

25MeV/A²⁰Ne + ²⁰Ne 周边碰撞*

朱全伶 葛凌霄

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

用 QMD 方法, 对 ²⁰Ne (25MeV/A) + ²⁰Ne 系统周边碰撞做了仔细的分析, 讨论了它的特征, 以及深部非弹碰撞与碎裂的共存和竞争, 并探索了中间质量碎片的来源.

在 10MeV/A 以下的重离子碰撞中, 发现了深部非弹碰撞 (DIC) 机制. 它的主要特征是, 各个宏观观测量从非平衡向平衡发展, 且可以用能量耗散作为弛豫的“时钟”; 出射的类弹类靶碎片是以弹靶质量为中心的分布, 分布宽度随能量耗散的增大而变宽. 我们感兴趣的问题是: 在中能区特别是中低能过渡区, DIC 反应是否仍然有低能时的特征? 它的质量分布随时间怎样发展? 它仍然是一个非平衡过程吗?

TDHF 成功地描述了低能区重离子碰撞. 在中能区, 不仅是由平均场, 而且还有两体碰撞和泡利效应在支配着反应动力学过程. TDHF 由于未考虑两体碰撞, 在描述中能区重离子碰撞时遇到了困难. BUU 理论是 ETDHF 的半经典形式, 它为描述中能区重离子碰撞提供了很好的工具. 但目前的 BUU 理论仍然是一体密度矩阵的理论, 在描述集团的形成和碎裂时有一定的局限性. 而量子分子动力学模型 (QMD), 是一个近似地包含了多体关联和涨落的方法, 在这个方法中, 核子由高斯波包来表示, 不是通过平均场, 而是直接通过两体及三体相互作用来计算核子之间的相互作用势; 碰撞过程采用一个事件一个事件的模拟, 而不是一个事件上百次模拟的系综平均. 其模型的表示见文献 [1, 2].

本文在非相对论 QMD 框架下来研究 25MeV/A²⁰Ne + ²⁰Ne 的碰撞. 如果把 QMD 模型推广到较低能区, 采用 Skyrme 类型的相互作用是合理的, 这已被微观光学势的计算所证明^[3]. 这样做的主要困难在于基态传播时的稳定性. 为了寻找适当的方法, 我们研究了基态传播时的稳定性^[2], 结果发现: 初始条件的多次模拟挑选可以使基态核传播时的方均根半径在 800fm/c 内保持稳定; 密度分布和结合能的计算也说明, 在要求的时间范围内, 核的基态形状、密度的微小变化可以达到稳定性的要求.

* 国家自然科学基金资助.

本文 1992 年 1 月 10 日收到.

二

为了考虑在动力学碰撞过程中质量分布随时间的演化,我们采用与文献[2]同样定义集团的方法,这里仅限制了在坐标空间内两高斯波包中心位置 r_i 和 r_j 的联系,如果它们满足

$$|r_i - r_j| < D, \quad (1)$$

就认为它们属于同一集团. D 是一个关键的参数,它意味着,在集团内核子之间的平均距离应该与碎片的区域密度有关. 本文取 $D=3\text{fm}$. 各种试验说明, D 取 3fm , 4fm 和 5fm 对集团的识别并不十分灵敏.

一旦集团 i 判定,它的质量 m_i , 动量 p_i 等就可确定,各种集团的总集体动能为

$$E_{\text{coll}} = \sum_i \frac{P_i^2}{2m_i}, \quad (2)$$

总能量为

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{coll}} + E_{\text{int}}, \quad (3)$$

其中 E_{int} 是系统的内能.

