

# 关于重离子碰撞 TBCTT 和 QMD 两种 理论计算结果的系统比较\*

刘建业<sup>1,2</sup> 刘航<sup>1</sup> M. Di Toro<sup>2,3</sup> 左维<sup>1,2,3</sup>

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(Department of Physics, University of Catania, INFN, Italy)

3(National Southern Laboratory of INFN, Catania, Italy.)

**摘要** 为了检验基于两体关联动力学而建立的关于重离子碰撞的两体关联输运理论(TBCTT),对TBCTT和量子分子动力学(QMD)的理论计算结果在不同入射道条件下进行了仔细的比较.结果表明:所计算的各种物理量的时间演化过程,对两种理论而言得到了非常相似的行为.这说明TBCTT是一个具有很好发展前景的重离子碰撞动力学的输运理论.

**关键词** 重离子碰撞 两体关联输运理论 量子分子动力学

## 1 引言

为了描述中能重离子碰撞动力学过程建立了几个类型的重离子碰撞输运模型理论,其中属于量子分子动力学的有QMD<sup>[1]</sup>,AMD<sup>[2]</sup>,FMD<sup>[3]</sup>和MQMD<sup>[4]</sup>等.这些模型理论广泛地应用于研究重离子碰撞中非均匀核物质和多重碎裂时间演化过程,但至今QMD的理论基础有待进一步的研究.如何从量子多体理论出发推导出QMD的输运方程还未解决.另一类大家熟知的是Boltzmann方程,其中包括BUU<sup>[5]</sup>,B-L方程.这些理论在描述重离子碰撞动力学中获得相当大的成功.但是BUU方程由于在数值计算中采用了Mont Carol模拟和试验粒子方法,相当于系综平均,丢失了重离子碰撞中的涨落和关联,不能描述重离子碰撞中的碎块形成和多重碎裂.B-L方程也只是部分地考虑了关联函数与自身的耦合,而且平均场与碰撞项采用了弱耦合近似.

为了克服这些理论上的不足,从量子多体理论出发,建立起能够描述中能重离子碰撞动力学过程的自洽量子输运理论成了一个非常有兴趣的重要课题.在文献[6,7]中基于王顺金教授建立的两体关联动力学理论<sup>[8]</sup>,选择时间相关的相干单粒子波函数作为工作表象推导出了TBCTT.

1997-08-15收稿

\* 国家自然科学基金(19775075)和中国科学院九五重大项目资助

如何选择单粒子基是 TBCTT 一个重要问题, 可以有几种方法得到单粒子基. 根据 J. Aichelin 等人的计算结果表明<sup>[9]</sup>, QMD 略去碰撞项所得的结果与 TDHF 及 Vlasov 方程的计算结果基本一致. 同时依据 QMD 的经验, 在本文计算中作为检验 TBCTT 的第一步, 选用 QMD, 略去碰撞项来得到时间相关的相干单粒子态作为 TBCTT 的工作表象. 鉴于 QMD 已成功而广泛地应用于描述中能重离子碰撞过程. 故我们将 TBCTT 的计算结果与 QMD 的结果作了系统的比较. 比较表明: 两种理论计算得到有关物理量的时间演化过程其定性趋势基本一致.

## 2 模型

这里仅简单回顾 TBCTT 的基本要点, 详细情况请参阅文献 [6, 7]. 两体关联动力学中的密度矩阵  $\rho$  和两体关联函数  $c_2$  能够利用正交单粒子基  $\psi_\alpha$  进行轨道展开:

$$\rho(11'; t) = \sum_{\alpha\beta} n_{\alpha\beta}(t) \psi_\alpha(1) \psi_\beta^*(1'), \quad (1)$$

$$c_2(12, 1' 2'; t) = \sum_{\alpha\beta\gamma\delta} f_{\alpha\beta\gamma\delta}(t) \psi_\alpha(1) \psi_\beta(2) \psi_\gamma^*(1') \psi_\delta^*(2'). \quad (2)$$

而正交单粒子波函数  $\psi_\alpha$  可以通过由 QMD 无碰撞项求得的非正交单粒子基  $\varphi_{z_i}$  展开:

$$|\psi_\alpha\rangle = \sum_i d_{i\alpha}^{-\frac{1}{2}} |\varphi_{z_i}\rangle$$

