

中能重离子碰撞动力学研究*

刘建业 张劭光

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1993-10-04 收稿

摘 要

利用改进的量子分子动力学模型(MQMD),通过研究能够标识中能重离子碰撞动力学过程的物理量:横动量、碰撞数、核物质密度及热化的时间演化过程,了解中能重离子碰撞系统的碰撞动力学和多重碎裂机制;同时对控制和影响这种碰撞动力学的各种动力学因素:状态方程、动量相关势和介质效应进行了分析和探讨。

关键词 碰撞动力学,多重碎裂,状态方程,动量相关相互作用,介质效应。

1 引 言

文献[1]对当前中能重离子碰撞中的热点课题,多重碎裂过程及影响多重碎裂过程的动力学因素,进行了分析和探讨,但由于文章篇幅的限制,仅对与多重碎裂本身有关的问题进行了初步研究。为了较全面而深入地了解中能重离子碰撞动力学,包括多重碎裂机制的动力学过程,继续用改进的量子分子动力学计算和分析了能够标识中能重离子碰撞动力学的有关物理量:横动量、碰撞数、核物质密度及热化的时间演化过程,同时对控制和影响这种碰撞动力学的各种动力学因素:状态方程、动量相关势和介质效应的性质与作用特征进行了对比和分析,从而有了进一步的了解,并提出了有待深入研究的问题。

2 模型和蒙特卡罗数值模拟计算中的有关问题

关于改进的量子分子动力学(MQMD)的详细情况见文献[1-3],这里仅就这个模型的主要物理思想作一简要介绍。两个碰撞原子核中每一个核子用动量空间和坐标空间的高斯波包描述,而碰撞系统的总分布函数是对全部核子波包的求和:

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

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}) = \sum_i f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}). \quad (2)$$

* 国家自然科学基金委,国家基础项目和中国科学院自然科学基金资助。

高斯型波包的中心即核子的平均位置和平均动量在平均场的作用下按照 Hamilton 方程进行传播,即:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{r}}_i &= -\{\mathbf{r}_i, H\}, \\ \dot{\mathbf{p}}_i &= \{\mathbf{p}_i, H\},\end{aligned}\quad (3)$$

其中

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m} + V^{\text{loc}} + V^{\text{Yuk}} + V^{\text{Coul}} + V^{\text{momen}}. \quad (4)$$

其中 V^{loc} 为短程的两体和三体 Skyrme 相互作用, V^{Yuk} 是为了描述原子核表面效应而引入的 Yukawa 相互作用, V^{Coul} 为库仑势, V^{momen} 是由于考虑相互作用的非局域性而引入的动量相关相互作用。

通过计算原子核的基态性质: 原子核结合能, 核物质密度和均方半径以确定有效相互作用的两组参数: 软方程和硬方程, 它们分别相应于两种不同的核物质压缩系数 $K = 240\text{MeV}$ 和 $K = 380\text{MeV}$ 。

在考虑核子两体碰撞时, 对于核子终态的泡里阻塞通过相空间的两个核子与其他所有核子的重叠来确定。在两体碰撞的计算中采用了 Cugnon 参数化的自由核子-核子碰撞截面^[4], 同时选用 Bertch 等人从核物质理论计算得到的介质中核子-核子非弹性截面^[5]及 Ter Haar 等人计算得到的介质中核子-核子弹性截面^[6]的结果。对于核子-核子碰撞截面进行综合分析, 可以得知在入射能量小于每核子 800MeV 以下的能区, 介质中核子-核子总截面小于自由核子-核子总截面, 随着入射能量的增加, 总的趋势是核子-核子弹性截面减少, 而非弹性截面增加, 考虑到这两种因素的交织作用, 随入射能量的增加, 介质中总截面接近甚至超过自由总截面, 特别是介质中非弹性截面越来越重要。

由于 QMD 在描述集团形成过程中可能产生一些非物理的线状核, 故我们采用 Ngo 等人提出重构模型与量子分子动力学耦合以消除非物理的线状核, 该模型详细情况见文献[3]。

我们除计算核子平均横动量 $\langle p_x/A \rangle$, 靶核中心密度 ρ/ρ_0 和碰撞数外, 还计算了核物质热化:

$$R = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_i |p_{\perp}(i)|}{\sum_i |p_{\parallel}(i)|}, \quad (5)$$