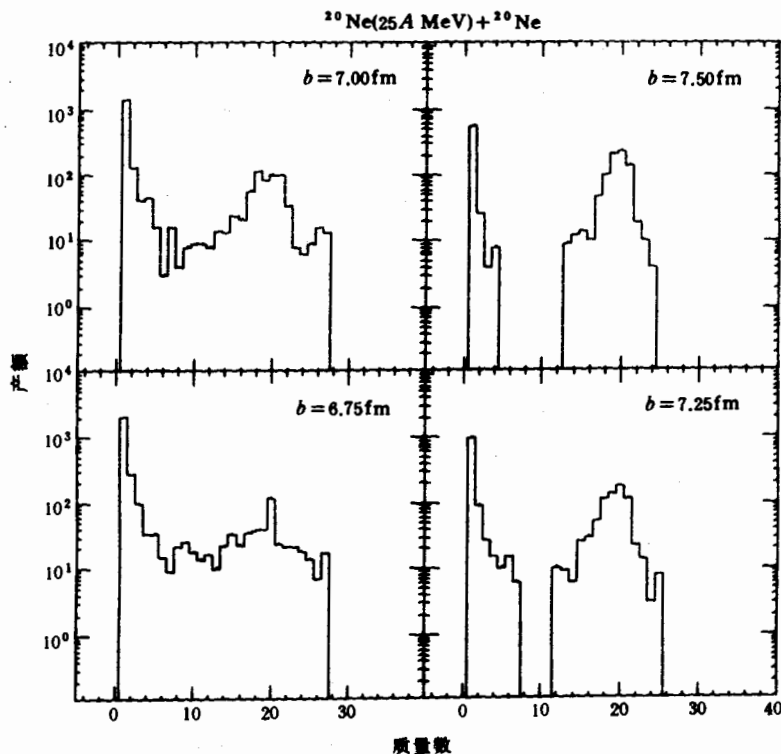


图1 $^{20}\text{Ne}(25\text{MeV}/A) + ^{20}\text{Ne}$, 4个不同碰撞参数的质量分布

三

图1是 $^{20}\text{Ne}(25\text{MeV}/A)+^{20}\text{Ne}$ 对称系统周边碰撞($b=6.75-7.50\text{fm}$)时的质量分布,它是 $0-200\text{fm}/c$ 内的计算结果.我们知道,DIC质量分布是峰值围绕弹靶质量的一个分布,由于弹靶之间的质量交换,碎片分布完全不同于参加者-旁观者(P-S)模型给出的结果,大于弹靶质量的碎片将会出现,质量分布可近似用高斯分布来描述,其平均值 $\langle A \rangle \approx A_p$ 或 A_t ,其分布宽度随能量耗散的增大而加宽.在 $25\text{MeV}/A$ 的 $^{20}\text{Ne}+^{20}\text{Ne}$ 碰撞中,这个特征基本上再现出来,在碰撞参数较大($b=7.25, 7.50\text{fm}$)时显示得更清楚.而对于 $b=6.75\text{fm}$,我们仅看到在弹靶质量附近成峰的趋向.各个碰撞参数的质量分布宽度(半极大处全宽度 FWHM)列在表1中.它与低能重离子碰撞的不同之处在于:

表1 4个碰撞参数下的 FWHM 值

碰撞参数 $b(\text{fm})$	6.75	7.00	7.25	7.50
FWHM σ^2	18	16	14	12

第一、出现中间质量碎片(IMF)($A=5-10$).碰撞参数愈小,IMF产额愈大.第二、前平衡发射轻粒子产额变大.这两点在反应平面内密度分布随时间的演化图中同样表现出来(图2).在低能重离子碰撞中发现的弹靶接触后相互转动的图象也可在图2看到,当碰撞参数小时,转动角度变大.