从方程 (1), (2) 和两体关联动力学就可得到一组耦合方程, 即 TBCTT:

$$i\eta \frac{\partial}{\partial t} n_{\alpha\beta}(t) = \sum_\gamma [T_{\alpha\beta\gamma}^1(t) + E_{\alpha\beta\gamma}^1] + \sum_{\alpha'\beta'\gamma'} [f_{\alpha'\beta'\gamma'}(t) \langle \alpha\gamma' | V | \alpha'\beta' \rangle - f_{\alpha\beta'\alpha'\gamma'}(t) \langle \alpha'\gamma' | V | \beta\beta' \rangle], \quad (3)$$

$$i\eta \frac{\partial}{\partial t} f_{\alpha\beta\delta\gamma}(t) = \sum_\mu [T_{\alpha\beta\gamma\delta\mu}^2(t) + E_{\alpha\beta\gamma\delta\mu}^2(t)] + \sum_{\alpha'\beta'\gamma'\delta'} [B_{\alpha\beta\delta\gamma\alpha'\beta'\gamma'\delta'} + P_{\alpha\beta\delta\gamma\alpha'\beta'\gamma'\delta'} + H_{\alpha\beta\delta\gamma\alpha'\beta'\gamma'\delta'}]. \quad (4)$$

这里, 方程 (3) 中的  $T^1$  和  $E^1$  项以及方程 (4) 中的类似项  $T^2$  和  $E^2$  是具有正交特性的单粒子波函数的 TDHF 被具有非正交特性的平均场方程, 如 Vlasov 方程、无碰撞项的 QMD 等代替后所得到的修正项. 故在推导 TBCTT 过程中如利用了 TDHF 方程, 这些项目就被全部消去. 方程中的  $B$  项是一级粒子-粒子关联, 即 Born 项.  $H$  项是空穴-粒子关联,  $P$  项是高阶粒子-粒子关联. 这些公式的详细表达式参见文献 [6, 7].

## 3 TBCTT 与 QMD 计算结果的比较和讨论

因为 QMD 已成功地用来描述重离子碰撞的动力学过程, 所以作为检验 TBCTT 的第

一步,在不同入射道条件下,如不同入射能量、碰撞参数和碰撞系统,对 TBCTT 和 QMD 计算的有关物理量进行了仔细的比较. 首先数值解 QMD 删去碰撞项,即哈密顿方程得到非正交的时间依赖的相干单粒子基  $\varphi_z$ . 其中相互作用势如下所示

$$U = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{Sym}} + U^{\text{Pauli}}, \quad (5)$$

这里  $U^{\text{Sky}}$ 、 $U^{\text{Yuk}}$ 、 $U^{\text{Coul}}$ 、 $U^{\text{Sym}}$  和  $U^{\text{Pauli}}$  分别是 Skyrme、Yukawa、库仑、对称和泡利势. 这些有效相互作用势仅在 QMD 和 QMD 无碰撞项计算中应用. 而方程 (3) 和方程 (4) 中相互作用矩阵元中的相互作用仅应用了简单的 Skyrme 型如下

$$V_0^{\text{Sky}} = t_0 \delta(r_1 - r_2), \quad (6)$$

数值计算中, QMD 和提供单粒子基的 QMD 无碰撞项的计算中所用的所有势参数值完全相同. 这些参数在用冷却摩擦方法确定碰撞核基态性质给出初始值时已经完全给定. 此后的计算为了与 QMD 的结果比较,仅调节剩余相互作用参数  $t_0$ .

QMD 中关于碰撞系统单粒子波函数的数目等于粒子数的数目. 然而 TBCTT 主要处理两体关联,状态的数目必须大于碰撞系统粒子数的数目. 否则关联效应将得不到发展. 本文的计算涉及到三个碰撞系统:  ${}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Be} + {}^8\text{Be}$ , 而更多的计算是对  ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$  系统进行的. 将这个碰撞系统的 Hilbert 空间的维数扩大到  ${}^{10}\text{B} + {}^{10}\text{B}$ , 即: 利用摩擦冷却方法分别得到  ${}^6\text{Li}$  和  ${}^{10}\text{B}$  的合理的基态, 随后从  ${}^{10}\text{B} + {}^{10}\text{B}$  中选取 4 个中子态和 4 个质子态合并到  ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$  中去构成该计算的组态空间. 最后按照占据数  $n_{\alpha\alpha}$  的大小选择 12 个单粒子态作为  ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$  的物理态. 同样,  ${}^4\text{He} + {}^4\text{He}$  和  ${}^8\text{Be} + {}^8\text{Be}$  分别扩大的  ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$  和  ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$ . 在求解 TBCTT 的方程后得到每一时刻的  $n_{\alpha\beta}$  和  $f_{\alpha\beta\gamma\delta}$ , 随后将  $n_{\alpha\beta}$  对角化而得到占据数  $n_{\alpha\alpha}$  和相应的单粒子态  $\bar{\psi}_\alpha$ , 接着计算该单粒子态所对应的平均单粒子位置和动量, 从而得到了坐标空间和动量空间的几率分布以及单粒子动量分布的四极矩  $Q_{zz}$ . 下面将 TBCTT 和 QMD 的计算结果进行比较和讨论.

