

用改进的量子分子动力学研究中能 重离子碰撞中多重碎裂

刘 航 刘建业 张绍光 李君清

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1994-11-10 收稿

摘 要

本文利用改进的量子分子动力学模型(MQMD)研究中能重离子碰撞中的多重碎裂过程. 在MQMD的基础上通过模拟计算发现: MQMD由于考虑了动量相关势和 Pauli 势, 极大地改善了多重碎裂产额的计算结果与实验数据的比较. 同时研究了二者对碰撞动力学的不同影响. 最后, 讨论了理论计算与实验结果仍有矛盾的原因, 并提出了进一步改进的方案.

关键词 多重碎裂产额, 费米子行为, 动量相关势, Pauli 势.

1 引 言

多重碎裂过程是中能重离子碰撞的重要反应机制, 在有关的动力学模型中, 量子分子动力学(QMD)由于明显地包含系统的多体效应, 因而能够自然地描述碰撞过程中的涨落及多重碎裂过程. 但QMD对多重碎裂过程的定量描述是不能令人满意的. 尽管包含了若干重要的量子效应, 但未能正确地描述核子运动的费米子行为, 因为系统的分布函数仅是核子波包之和而不是波函数的反对称化. Wilet^[3,6,7]等证明: 可以引入 Pauli 势来改进对核子费米子行为的描述, 从而提供了一个很好的模型来描述亚饱和核物质中的碎块形成过程. 因此, 我们在QMD的哈密顿量中引入 Pauli 势. 如同以前我们所做的工作^[4], 将QMD与重构模型(RAM)耦合起来, 得到一个近似但合理的模型来描述碎块形成过程. 同时, 我们区分质子, 中子并分别模拟, 引入对称势. 由此, 我们得到了新的改进的QMD, 仍称之为MQMD. 在新的MQMD的基础上, 研究了重离子碰撞过程中的碰撞动力学和多重碎裂过程中的产额分布. 最后, 讨论了理论计算与实验结果仍有矛盾的原因, 并探讨了进一步改进的方案.

2 改进的量子分子动力学(MQMD)

2.1 量子分子动力学(QMD)

在QMD中, 核子由 Gaussian 波包表示. 系统的分布函数为 Gaussian 波包之和:

$$f(\vec{r}, \vec{p}, t) = \sum_{i=1}^n f_i(\vec{r}, \vec{p}, t), \quad (1)$$

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

其中 \vec{r}_i, \vec{p}_i 为第 i 个核子的坐标, 动量. \vec{r}_i, \vec{p}_i 的时间演化由 Hamilton 方程描述:

$$\dot{\vec{r}}_i = -\{\vec{p}_i, H\}, \quad \dot{\vec{p}}_i = \{\vec{r}_i, H\}, \quad (3)$$

其中哈密顿量 H 包括总动能和相互作用两部分. 相互作用包括: Skyrem 势, Coulomb 势, 以及长程的 Yukawa 势^[2]. Skyrem 型的二体和三体相互作用由下述局域密度相关势得到:

$$U^{\text{loc}} = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (4)$$

(4) 中参数由表 1 给出.

表 1 方程 (4) 对应软势、硬势条件时的参数

α	β	γ	K	EOS
-124MeV	70.5MeV	2	380MeV	H
-356MeV	303MeV	7/6	200MeV	S

除了上述所考虑的相互作用, 我们特别注意了导致附加排斥作用的动量相关势 (MDI):

$$V^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\vec{p}_1 - \vec{p}_2)^2 + 1] \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2), \quad (5)$$

其中 $t_4 = 1.57 \text{MeV}$, $t_5 = 5 \times 10^{-4} \text{MeV}^{-2}$. 为了符合基态性质, (4) 中参数应该重新调节, 如表 2 所示.

表 2 加动量相关势后方程 (4) 对应软势、硬势条件时的参数

α	β	γ	K	EOS
-390.1MeV	320.3MeV	1.14	200MeV	SM
-129.2MeV	59.4MeV	2.09	380MeV	HM

2.2 改进的量子分子动力学 (MQMD)

2.2.1 重构模型 (RAM)

为避免非物理的线状核, 我们将 QMD 与 RAM 耦合起来, 得到了一个近似但合理的模型来描述碎片形成过程. 详细内容参看文献 [5].

