ_0，这是典型的非完全融合．图 1 中 60MeV/u、100MeV/u 和 150MeV/u 有相同的特征，但 60MeV/u 时重迭区持续的时间较长（40fm/C），而 100MeV/u 和 150 MeV/u 时，其持续时间为 25fm/C 和 15fm/C 后，极大密度就下降到 $0.5\rho_0$ 以下，是碎裂的特征．从图 2 右列图看出，60MeV/u 时，仍有非完全融合特征，两个或三个质量大的碎片仍相接在一起，是形状复杂的非完全融合．因此，60MeV/u 时有非完全融合和碎裂的竞争，而 150MeV/u 时是典型的完全碎裂图象．

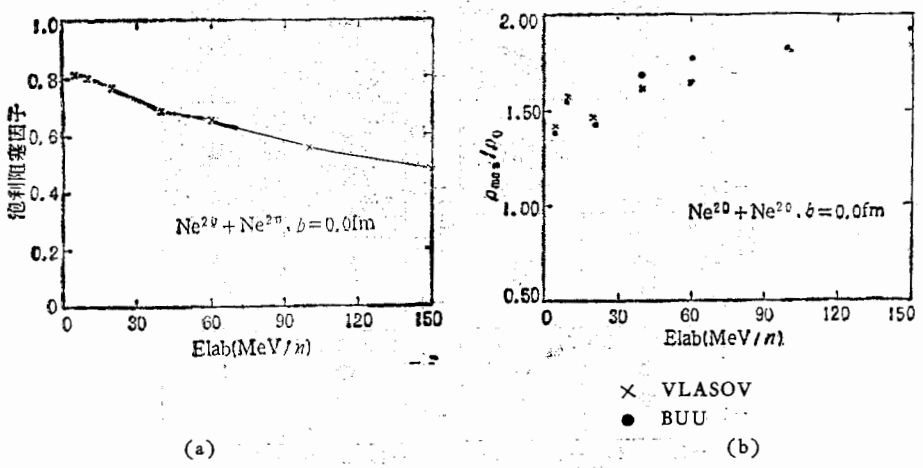

图 3 $^{20}Ne + ^{20}Ne$ 碰撞系统在轰击能量为 5—150MeV/u 范围内（a）泡利阻塞因子；（b）重迭区最大密度随入射能量的变化关系．

3. 两体碰撞和泡利阻塞效应

从 Vlasov 动力学和 BUU 动力学两组计算结果的比较，可以看出考虑两体碰撞项的重要意义：

① 两体碰撞只有在较高轰击能量时对压缩的贡献才会加强． 在我们考虑的能区范围内，压缩主要由平均场引起，但可看到随着轰击能量的升高，两体碰撞对压缩的影响有微弱的增强，图 4 中关于 Cascade 的计算证实了这个图象；

② 两体碰撞在低能时有利于融合，仅有平均场的 Vlasov 动力学只能在低能时给出全融合图象，实验上所观察到大于 10MeV/u 时的非全融合现象只有在考虑两体碰撞后才会出现；

③ 由于两体碰撞，大大加强了非平衡粒子的发射几率；

④ 两体碰撞的结果，使碰撞动力学过程中的弥散效应增强．仅有平均场的 Vlasov 动力学下系统密度分布形状主要是拉长的四极形变，当加入碰撞项后，形状变得很复杂．

泡利阻塞因子的考虑采用了 Bertsch[10] 的方法，我们定义泡利阻塞因子为受阻塞的碰撞数目与参加碰撞数目的比，其随轰击能量的变化由图 3 (a) 给出．从此图看出，即使在 150MeV/u 轰击能量时，仍有近二分之一的碰撞被泡利阻塞效应所阻塞．