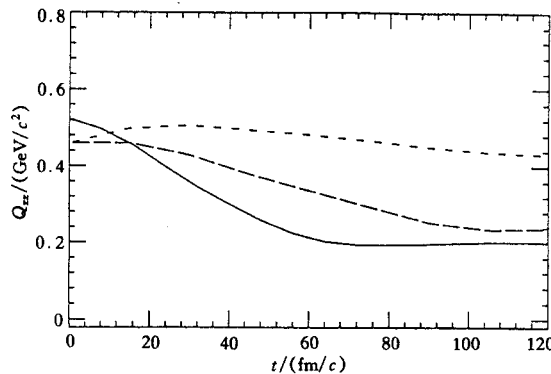


图1 核子动量四极矩  $Q_{zz}$  关于三种理论: QMD 无碰撞项 (短虚线), QMD (长虚线) 和 TBCTT (实线) 的时间演化

图 1 是  $Q_{zz}$  的时间演化过程, 随着时间的演化, QMD 和 TBCTT 的趋势基本一致. 而平均场基本上是一条水平的直线, 即: 前两者表现出动量的耗散过程, 而平均场没有耗散. 以

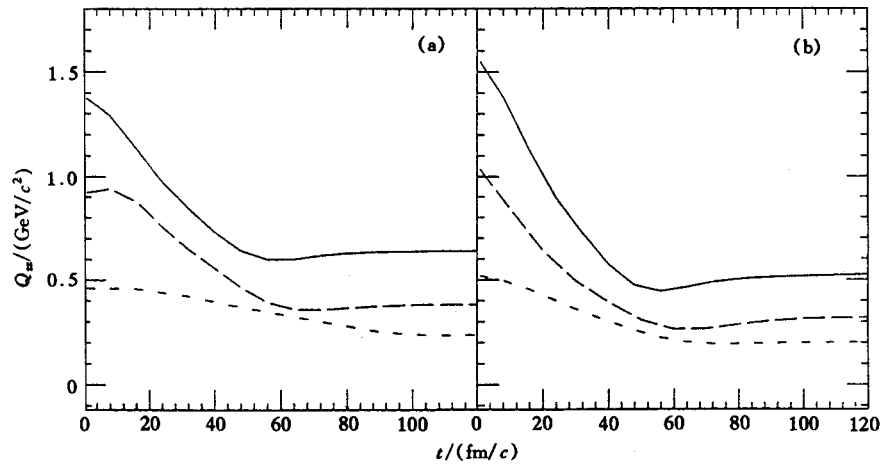


图 2  $Q_{zz}$  在三种入射能量  $E_{\text{lab}} = 40\text{MeV/u}$  (短线)  $E_{\text{lab}} = 80\text{MeV/u}$  (长虚线) 和  $E_{\text{lab}} = 120\text{MeV/u}$  (实线) 和碰撞参数  $b = 1.0\text{fm}$  时的时间演化