以上公式中的 p_{\perp}, p_{\parallel} 分别是核子动量的横向分量和纵向分量。

3 结果与讨论

为了比较和分析各种动力学因素对重离子碰撞动力学及多重碎裂的作用特征和性质, 就以下四种情况对反应 $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$, 入射能量 $\frac{E_1}{A} = 200, 400, 800\text{MeV}$ 和碰撞参数 $b = 3.0\text{fm}$ 的各种物理量进行计算和分析。四种情况下的符号表示为:

S: 软方程和自由核子-核子碰撞, H: 硬方程和自由核子-核子碰撞,
SI: 软方程和介质中核子-核子碰撞, SM: 软方程和动量相关作用。

3.1 状态方程对重离子碰撞中的热化和多重碎裂过程不灵敏, 但对其他动力学量的作用明显

从图 1—图 4 中各物理量的时间演化过程可以看出, 硬方程 (H) 与软方程 (S) 比较, 由于势变浅而增加了排斥作用, 不易压缩, 从而使碰撞数和核物质密度明显减少, 但却使核子横动量显著增大。因为横动量的大小与核物质被压缩的程度直接有关, 而在相同核物质密度条件下, 硬方程的压力比软方程的压力要大^[7], 故与软方程相比, 硬方程增大了横动量转移分量。

从图 4 核物质热化的时间演化过程可以看出, 除 200MeV 情况有些影响外, 总的情况是两种状态方程对热化过程的影响差别不明显, 即预示着状态方程对于碰撞过程中核子之间的能量交换和激发过程不敏感, 结果就导致状态方程对多重碎裂过程不敏感。文

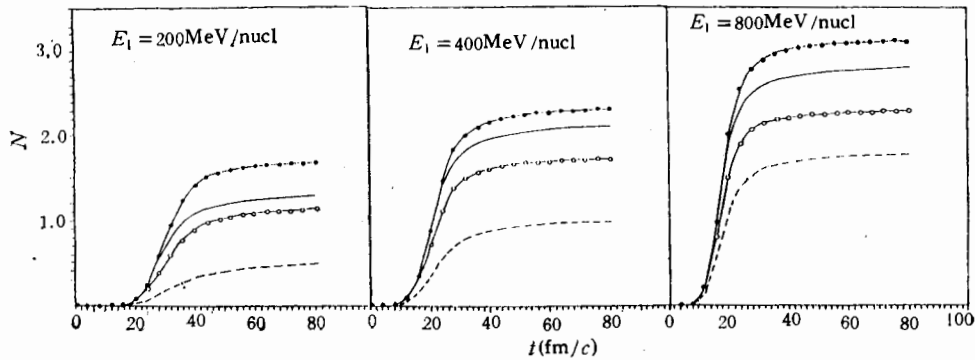


图 1 反应 $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$ 在 $\frac{E_1}{A} = 200, 400, 800 \text{ MeV}$, $b = 3 \text{ fm}$ 时碰撞数的
时间演化过程
—H,S, ----SI, oooooSM.

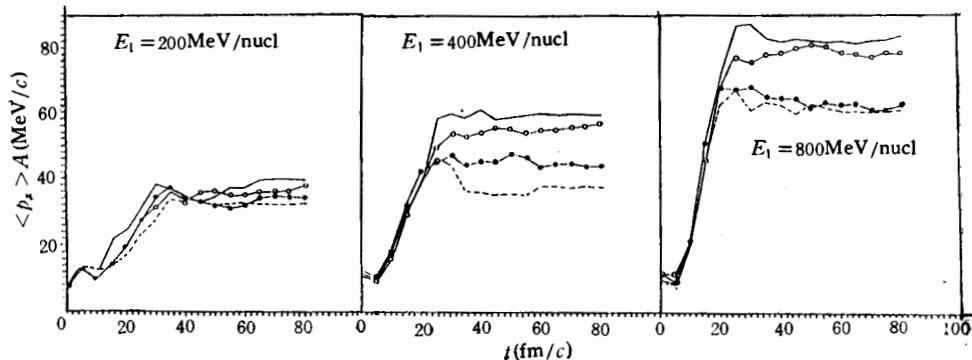


图 2 与图 1 相同条件下核子平均横动量的时间演化过程
—H,S, ----SI, oooooSM.