IMF的出现及其随碰撞参数的变化,使得中能区重离子碰撞周边反应机制变得相对复杂,IMF起源于哪里?这是目前最有意义的研究课题之一.直观地讲,IMF来源于两个方面:一是碎裂产生,它是由动力学平均场的涨落造成的;二是跟随弹靶的蒸发、裂变等衰变.图3为 $^{20}\text{Ne}(25\text{MeV}/A)+^{20}\text{Ne}$ 周边碰撞时几个碰撞参数的质量分布随时间演化图,这里计算的是大碰撞参数的情况,可以看出不同碰撞参数有不同的时间发展.当 $b=7.25$ 及 7.50fm 时,反应机制比较清楚, $t=120\text{fm}/c$,弹靶基本分离(图2),占优势的是DIC反应过程和碰撞过程中粒子发射,当时间发展至 $200\text{fm}/c$ 时并无明显变化.而对于 $b=6.75\text{fm}$,当 $t=120\text{fm}/c$ 时,重碎片($A>30$)来源于非完全融合(ICF), $A\sim 20$ 是DIC分量,IMF来源于碎裂,它是由动力学过程造成的,当时间发展至 $200\text{fm}/c$ 时, $A>30$ 的重碎片消失,由于蒸发,会有小部分IMF产生.对于 $b=7.00\text{fm}$,少量中间质量碎片主要来源于动力学过程.因而,不同反应机制的共存造成分析的困难,已不能像低能时一样,可以用简单两体问题来处理.

内能随时间的发展可从图4看出.我们的计算发现,在周边碰撞时,仍然有压缩存在,当然,它随碰撞参数增加而减小,这是很奇怪的,因为大碰撞参数弹靶重叠较小,压缩的产生使人生疑.但从对几百 MeV/A 重离子碰撞动量流的观测和计算来看^[4],似乎存在着压缩.在 $t>120\text{fm}/c$ 时,内能趋于一个稳定值,随着碰撞参数的增大,内能减小,当 $b=6.75, 7.00, 7.25$ 和 7.50fm 时,内能分别为 $-160.54, -178.62, -196.18$ 和 -214.70MeV .

对于 $25\text{MeV}/A$ 的 $^{20}\text{Ne}+^{20}\text{Ne}$ 碰撞,DIC分量随碰撞参数的变化仍然可以看出是一个弛豫过程.从质量分布的宽度和相互作用时间(图2和图4)来观察,小碰撞参数的双