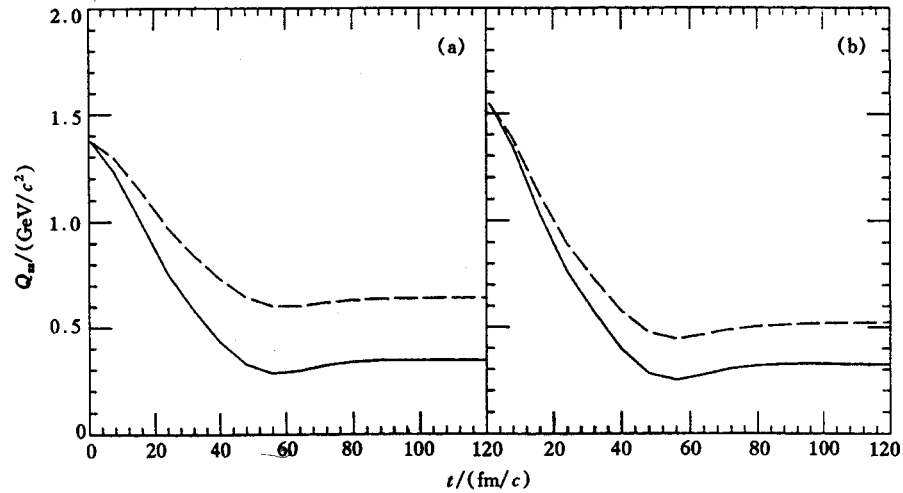


图 3  $Q_{zz}$  在  $E_{\text{lab}} = 120\text{MeV/u}$ , 不同碰撞参数  $b = 0.0\text{fm}$  (实线)、 $b = 1.0\text{fm}$  (虚线) 情况下  $Q_{zz}$  的时间演化  
(a) 为 QMD, (b) 为 TBCTT.

上各图都是碰撞系统  ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$ , 入射能量  $E_{\text{lab}} = 40.0\text{MeV/u}$ , 碰撞参数  $b = 1.0\text{fm}$ . 图 2 是关于  ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$  和  $b = 1.0\text{fm}$  情况下 3 种入射能量  $E_{\text{lab}} = 40.0\text{MeV/u}$ ,  $80.0\text{MeV/u}$ ,  $120\text{MeV/u}$  的 QMD (图 2(a)) 和 TBCTT (图 2(b))  $Q_{zz}$  的时间演化过程. 对于两种理论而言, 随入射能量的增加, 在  $t < 50\text{fm/c}$ ,  $Q_{zz}$  随碰撞时间增加而下降的过程变得越陡, 即随入射能量的增加, 核子之间的碰撞变得激烈, 耗散过程增强. 两种理论计算结果表现出几乎一致的行为. 图 3 是同一碰撞系统  ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$  在  $E_{\text{lab}} = 120.0\text{MeV/u}$  时不同碰撞参数  $b = 0.0\text{fm}$  和  $b = 1.0\text{fm}$  情况下  $Q_{zz}$  关于 QMD 和 TBCTT 两种理论的时间演化过程. 对于两种理论而言同样表现出  $b$  越小, 核子之间碰撞越激烈, 即  $Q_{zz}$  随碰撞时间的增加其下降变得越陡. 图 4

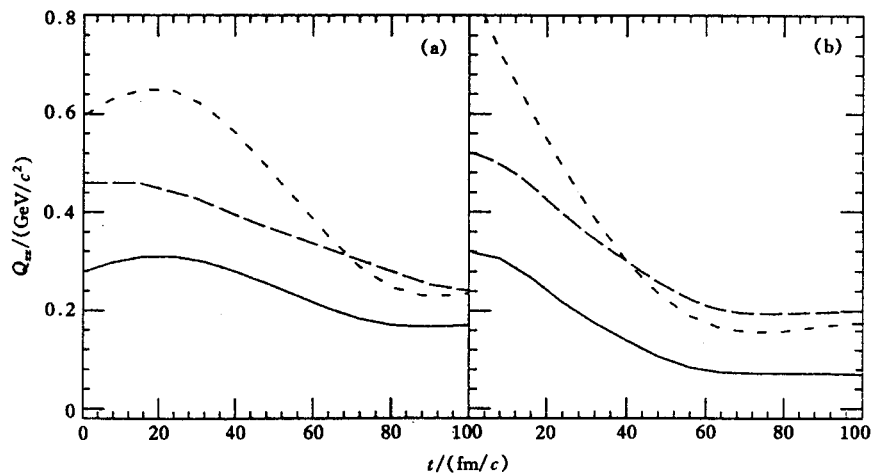


图 4  $Q_{zz}$  在  $E_{lab} = 40\text{MeV/u}$  和  $b = 1.0\text{fm}$  时关于三种碰撞系统  ${}^4\text{He} + {}^4\text{He}$  (短虚线),  ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$  (长虚线) 和  ${}^8\text{Be} + {}^8\text{Be}$  (实线) 的时间演化  
(a) 为 QMD, (b) 为 TBCIT.