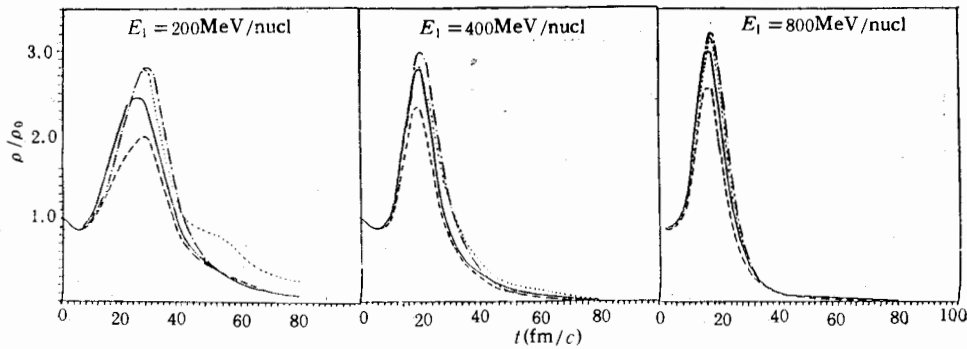


图3 与图1相同条件下的靶核中心密度的时间演化过程
—H, - - -S,SI, - · - · -SM.

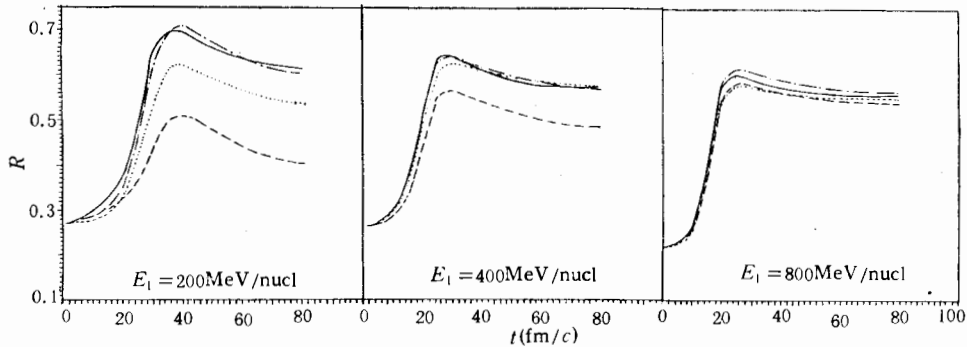


图4 与图1相同条件下核物质热化的演化过程
—H - - -S - - -SISM

献[1]中多重碎裂产额分布正好表明了这一结论。

3.2 动量相关的相互作用对重离子碰撞动力学和多重碎裂过程均有重要影响

从图1—图4各物理量的时间演化过程可以看到,动量相关作用的软方程(SM)与软方程(S)相比较,碰撞数和核物质密度明显减小,核子横动量显著增大,其原因在于:一方面动量相关作用由于增加了核子之间的排斥作用,从而导致碰撞数和核物质密度明显减小,但另一方面,动量相关相互作用由于减小了核子的有效质量 $m^*/m = 0.6-0.7$,故在确定动量条件下,使核子具有比情况(S)更高的速度运动,从而增加了核子动量的横向转移分量,因而与情况(S)相比,增加了核子横动量(参看图2),而且随着入射能量的增加,情况(SM)引起的横动量的增量在继续增加。

同样由于情况(SM)促使核子以更高的速度运动,这就加速了核子之间能量的交换和激发过程,故与情况(S)比较使碰撞系统储存更多的激发能,从而导致碰撞系统易于碎裂,这就解释了情况(SM)多重碎片产额分布比情况(S)窄的原因。

3.3 状态方程与动量相关作用两种影响的差异和互补性

天体物理中,为了解释中子星的性质,似乎核物质倾向于软方程,但在中能重离子碰撞中为了解释横动量的实验结果,需要硬方程,从图 2 可以看出情况 (SM) 的横动量与情况 (H) 的结果相接近,这样考虑动量相关作用后的软方程同时可以解释天体物理中中子星的性质和中能重离子碰撞中的横动量,尽管情况 (SM) 的压缩系数($K = 200\text{MeV}$)比情况 (H) 的压缩系数($K = 380\text{MeV}$)小,但动量相关作用所增加的横动量转移大体上弥补了由于 K 的减少而造成的横动量压低,故就产生横动量而言,考虑动量相关作用的软方程 (SM) 与 (H) 近乎等价。然而就其对多重碎裂的影响而言,两种情况则截然不同,如上所述,状态方程对多重碎裂过程是不敏感的,而 (SM) 更有利于碰撞系统发生碎裂。为什么状态方程对横动量、碰撞数和核物质密度作用很明显而对多重碎裂不敏感?为什么 (SM) 和 (H) 几乎产生大体相同的横动量,其物理机制尚需仔细研究。