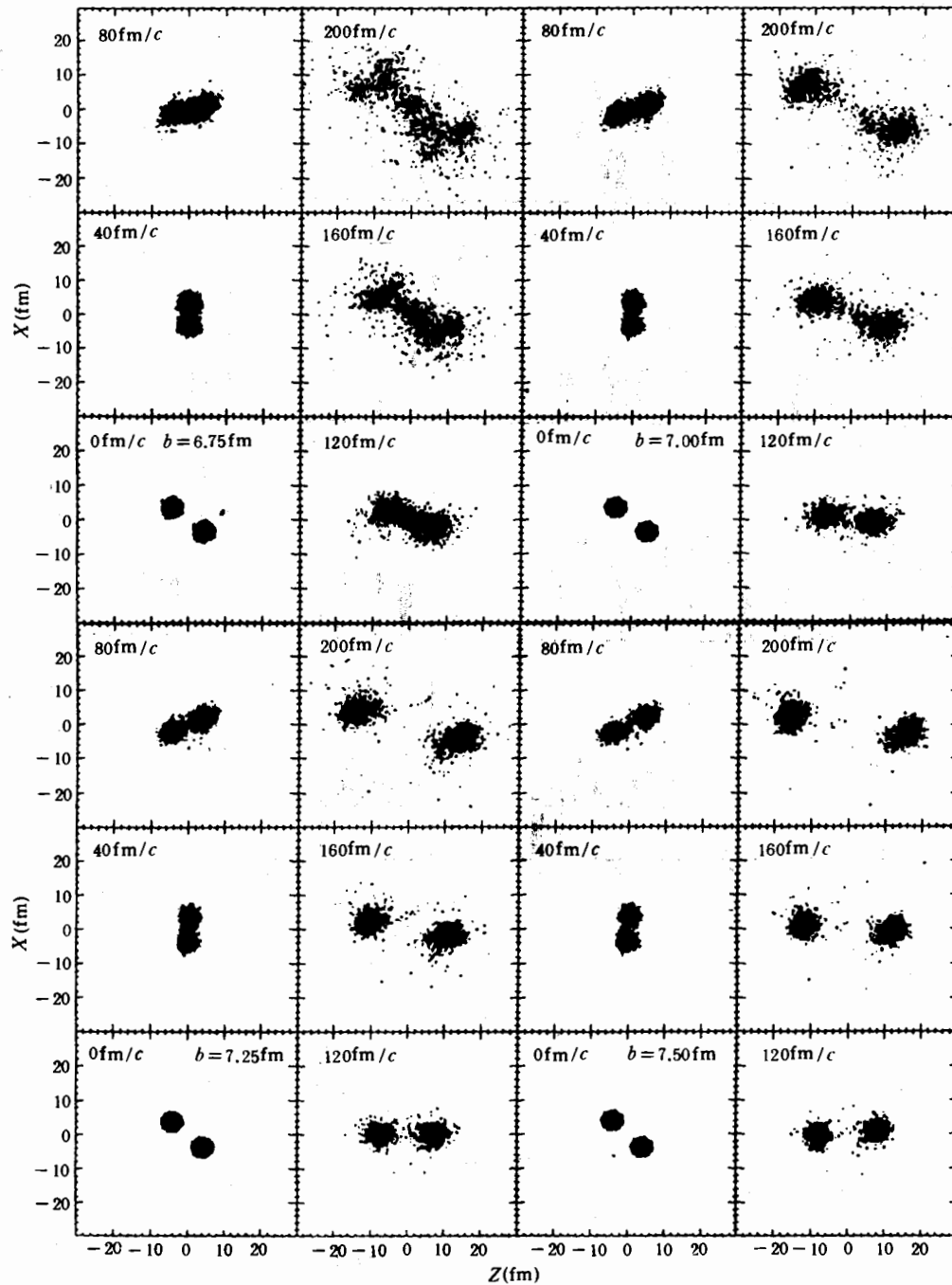


图2 4个碰撞参数的密度分布随时间演化图

核系统有较长的寿命. 这里我们还计算了动量的四极矩和发射中子的平均能量 $\langle E_n \rangle$ 随时间的演化, 四极矩定义为

$$Q_{33} = \int (2p_x^2 - p_y^2 - p_z^2) f(\mathbf{r}, \mathbf{P}, t) d\mathbf{r} d\mathbf{P}, \quad (4)$$