给出了入射能量  $E_{lab} = 40.0\text{MeV/u}$  和  $b = 1.0\text{fm}$  情况下 3 个碰撞系统:  ${}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Be} + {}^8\text{Be}$  相应于 QMD 和 TBCIT 的  $Q_{zz}$  随时间的演化过程, 随着碰撞系统质量的增加, 两种理论表现出发展趋势相似的耗散行为, 即系统质量增加, 耗散增强, 随时间的演化,  $Q_{zz}$  的下降变得越陡.

#### 4 小结

本文计算和比较了 TBCIT, QMD 和平均场三种理论关于中能重离子碰撞在不同入射条件下 TBCIT 和 QMD 关于动量四极矩  $Q_{zz}$  的时间演化过程. 两种理论给出几乎一样的耗散行为. 随入射能量和碰撞系统质量的增加以及碰撞参数的减小, 重离子碰撞中的核子之间的碰撞越激烈, 系统的耗散过程就越强. 这些结果和比较表明: TBCIT 可以给出有关中能重离子碰撞过程中核子之间碰撞过程和系统耗散行为的合理描述. 这就足以说明 TBCIT 是一个具有很好发展前景的非相对论中能重离子碰撞的量子输运理论. 然而在本文中只对 TBCIT 与 QMD 的计算结果作了初步比较, 定性地得到了近似一致的结果, 还需对 TBCIT 继续改进和完善, 有些问题, 如碰撞系统的守恒定律, 碰撞系统的基态关联, 核子-核子相互作用等, 正在进一步的研究当中. 更重要的是要与实验数据进行比较.

对李祝霞教授提供 QMD 的计算程序, M. Tohyama 教授提供 TDDM 程序表示感谢.

#### 参 考 文 献

- [1] Aichelin J, Peilert G, Bohet A et al. Phys. Rev., 1988, C37:2451—2467
- [2] Ono A, Horiuchi H, Maruyama T et al. Prog. Theo. Phys., 1992, 87:1185—1206

- [ 3 ] Feldmeier H. Nucl. Phys., 1990, **A515**:147—172
- [ 4 ] Liu Jianye, Zhang Shaoguang. Z. Phys., 1994, **A348**:31—39
- [ 5 ] Bertsch G F, Das Gupta S. Phys. Rep., 1988, **160**:189—233
- [ 6 ] Liu Jianye, Wang Shunjin, Li Xiguo et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, (in Chinese)1996, **20**: 1007—1013  
(刘建业,王顺金,李希国等. 高能物理与核物理,1996, **20**: 1007—1013)
- Liu Hang, Zuo Wei, Li Xiguo et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1997, **21**: 169—175  
(刘航,左维,李希国等. 高能物理与核物理,1997, **21**: 169—175)
- [ 7 ] Liu Jianye, Wang Shunjin, Di Toro M et al. Nucl. Phys., 1996, **A604**:341—357
- [ 8 ] Wang Shunjin, Cassing W. Ann. Phys., (N. Y), 1985, **159**:328  
Wang Shunjin, Zuo Wei, Cassing W. Nucl. Phys., 1994, **A573**:245—275
- [ 9 ] Aichelin J, Hartnack C, Bohnet A et al. Phys. Lett., 1989, **B224**:34

### Systematic Comparisions of Theoretical Calculation Results on Heavy Ion Collision Between TBCTT and QMD \*

Liu Jianye<sup>1,2</sup>    Liu Hang<sup>1</sup>    M. Di Toro<sup>2,3</sup>    Zuo Wei<sup>1,2,3</sup>

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

*2(Department of Physics, University of Catania, INFN, Italy)*

*3(National Southern Laboratory of INFN, Catania, Italy.)*

**Abstract** In order to test the two-body correlation transport theory (TBCTT), which is established for heavy ion collisions based on the two-body correlation dyanmics, detailed comparisons between the preliminary numerical results of TBCTT and those of quantum molecular dynamics (QMD) are performed, and it is shown that all behaviors of quantites studied for different incident conditions of heavy ion collision are very similar for two theories. This implies that the TBCTT theory is promising for the description of heary ion collision dynamics with selfconsistent inclusion of fluctuation effects.

**Key words** heavy ion collision, two-body correlation transport theory, quantum molecular dynamics

---

Received 15 August 1997

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19775075) and Major Subject of the Chinese Academy of Sciences