3.4 介质中核子-核子碰撞截面对重离子碰撞动力学和多重碎裂机制的重要作用

图 1—图 4 表明,在 $\frac{E_1}{A} = 200, 400\text{MeV}$ 能区,介质效应均使碰撞数、核物质密度、横动量和热化减小,这主要是因为在此能区,介质中核子-核子碰撞截面小于自由核子-核子碰撞截面,且弹性截面占据主导地位,从而具有较小热化,也就是具有较小激发能,故情况 (SI) 与 (S) 相比,减弱了碰撞系统的多重碎裂过程,这正是文献[1]得到的结果。

随着入射能量的增加,各种物理量的数值都在增加,但两种情况 (SI) 和 (S) 的结果相对比较,碰撞数和核物质密度仍有明显差别,热化和横动量在两种情况下的数值在逐渐逼近。这主要是由于介质中非弹性碰撞过程在增加,从而加速了碰撞中核子之间能量交换和动量转移过程,尽管情况 (SI) 的碰撞数和核物质密度仍然明显小于情况 (S) 的结果,但对于横动量和热化产生而言,两种情况下的效果接近,从而导致多重碎裂情况相互接近的结果。

4 小 结

动量相关作用和介质效应对于中能重离子碰撞动力学和多重碎裂过程的作用是重要的,但其作用特征明显不同。介质效应在较低能区 (200MeV 和 400MeV), 由于碰撞截面的减小,从而导致碰撞数、核物质密度、热化和横动量的减小,势必减弱碰撞系统的多重碎裂过程,随着入射能量的增加,介质中非弹性碰撞过程增加并逐渐占据重要地位,故与自由核子-核子碰撞比较,尽管碰撞数和核物质密度仍有明显差别,但横动量和热化逐步接近并导致碎裂过程相似。动量相关作用由于增加了排斥作用从而使碰撞数和核物质密度减小,但由于同时增加碰撞核子之间的能量交换和动量转移过程,故增大了横动量和碰撞系统的多重碎裂过程。

状态方程对于中能重离子碰撞动力学的作用是明显的,如有 $N(S) > N(H)$, $\rho/\rho_0(S) > \rho/\rho_0(H)$ 和 $\langle p_x/A \rangle(S) < \langle p_x/A \rangle(H)$, 但对碰撞系统的热化和多重碎裂过程的作用不

敏感,两种情况下的结果相近。

考虑动量相关作用后的软方程能同时满足天体物理和中能重离子碰撞动力学过程的要求。对于产生横动量而言,情况(SM)与(H)的效果似乎等价;但对于多重碎裂过程而言,动量相关作用的影响重要,而状态方程的作用不够明显。

为什么状态方程对于多重碎裂动力学过程不敏感?情况(SM)与(H)产生的横动量近乎相当的具体物理机制,以及介质中核子-核子碰撞截面随能量的变化规律等,均需通过在理论与实验的结合上作深入细致的研究。本文没有区分中子与质子,也没有考虑对称势的作用,加之计算机CPU时间的限制,故在这两篇文章中只是先作些定性的研究和探讨,没有与实验进行比较,这类工作正在进行中。

参 考 文 献

- [1] 张劲光、刘建业,重离子碰撞中的多重碎裂研究,高能物理与核物理,18(增刊)(1994)64.
- [2] J. Aichelin, G. Peilert, A. Rosenhauer, H. Stocker, W. Greiner, *Phys. Rev.*, **C37** (1988) 2451.
- [3] C. NGO, H. NGO, S. Leray, M. E. Spina, *Nucl. Phys.*, **A499**(1989) 148.
- [4] J. Cugnon, T. Tizutani, J. Vandermeulen, *Nucl. Phys.*, **A352**(1981) 505.
- [5] G. Bertsch, G. E. Brown, V. Koch, Bao-an Li, *Nucl. Phys.*, **A490** (1988) 745.
- [6] B. Ter Haar, R. Malfliet, *Phys. Rev.*, **C36**(1987) 1611.
- [7] C. Gale, G. M. Welke, M. Prakash, S. J. Lee, S. Das Gupta, *Phys. Rev.*, **C41**(1990) 1545.

Dynamical Study on Processes of Intermediate-Energy Heavy Ion Collisions

Liu Jianye Zhang Shaoguang

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

Received 4 October 1993

Abstract

Using the modified QMD (MQMD), the intermediate-energy heavy ion collision dynamics and the multifragmentation mechanism are investigated. The dynamical ingredients governing the multifragmentation process and collision dynamics in heavy ion collisions are discussed.

Key words collision dynamics, multifragmentation, equation of state, momentum dependent interaction, medium effect.