四、总　　结

本文以 $^{20}Ne+^{20}Ne$ 碰撞系统为例，分别在 Vlasov 和 BUU 理论框架下研究了能量相关的动力学过程．

10MeV/u 以下的重离子碰撞可近似用 Vlasov 动力学描写，这已被 TDHF 的计算证实．TDHF与Vlasov 结果在此能区的一致性也已被证明[11]．但我们从泡利阻塞因子的计算看出，即使在 10MeV/u 时，还会有约 20% 的碰撞粒子未受泡利原理限制．入射能量大于 10MeV/u 的重离子碰撞采用"平均场＋碰撞"的 BUU 来描写，对中心碰撞会再现由全融合到非全融合一直到完全碎裂的发展图象．对 $^{20}Ne+^{20}Ne$ 碰撞系统，10MeV/u 以下为全融合，10—60MeV/u 粗略为非全融合，60MeV/u 时已强烈存在碎裂和非全融合的竞争，150MeV/u 时是典型的碎裂图象．

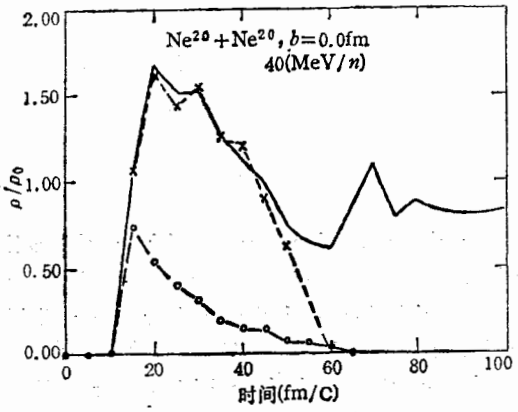

图 4　$^{20}Ne+^{20}Ne$ 碰撞系统在轰击能量为 40MeV/u 时的 Vlasov, Cascade 和 BUU 动力学下重迭区极大密度随时间的发展．

随着轰击能量升高，碰撞系统重迭区密度变大，压缩效应增强．在我们讨论的大部分能区，这种压缩主要来自于平均场影响，两体碰撞对压缩的贡献在高能区域．碰撞系统重迭区域一直保持在整个碰撞过程中，除非平衡粒子发射外，重迭区极大密度在正常核密度附近振荡，此反应机制是融合和非全融合；碰撞系统在很短时间内达到最大压缩，然后迅速膨胀，极大密度会下降到正常核密度以下，低于 $0.5\rho_0$，体积膨胀较大，这是碎裂的特征．而且压缩密度愈大，膨胀愈迅速，碎裂起始时间愈早．

两体碰撞在我们研究的能区是十分重要的，它是影响反应机制的主要因素之一．

参　考　文　献

[1] 葛凌霄，刘建业，王顺金，高能物理与核物理，**13**(1989)，245.
[2] J. Aichelin and G. F. Bertsch, *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 1730.
[3] C. Grégoire et al., *Nucl. Phys.*, **A465**(1987), 317.
[4] E. A. Uehling and G. E. Uhlenbeck, *Phys. Rev.*, **43**(1933), 552.
[5] 葛凌霄，卓益忠，"非相对论BUU方程"，高能物理与核物理，13(1989)，652.
[6] J. Cugon et al., *Nucl. Phys.*, **A352**(1981), 505.
[7] G. F. Bortsch et al., *Phys. Rev.*, **C29**(1984), 673.
[8] 葛凌霄，"中能重离子反应"，核技术，待发表。
[9] Ge Lingxiao, Zeng Xianghua, Liu Jianye and Zeng Baosheng, Proceeding of the International Summer School on Heavy Ion Reaction Theory, Lanzhou, China, 1988. edited by Shen Wenqing, Liu Jingye and Ge Lingxiao, (World Scientific, Singapore, 1989), p. 283.
[10] G. F. Bertsch et al., *Phys. Rep.*, **160**(1988), 189.
[11] H. Tang et al., *Phys. Lett.*, **101B**(1981), 10.

HEAVY ION COLLISION DYNAMICS IN FERMI DOMAIN (I) DYNAMICS DEPENDENCE OF ENERGY

ZHANG FENGSHOU GE LINGXIAO

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

In the case of central collisions, the collision mechanism of complete fusion, incomplete fusion, and fragmentation were systematically studied via the Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck theory which included the nuclear mean field dynamics, two-body collisions, and Pauli blocking between 5 and 150 MeV/u for $^{20}Ne+^{20}Ne$ collision system. How the mean field, Pauli blocking of the two-body collisions were affected by bombarding energy and their effect on the reaction mechanism was discussed.