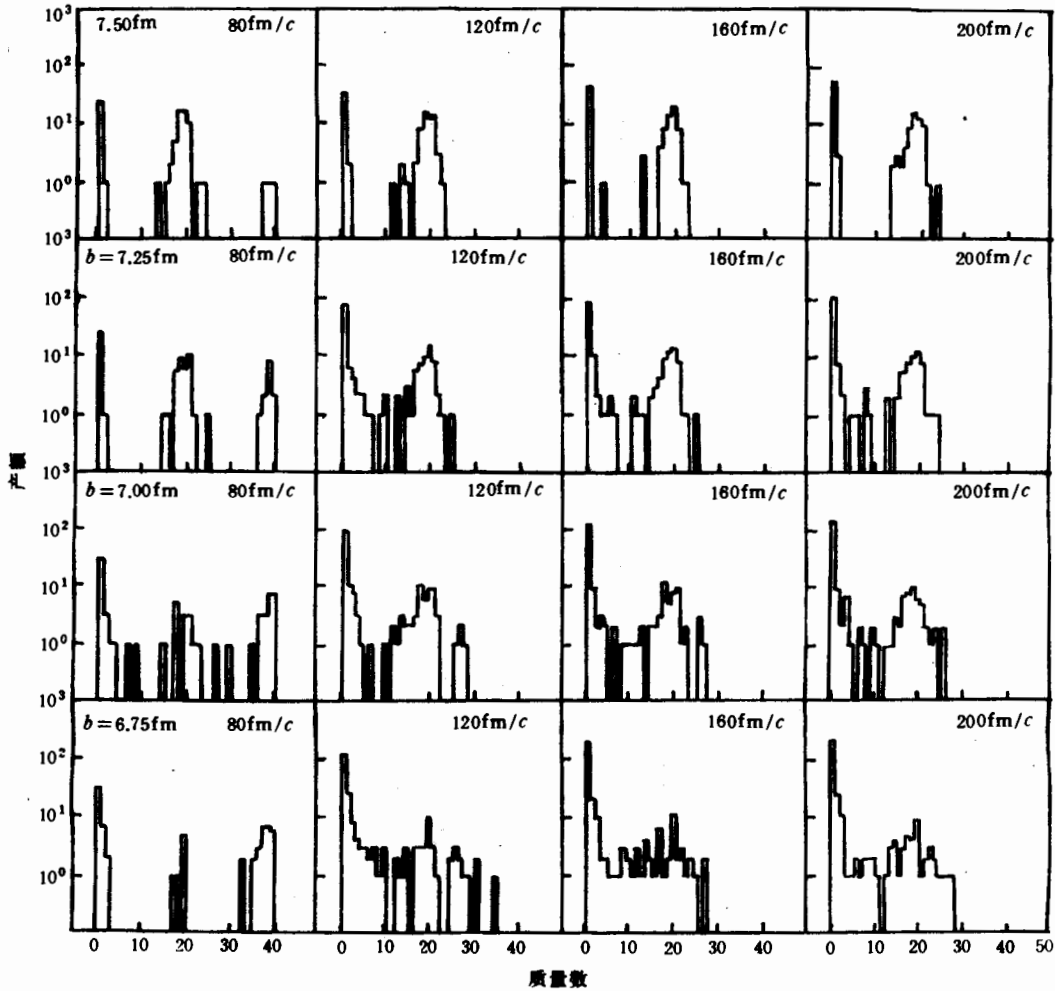


图3 周边碰撞时,4个碰撞参数的质量分布随时间的发展

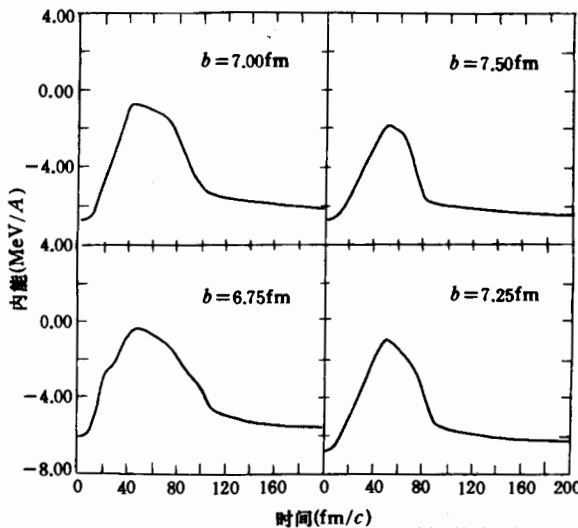


图4 四个碰撞参数下的内能随时间的发展

以便粗略地判断周边碰撞是达到平衡还是非平衡。从图5可以看到, $b > 7\text{fm}$, $Q_{33} \neq 0$, 这标志着系统不可能达到各向同性的动量分布; 而 $b \approx 6.75\text{fm}$, $Q_{33} \approx 0$, 这可能说明有达到平衡的趋向。我们知道, 达到平衡后的中子发射是各向同性的统计发射, $\langle E_n \rangle \approx 2T$ (T 是温度), 而非平衡中子发射主要来源于较高能量的中子发射。 $\langle E_n \rangle$ 随时间的演化, 似乎显示了这种趋势(图6)。除 $b = 6.75\text{fm}$ 略趋向于平衡外, 其余都显得杂乱无章。但对于中心碰撞就比较清楚。平衡的判断和平衡时间的确定, 应该由较多的判