2.2.2 中子, 质子区分

为了研究碰撞过程中的同位旋效应, 我们区分中子、质子并分别模拟, 引入对称势:

$$V^{\text{sys}} = V_{0s} \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_z, \quad \tau_z = \begin{cases} +1 & \text{中子,} \\ -1 & \text{质子.} \end{cases} \quad (6)$$

这里 ρ_n, ρ_p 分别为中子, 质子密度.

2.2.3 Pauli 势

由 Dorso 等人给出的参数化的 Pauli 势如下^[6,7]:

$$V^{\text{Pauli}} = V_p \left(\frac{\hbar}{p_0 q_0} \right)^3 \exp \left\{ - \frac{(\vec{r}_i - \vec{r}_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(\vec{p}_i - \vec{p}_j)^2}{2p_0^2} \right\} \delta_{\tau_i \tau_j}, \quad (7)$$

其中 \vec{r} , \vec{p} , τ 为核子的坐标, 动量和同位旋. 可以证明: Pauli 势可以在半经典框架下反映费米气体的行为. 因此, Pauli 势提供了一个很好的模型以描述亚饱和核物质中的碎块形成过程.

在实际计算中, 我们要知道 Pauli 势中的三个参数: V_p , q_0 , p_0 . 这些参数应当正确地反映核的性质. 这里我们由 Pauli 原理, 结合核的基态性质, 粗略地估计一下上述参数. Pauli 原理要求: $\langle p_{ij}^2 \rangle \langle r_{ij}^2 \rangle \geq \zeta \hbar^2$. 其中:

$$\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j, \quad \vec{p}_{ij} = \frac{1}{2} (\vec{p}_i - \vec{p}_j).$$

为估计 ζ 的值, 可令: $\langle p_{ij}^2 \rangle \langle r_{ij}^2 \rangle \geq \zeta \hbar^2$. 因为对于基态密度 ρ_0 有: $\rho_0^{-1} = \frac{3}{4} \pi r_0^3$, $\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$ 所以: $r_0 = 1.142 \text{ fm}$. 而: $r_{ij} \simeq 2r_0$. 所以: $r_{ij} = 2.284 \text{ fm}$. 对于 $\langle p_{ij}^2 \rangle$, 有: $\langle p_{ij}^2 \rangle = \frac{1}{4} \langle p^2 - 2\vec{p}_i \vec{p}_j + p_j^2 \rangle$. 假设: $\vec{p}_i \vec{p}_j = 0$. 则: $\langle p_{ij}^2 \rangle = \frac{1}{2} \langle p^2 \rangle$. 由费米气体模型可知: $\langle p^2 \rangle = \frac{3\hbar^2}{5r_0^2} \left(\frac{9\pi}{8} \right)^{2/3}$. 由此可以得出: $\langle r_{ij}^2 \rangle = 2.284 \text{ fm}$, $\langle p_{ij}^2 \rangle^{1/2} = 0.145 \text{ GeV}/c$, $\zeta = 1.681$. 它们都是由 Pauli 原理和核的基态性质决定的. 故令: $q_0 = 2.284 \text{ fm}$, $p_0 = 0.145 \text{ GeV}/c$. 由势的形式可以看到, 一旦核子过于靠近以致于要违反 Pauli 原理时, 该势将产生很强的排斥作用以保证核子在平均场中传播时遵守 Pauli 原理. 实际计算中为了符合基态性质, 我们采用如下参数: $V_p = 32 \text{ MeV}$, $q_0 = 2.8 \text{ fm}$, $p_0 = 0.29 \text{ GeV}/c$.

综上, 我们得到了新的改进的量子分子动力学 (MQMD). 有关参数如表 3 所示.

表 3 加 Pauli 势后的参数

α	β	γ	EOS	V_p	V_0^s
-281.0MeV	225.0MeV	1.21	SM	32MeV	28MeV

3 计算结果及讨论

我们利用 MQMD 着重研究了两方面的问题. 一是动量相关势、Pauli 势以及状态方程对碰撞动力学的影响; 二是对 Au+Cu 在 600MeV/u 入射能量时的模拟计算, 并与实验数据做了对比. 实验数据取自文献 [1].

