

# 重离子碰撞两体关联输运理论 V. 等级截断\*

刘 航 李希国 刘建业 左 维

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 讨论了两体关联输运理论在不同的等级截断下对中能重离子碰撞动力学过程的描述. 不同的等级截断对动力学过程尤其是耗散过程的描述是不同的.

**关键词** 等级截断 动力学过程 耗散

## 1 引言

文献[1]讨论了有关保持守恒定律的等级截断的概念,说明两体关联输运理论(TBCTT)有若干种极限,它们都满足基本的物理要求.也就是说在理论上这些极限都是合理的,是对两体关联函数不同层次的描述,都可以用来描述中能重离子碰撞的动力学过程.那么,用哪一种极限来描述中能重离子碰撞是最合适的?这个问题不能一概而论,需要具体分析.我们知道,中能重离子碰撞的反应机制很复杂,它依赖于许多因素,如入射道效应等.在静态或准静态条件下,Hartree-Fock(HF)或时间相关的Hartree-Fock(TDHF)近似就可以很好地描述原子核的微观性质<sup>[2,3]</sup>;在一定条件下的中能重离子碰撞时间相关的G矩阵理论(TDGMT)也能给出很好的结果<sup>[4]</sup>.还有许多其它模型和理论从不同的侧面来探讨中能重离子碰撞的动力学过程,两体关联输运理论也在这方面进行了积极尝试,它的突出优点在于它是从基本的量子多体理论出发<sup>[5]</sup>,按照原子核运动及中能重离子碰撞的基本特点,利用相干单粒子波函数展开、单粒子运动方程的半经典近似和对角化等方法所建立的输运理论<sup>[6]</sup>,因而具有普遍性.正如文献[1]所指出的那样,像时间相关的Hartree-Fock理论、玻恩近似、时间相关的G矩阵理论都是两体关联输运理论的特殊极限.

利用两体关联输运理论的上述优点,可以研究各种等级截断所对应的不同极限情况对中能重离子碰撞动力学过程的描述有何异同,从而确定各种极限的适用范围.这是一个很难解决的问题,涉及相互作用的选取、关联基态的构造及其对原子核真实基态性质的描述等许多相互制约的因素.我们简单的数值计算表明:不同的等级截断所对应的不同

1996-12-24 收稿

\* 国家自然科学基金(19375052)、甘肃省自然科学基金、中国博士后基金、中国科学院基金与核工业科学基金资助

极限对中能重离子碰撞动力学过程的描述是不同的.

## 2 数值计算和讨论

为了研究不同等级截断对中能重离子碰撞动力学的不同描述,我们分别在对应与时间相关的 Hartree-Fock近似、玻恩近似、时间相关的  $G$  矩阵理论和原子核量子关联动力学的极限下计算了 ${}^4\text{He} + {}^4\text{He}$  在  $40.0\text{MeV}/u$ ,  $b = 0.0\text{fm}$  的反应过程. 计算条件与文献 [1] 中研究守恒定律时的条件相同. 在这个条件下守恒定律的保持是令人满意的,所以计算也较为可靠.

本文计算了上述反应的  $x-z$ ,  $p_x-p_z$ ,  $z-p_z$  3 种反应(见图 1—3) 随时间的演化. 在半经典的 Wigner 表象中可以更直观的从反应图观察重离子碰撞的动力学特征,所以我们将一体密度矩阵  $\rho(r', r''; t)$  变换到相空间:

$$f(r, p, t) = \int d(r' - r'') \exp(-ik(r' - r'')) \rho(r', r''; t),$$

其中  $r = (r' + r'') / 2$ . 上述 Wigner 函数可以用一种简单的经典相空间的图象来分析重

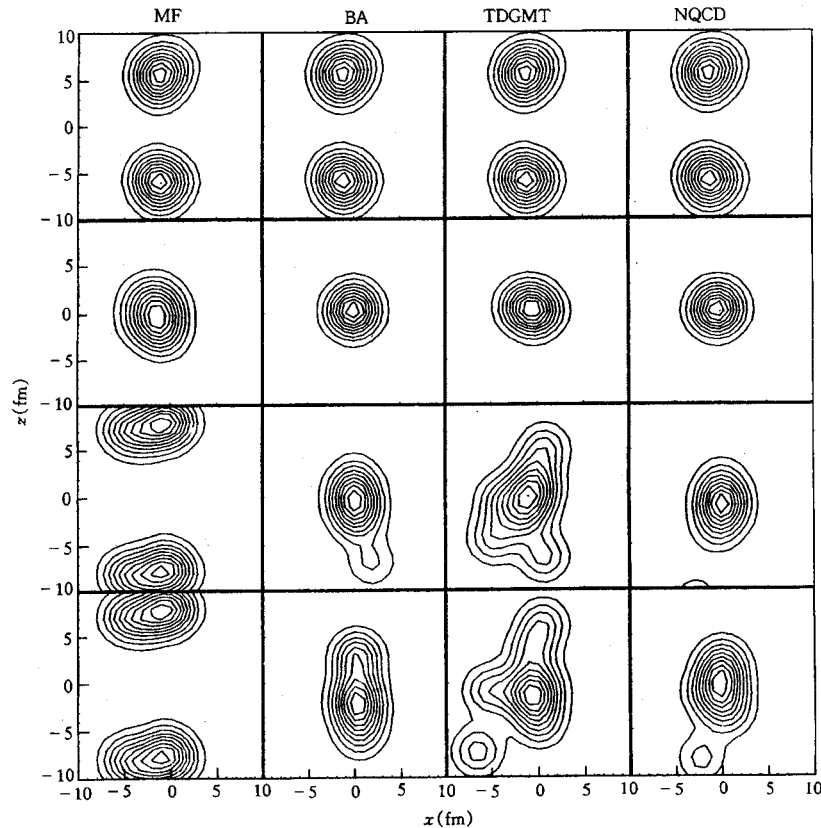


图 1 各种等级截断下  $x-z$  密度分布随时间的演化

MF: TDHF 平均场, BA: 玻恩近似, TDGMT: 时间相关的  $G$  矩阵理论, NQCD: 原子核量子关联动力学. 从上到下时间分别为  $0.0\text{fm}/c$ ,  $30.0\text{fm}/c$ ,  $60.0\text{fm}/c$ ,  $120.0\text{fm}/c$ . 做等密度线时密度从 0.1 到 1.0 线性增长.

离子碰撞的动力学过程。应该强调的是,在具体计算时我们始终在组态空间的密度矩阵表述下操作,没有引入所谓的 Wigner 函数,这是因为 Wigner 函数在一定的条件下并不能总解释为密度函数,它可能不正定。更重要的是文献 [7] 指出:若力学量仅为坐标或仅为动量的函数,用 Wigner 函数计算其平均值是没有问题的;若力学量同时依赖于坐标、动量,用 Wigner 函数计算其平均值可能会有问题,因为 Wigner 变换可能破坏量子经典对应的 Weyl 关系。

图 1 显示了  $x-z$  密度分布在各种等级截断下的时间演化过程。从中可以清楚地看到:对于 MF 情况,两个  $\alpha$  粒子几乎对穿而过,密度分布发生了一些变化和扰动,但没有核子发射,没有明显的压缩-膨胀模式产生,也没有破坏  $\alpha$  粒子的束缚性质。这与标准的 TDHF, 没有碰撞项的 QMD 及 VUU 所描述的动力学特征基本一致;对于 BA、TDGMT、NQCD 3 种情况,则明显地不同于 MF 的情况。在这 3 种条件下,有明显的压缩产生,并伴有核子发射及密度分布的变化。

