

相对论重离子碰撞的趋平衡问题*

李祝霞^{1,2)} 卓益忠^{1,2)}

1) (兰州重离子加速器国家实验室原子核物理理论研究中心 兰州 730000)

2) (中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 从相对论 BUU 理论出发,研究了 1 GeV/u 能区重离子碰撞全局和局域平衡性质. 研究结果表明,在该能区平均场对反应动力学过程仍有相当的作用;对有限核系统的反应动力学过程的时间演化的研究表明,有限核系统未能达到全局平衡,在中心区基本达到局域平衡. 因而在该能区的重离子碰撞中引入完全热平衡概念时,需谨慎考虑.

关键词 中高能重离子碰撞 趋平衡 时间演化

分类号 O571.4

1 引言

重离子碰撞提供了唯一在实验室内研究远离基态的核物质的机会. 但是有关的信息却只能通过适当的理论模型分析间接地获得,因而一个正确的理论描述是至关重要的. 目前不少关于重离子碰撞的模型均引入了热平衡概念,于是引发出一个非常基本的问题,即重离子碰撞果真能很快达到热平衡? 系统的热平衡程度与哪些因素有关? 这些问题引起众多学者的关注. Frimen、Ivanov、Norenberg 等考虑了两核物质流的碰撞,他们的结论是碰撞系统很快达到热平衡; Randrup 考虑了同样的几何模型,用相对论 Ueling-Uhlenbeck 方程计算得到了同样的结果; Cugnon 和 A. Iavog 等分别用 Cascade 和相对论 BUU 理论研究了 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{43}\text{Nb} + ^{43}\text{Nb}$ 反应,在 1 GeV/u 入射能量下系统未能达到热平衡. 他们对 1 GeV/u 能区重离子碰撞的热化程度的结论分歧很大,因此很有必要对这些问题进行更为严格和系统的研究,以澄清分歧.

为此,作者从相对论 BUU 理论出发,以

全局和局域两方面对该能区的重离子碰撞过程作了系统的研究^[1,2]. 本文第二节对理论模型作一简述,第三节给出系统趋平衡过程的研究结果,第四节给出局域平衡过程的研究结果,最后给出总结和讨论.

2 理论模型简述

相对论 BUU 模型在重离子碰撞研究中已被广为采用,在此仅作简述:相互作用采用非线性 Walecka 模型,而相对论 BUU 方程可写为

$$\left\{ \left[\partial_x^\mu - \Sigma_{\text{HF}}^{\omega}(x, p) \partial_\nu^\mu - \partial_\nu^\mu \Sigma_{\text{HF}}^\mu(x, p) \partial_x^\nu \right] \frac{P_\mu}{m^*} + \left[\partial_\nu^\mu \Sigma_{\text{HF}}^S(x) \partial_\rho^\nu - \partial_\rho^\nu \Sigma_{\text{HF}}^S(x, p) \partial_x^\mu \right] \right\} f(x, p) = \frac{1}{2} \int \frac{d^3 p_2}{(2\pi)^3} \sigma(s, t) v [F_2^0 - F_1^0] d\Omega,$$

其中

$$\Sigma_{\text{HF}}^{\omega}(x, p) = \partial_x^\mu \Sigma_{\text{HF}}^\nu(x) - \partial_x^\nu \Sigma_{\text{HF}}^\mu(x).$$

Σ_{HF}^S 、 Σ_{HF}^ν 是自能项的标量和矢量,碰撞项两体碰撞截面采用 Cugnon 参数化. 表 1 给出了数值计算中所采用的耦合常数和相应的

* 1998 - 05 - 13 收稿.

* 国家自然科学基金(项目号 19675069)和核工业科学基金资助.

核物质的饱和性质.

表 1 计算中采用的耦合常数和核物质的饱和性质

	g_s	g_v	B	C	m^*	K/MeV
Set 1	9.57	11.67			0.54	540
Set 2	6.90	7.54	-40.49	383.07	0.83	380
Set 3	9.40	10.95	-0.69	40.44	0.70	380
Set 4	7.937	6.696	42.35	157.55	0.85	210

3 热化过程

本小组分别研究了 $1 \text{ GeV/u } ^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 、 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 和重系统 $^{139}\text{La} + ^{139}\text{La}$ 反应的热化过程. 为了对系统的趋平衡过程有一个形象化的图像, 图1给出了动量密度 $\rho_P(P_x, P_z)$ 随时间的演化. 可以看出, 初始时两核在动量空间完全分离, 通过剧烈的两体碰撞过程至 $t =$

15 fm/c 后, 两核在动量空间达到完全重叠, 此时系统已开始膨胀, 密度随之下降.

图2给出了在快度空间密度分布的时间演化过程. 与图1相应, 初始时有两个峰分别位于两核的初始快度处, $t = 8 \text{ fm/c}$ 时开始迅速填充小快度区, 到 $t = 15 \text{ fm/c}$ 时, 其快度分布形状类似于纵向平衡已基本达到.