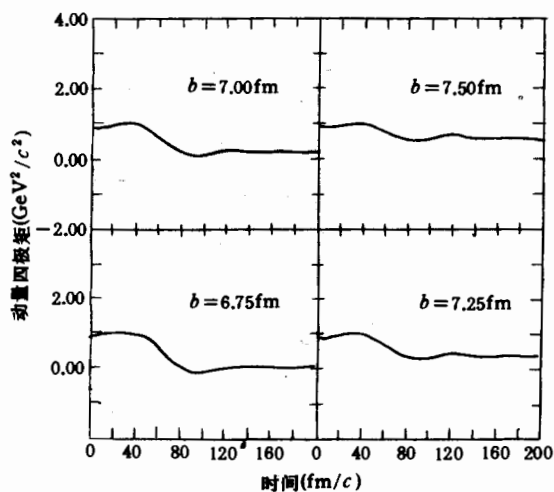


图 5 动量四极矩随时间的演化

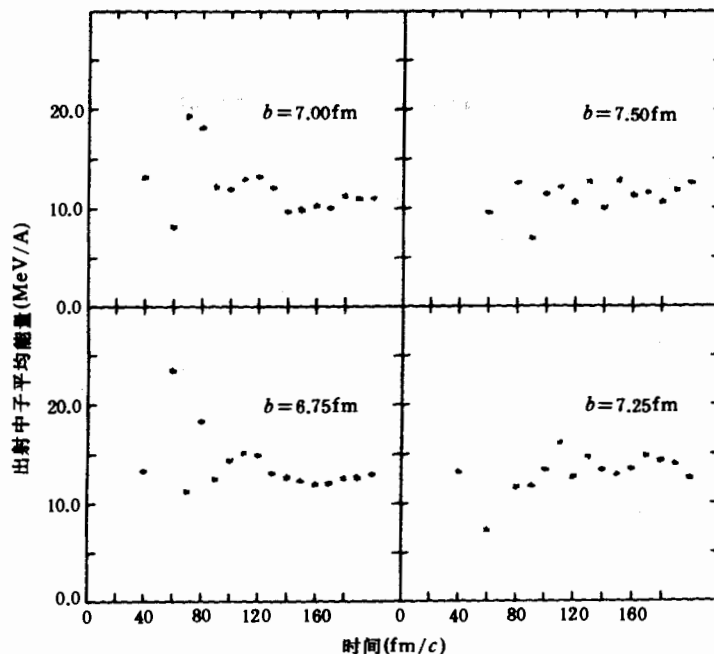


图 6 出射中子的平均能量随时间的发展

据来确定,我们将在其它文章中讨论.

四

我们把 QMD 方法应用到较低能量区,着重讨论 $^{20}\text{Ne}(25\text{MeV}/A) + ^{20}\text{Ne}$ 周边碰撞的特征,计算表明:

(1) DIC 机制仍然存在,同低能 DIC 相比,在质量分布、旋转效应等方面,有相似的特

征,但不同处在于中间质量碎片发射的加强和轻粒子发射数目的增多.碰撞参数 $b < 7\text{fm}$,存在着不同反应机制的共存和竞争,特别是碎裂机制.

(2)从质量分布随时间的发展发现,IMF 主要来源于动力学过程中平均场涨落所造成的不稳定性,弹靶分开后的蒸发也会有少量贡献.

(3)由粗糙估计可以看出,DIC 过程仍是一个趋向于平衡的过程,与低能区相比,中间能量区的重离子周边碰撞明显复杂,这将给实验观测和理论处理带来困难,一些单举测量已不能胜任.本文希望能为关联测量提供一种依据.

参 考 文 献

- [1] J. Achelin, *Phys. Rep.*, 202(1991), 1.
- [2] 朱全伶,葛凌霄,李祝霞,高能物理与核物理, 16(1992), 658; Li Zhuxia et al., *Phys. Rev.*, C44(1991), 824.
- [3] Zhuo Yizhong, Shen Qingbiao and Tian Ye, *Physics*, 1(1985), 231.
- [4] Ge Lingxiao et al., International Symposium on Heavy Ion Physics and Its Application, ed. by Shen et al., p505(1991), World Scientific (singapore).

Peripheral Collisions of $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ at 25 MeV/A

ZHU QUANLING GE LINGXIAO

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

ABSTRACT

Peripheral collisions for $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ system at 25 MeV/A were analysed in detail by QMD method. Its characteristics, as well as the coexistence and competition of deep inelastic collision and fragmentation were discussed. The sources of intermediate mass fragments were also explored.