图 2 是  $p_x-p_z$  密度分布随时间的演化,从这里可以清楚地看到反应中的耗散过程。在

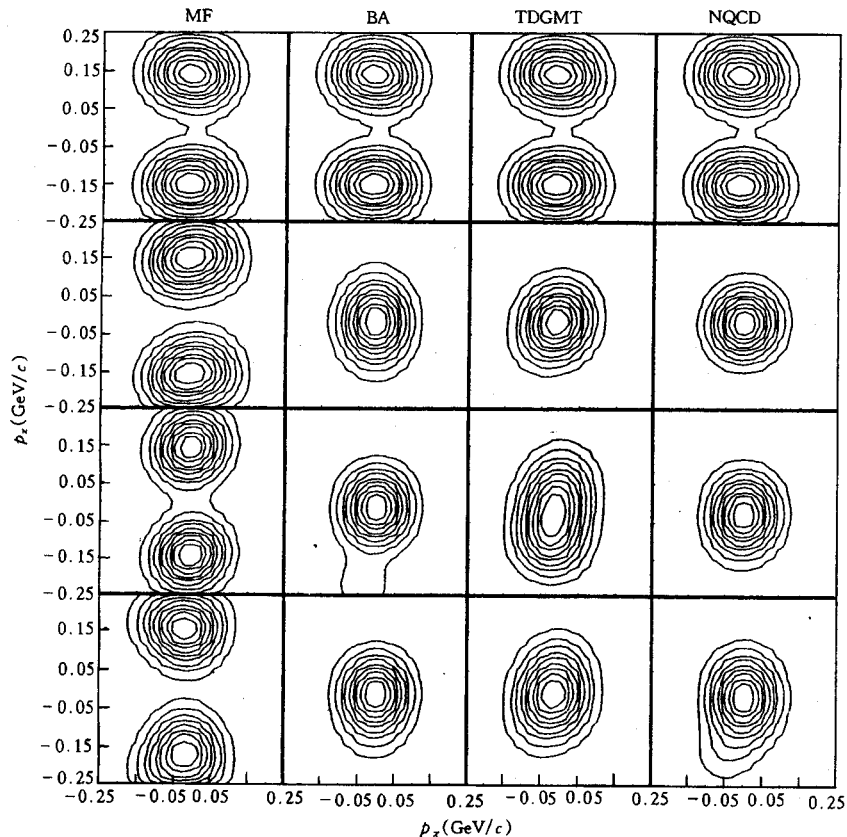


图2 各种等级截断下  $p_x-p_z$  密度分布随时间的演化

符号及时间见图1的说明。

MF 条件下  $p_x-p_z$  密度分布随时间几乎没有变化,没有集体能量的耗散。而在另外 3 种条件下则有明显的集体能量耗散发生,表现为  $p_x-p_z$  密度分布趋向于各向同性,这种耗散使系统趋向于平衡态。但可以发现:在 BA、TDGMT、NQCD 3 种条件下的末态  $p_x-p_z$  密度分布并

不完全一致,它们各向同性的程度是不一样的.