3.1 动力学因素对碰撞动力学的影响

图 1 表示了 $E/A = 600 \text{ MeV}$, $b = 3.0 \text{ fm}$ 时 Au+Cu 在不同的动力学因素控制下碰撞数随时间的演化. 我们用“S”表示软势, “H”表示硬势, “SM”表示软势加动量相关势, “SP”表示软势加 Pauli 势, “Exp”表示实验数据. 在与图 1 相同的条件下, 图 2 表示了平均粒子横动量随时间的演化. 从中可以看出:

(1) 平均粒子横动量 $\langle P_x \rangle / A$ 和碰撞数 N_{coll} 对状态方程十分敏感:

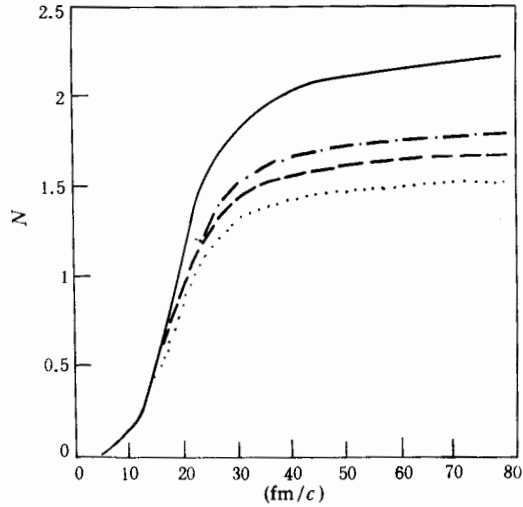


图 1 在 $E/A = 600\text{MeV}$, $b = 3.0\text{fm}$ 时 Au + Cu 碰撞中 N_{coll} 随时间的演化

H····, SM---, S——, SP·····.

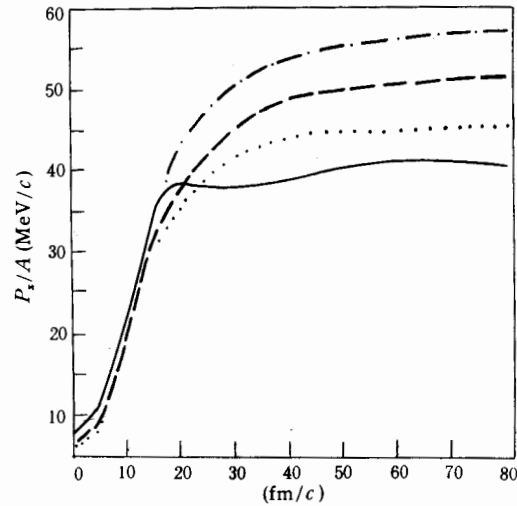


图 2 在 $E/A = 600\text{MeV}$, $b = 3.0\text{fm}$ 时 Au + Cu 碰撞中 $\langle P_x \rangle / A$ 随时间的演化

H····, SM---, S——, SP·····.

$$N_{\text{coll}}(\text{H}) < N_{\text{coll}}(\text{S}), \quad \langle P_x \rangle / A(\text{H}) > \langle P_x \rangle / A(\text{S}).$$

可以清楚地看到: 相对于硬势情况, 核物质在软势情况下更易于压缩. 但是在该能区的多重碎裂过程对状态方程不敏感^[4].

(2) 与没有动量相关势的情况相比, 具有附加排斥作用的动量相关势使粒子具有更高的平均动量. 同时, 由于有效质量的改变, 在动量不变的条件下粒子将具有更高的运动速度. 所以, 在有动量相关势的情况下, 系统中的动量转移将更加有效, 从而导致大的横动量转移. 正如下列计算结果所示:

$$N_{\text{coll}}(\text{SM}) < N_{\text{coll}}(\text{H}) < N_{\text{coll}}(\text{S}) \\ \langle P_x \rangle / A(\text{SM}) \simeq \langle P_x \rangle / A(\text{H}) < \langle P_x \rangle / A(\text{S})$$

一个有趣的现象是: $\langle P_x \rangle / A(\text{SM}) \simeq \langle P_x \rangle / A(\text{H})$. 这意味着软势加动量相关势这种条件适用于研究重离子碰撞和天体物理中的动力学过程.

(3) 由于 Pauli 原理的要求, Pauli 势在相空间中产生一种阻塞效应. 另外, 由于 Pauli 势对粒子动量的依赖所产生的排斥作用, 有如下的结果:

$$N_{\text{coll}}(\text{SP}) < N_{\text{coll}}(\text{SM}), \quad \langle P_x \rangle / A(\text{SM}) > \langle P_x \rangle / A(\text{SP}).$$

3.2 用 MQMD 对重离子碰撞过程中多重碎裂产额的实验数据的模拟

我们知道, 许多在一般 QMD 框架下的计算都明显地低估了重离子碰撞过程中的中等质量碎片的产额. 为了在 MQMD 框架下改进对多重碎裂过程的描述, 我们分别着重研究动量相关势和 Pauli 势对碎裂产额的影响.

3.2.1 动量相关势对多重碎裂产额的影响

这里我们考虑两种情况: 仅有软势 (S) 和软势加动量相关势 (SM). Z_{bound} 是指所有 $Z \geq 2$ 的类弹碎片的电荷数的总和. 图 3 表示了在 $E/A = 600\text{MeV}$ 时反应 Au + Al 和 Au + Cu 中 Z_{bound} 和 b 的关系. 可以清楚地看到 Z_{bound} 是随 b 线性增加的, 它反映了碰

撞的激烈程度. M_{inf} 是满足条件 $3 \leq Z \leq 30$ 的中等质量碎片的多重性. Z_{max} 是最大类弹碎片的电荷数.

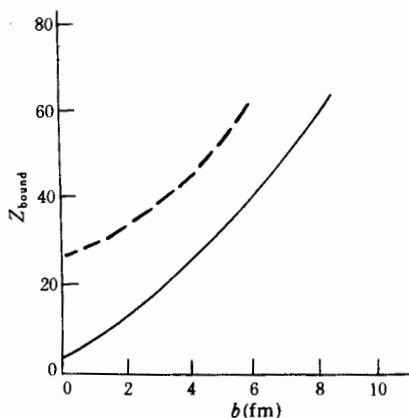


图 3 在 $E/A = 600 \text{ MeV}$ 时 Au+Cu 和 Au+Al 碰撞中 Z_{bound} 与 b 的关系

--- Au+Al, — Au+Cu.

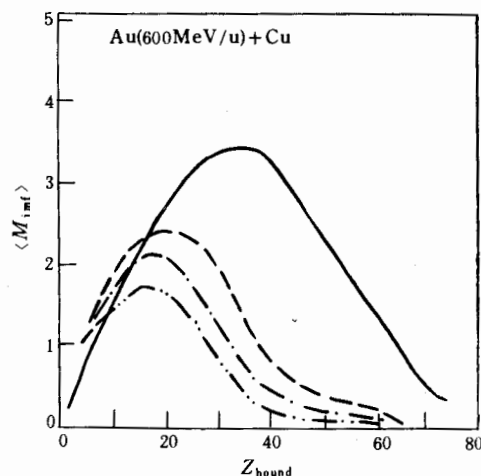


图 4 在 $E/A = 600 \text{ MeV}$ 时 Au+Cu 碰撞中 M_{inf} 与 Z_{bound} 的关系

Exp —, SM ---, S ----, SP ····.

图 4 表示了在不同的动力学因素的控制下, 在反应 Au+Cu 中 M_{inf} 与 Z_{bound} 的关系.

图 5 表示了 Z_{max} 与 b 的关系. 与仅有软势的情况 (S) 相比, 在软势加动量相关势的条件下 (SM), Z_{max} 的值要小一些. 将图 4 和图 5 结合起来我们看到: 由于动量相关势产生了大的动量转移和大的能量交换, 使得最重的碎片, 碎裂成若干次重的碎片, 使 Z_{max} 降低, M_{inf} 升高. 即:

$$M_{\text{inf}}(\text{SM}) > M_{\text{inf}}(\text{S}), Z_{\text{max}}(\text{SM}) < Z_{\text{max}}(\text{S}).$$

3.2.2 Pauli 势对多重碎裂过程的影响

尽管动量相关势改善了理论计算与实验数据的对比, 但它仍然低估了 M_{inf} 的值, 同时高估了 Z_{max} 的值. 为了进一步改进理论计算与实验数据的对比, 我们引入 Pauli 势. 在图 4 和图 5 中我们看到, Pauli 势的引入进一步改进了 M_{inf} 和 Z_{max} 的模拟计算的结果, 它们变得更有利于理论与实验的比较. 即:

$$M_{\text{inf}}(\text{SP}) > M_{\text{inf}}(\text{SM}) > M_{\text{inf}}(\text{S}), Z_{\text{max}}(\text{SP}) < Z_{\text{max}}(\text{SM}) < Z_{\text{max}}(\text{S}).$$

这些改进表明, MQMD 能更好地模拟重离子碰撞中的多重碎裂过程. 这些改进归因于 Pauli 势给出了碰撞过程中核子费米行为更好的描述.