为了更清楚地区别不同的等级截断对动力学过程的不同描述,我们研究了反应  $z$

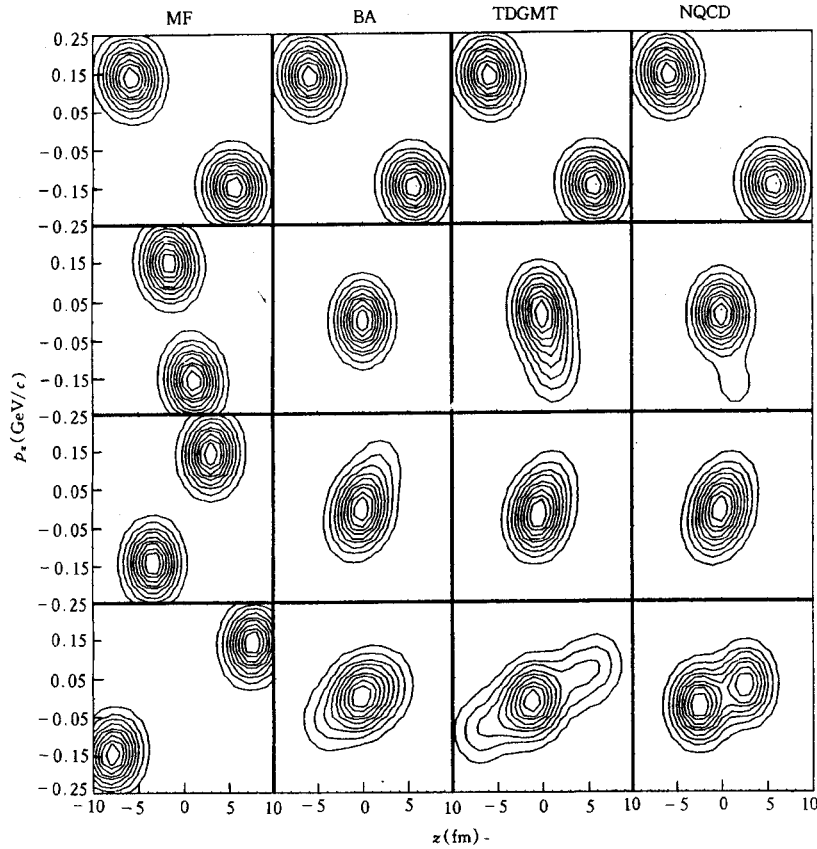


图3 各种等级截断下  $z-p_z$  密度分布随时间的演化

符号及时间见图1的说明.

方向的相图. 图3就是  $z-p_z$  密度分布随时间的演化. 从这个密度分布也可以看出明显的耗散特征,但重要的是从这个密度分布可以更明显地看出:不同等级截断下对动力学过程的描述是不同的,不论是在演化的中间过程还是系统趋于平衡以后,不同的等级截断所对应的  $z-p_z$  密度分布都不相同. 一个问题是:既然不同等级截断下对动力学过程的描述是不同的,那么哪一种是恰当的? 原则上讲,它们都是正确的,是对两体物理效应不同层次的描述,其中以 NQCD 极限最为完整,是截断在两体关联近似下最完整的框架,因而最好是最好最恰当的截断. 而在具体的研究中,一定条件下的重离子碰撞过程可用较为简单的理论较好地描述(如 BA 和 TDGMT 等),而这些理论的计算较为简单,更容易实现,所以在实际的数值计算中,它们是很有用处的,像 BUU 就是利用 TDGMT 来构造核子-核子碰撞截面. 至于如何确定不同等级截断的适用范围,这就要求进行更接近真实情况的计算,主要是相互作用的选取和基态的构造,这是两个相互制约的因素,不同的相互作用所得到的稳定基态一般是不同的. 这个稳定的基态应该能够很好地描述原子核的基态性质. 两体关联输运理论的定态极限允许用一组自洽的迭代方程组来构造所谓的“关联基态”,是一种比传统的 HF 基态更好的基态. 所谓更好是指它能更全面地描述原子核的基态性质,同时

对相互作用有更严格的限制. 一般认为 NQCD 和 TDGMT 两种极限在描述中高能重离子碰撞时基本上是等价的, 而在描述原子核集体运动时两者有明显的区别, 因为与 NQCD 相比, TDGMT 忽略了对集体运动有重要影响的空穴-粒子关联<sup>[4,8]</sup>, 我们将在后续工作中进一步讨论这个问题.

感谢 M. Tohyama 教授极具参考价值的 TDDM 程序及沈彭年教授在数值计算中对我们的帮助. 尤其感谢詹文龙和刘冠华教授为我们提供功能强劲的 Fortran 程序包.

### 参 考 文 献

- [1] Liu Hang, Liu Jianye, Li Xiguo et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, 22: 55
- [2] Koonin. S E Prog. Part. Nucl. Phys., 1980, 4:238
- [3] Negele J W. Rev. Mod. Phys., 1982, 54:913
- [4] Cassing W, Mosel U. Prog. Part. Nucl. Phys., 1990, 25:235
- [5] Wang Shun-jin, Cassing W. Ann. Phys. (N. Y.), 1985, 159:328
- [6] Liu Jianye, Wang Shunjin, Li Xiguo et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1996, 20:1007
- [7] Reichl L E. Modern Course for Statistical Physics. Vol 1 (in Chinese). Beijing: Beijing University Press, 1988 (Reichl L E. 统计物理现代教程(上册), 北京大学出版社, 1988)
- [8] Gong, M. Tohyama M. Z. Phys., 1990, A335:153

## Two-Body Correlation Transport Theory for Heavy Ion Collision V. Hierarchy Truncation

Liu Hang    Li Xiguo    Liu Jianye    Zuo Wei

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

**Abstract** The dynamical process in heavy ion collisions at intermediate energy described by Two-Body Correlation Transport Theory (TBCTT) under different hierarchy truncation is discussed. It is found that the different hierarchy truncations of TBCTT have different descriptions about the dynamical process of heavy ion collision.

**Key words** hierarchy truncation, dynamical process, dissipation