3.2.3 进一步改进的方案

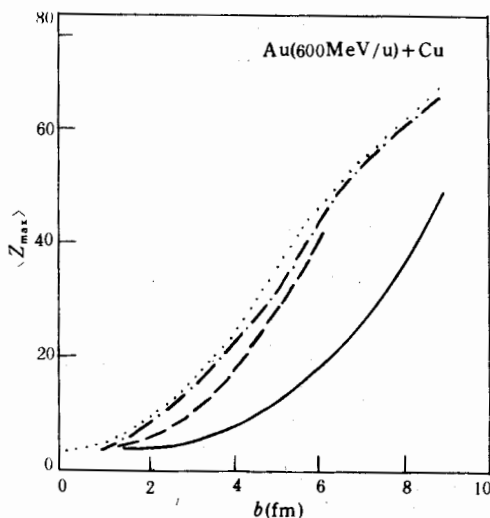


图 5 在 $E/A = 600 \text{ MeV}$ 时 Au+Cu 碰撞中 Z_{max} 与 b 的关系

Exp —, SM ---, S ----, SP ····.

尽管在 MQMD 的框架下理论计算与实验结果比较有了明显改善, 但是二者之间的矛盾仍然存在. 是什么原因导致这些矛盾呢? 在这里至少有两个因素值得考虑. 一是旁观者物质中能量储存的不足. 二是我们没有正确处理高激发碎片的衰变. 因此, 一方面我们必须仔细研究在碰撞过程中各种能量以及核物质密度的涨落随时间的演化; 仔细研究各种有效相互作用的性质, 介质中核子-核子散射截面, 集团构成方法等动力学因素对多重碎裂过程的影响. 通过理论与实验之间系统地对比, 不断完善动力学模型. 然后, 恰当地将动力学理论与统计理论结合起来, 即: 将量子统计理论(QSM)与现有的动力学理论(MQMD)耦合起来, 构成一个新的框架. 它既能描述非平衡的动力学过程, 又能描述近平衡的统计碎裂过程. 当然, 量子统计理论所需要的诸如激发能和密度等输入量是由动力学模型提供的. 这一工作正在进展中.

感谢德国 Frankfurt 理论物理研究小组和李祝霞同志为我们提供 QMD 的计算程序.

参 考 文 献

- [1] Hubele. J, Kreut. P, Adloff. J. C, et al., *Z. Phys.*, **A340** (1991) 263.
- [2] J. Aichelin, G. Peilert, A. Bohnet et al., *Phys. Rev.*, **C37** (1988) 2451.
- [3] L. Willet, E. M. Henley, M. Kraft, et al., *Nucl. Phys.*, **A282** (1977) 341.
- [4] Liu Jian Ye, Zhang Shao Guang, *Z. Phys.*, **A345** (1994) 31.
- [5] C. Ngo, H. Ngo, S. Leray, M. E. Spina, *Nucl. Phys.*, **A499** (1989) 148.
- [6] C. Dorso, S. Duart, J. Randrup, *Phys. Lett.*, **B188** (1987) 287.
- [7] G. Peilert, J. Randrup, H. Stocker et al., *Phys. Lett.*, **B260** (1991) 271.

Multifragmentation Process in HIC Simulated by Modified Quantum Molecular Dynamics

Liu Hang Liu Jianye Zhang Shaoguang Li Junqing

(Institute of modern physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Received 10 November 1994

Abstract

The collision dynamics and yields of the multifragmentation in intermediate energy heavy ion collisions are simulated within the frame of the modified quantum molecular dynamics (MQMD). With this new MQMD, it is found that the obvious improvements about the agreements between the experimental data and the simulating results for the fragment production by means of MDI and Pauli potential are achieved. Meanwhile the different influences of MDI and Pauli potential on the collision dynamics of intermediate energy heavy ion collisions are obtained. Finally the possible reasons for the discrepancies between the experimental data and the present simulating results and remedies of these deficiencies are discussed in detail.

Key words production of multifragmentation, fermionic behavior, momentum dependent interaction, Pauli potential.