为了研究平均场和碰撞项对热化过程的影响及达到的平衡程度对系统大小的依赖, 需要对平衡程度作较为定量的描述, 为此, 我们计算了动力学流张量随时间的演化. 动力学流张量定义为

$$T^{ij} = \int \frac{d^4 p d^3 x}{2m} p^i p^j f(x, p). \quad (1)$$

通常, 可将纵向和横向分量 T_{\parallel} 和 T_{\perp} 的相对差 $R = T_{\parallel} - T_{\perp} / T_{\parallel} + T_{\perp}$ 作为弛豫程

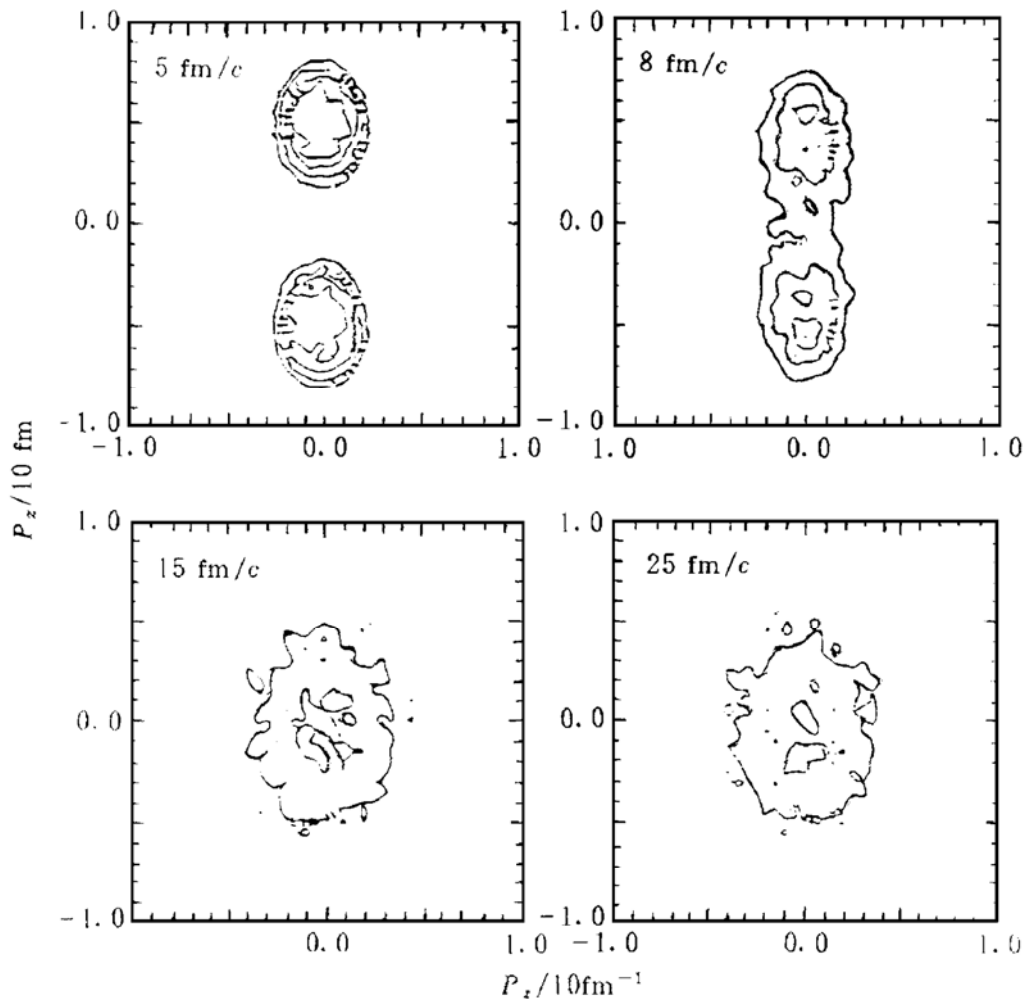


图1 $1 \text{ GeV/u } ^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}(b=0)$ 反应的动量密度分析 $\rho_P(P_x, P_z)$ 的时间演化

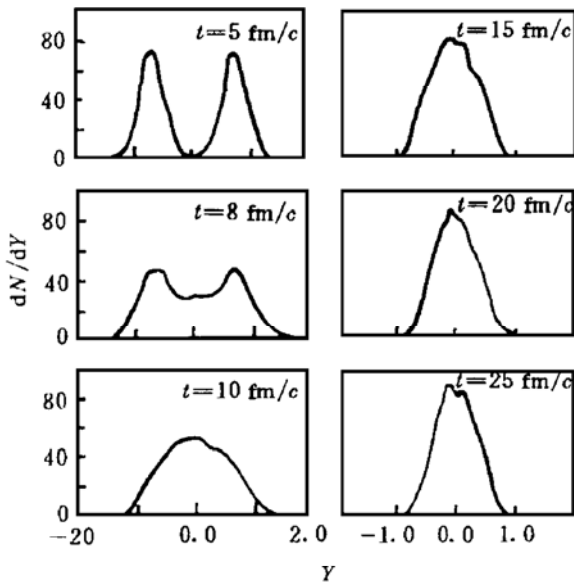


图2 快度空间的密度分布随时间的演化

度的测量量. 当 $R=0$ 时, 系统达到完全平衡, 而 R 越大偏离平衡越远. 图3给出了入射能量为 1 GeV/u 的 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 对头碰时动力学流张量的纵向分量 T_{33} 和横向分量 T_{11} 的时间演化. 图中曲线 a、b、c、d 分别为平均场参数 Set 1、2、3、4 加碰撞项的结果, e 仅考虑平均场, f 仅考虑碰撞. 可以看出, 在前 4 种情况中, 由于平均场和碰撞项的共同作用, 从 $t=5 \sim 10 \text{ fm/c}$ 时系统很快趋向平衡, $t=10 \sim 15 \text{ fm/c}$ 时 T_{33} 变化不大而 T_{11} 进一步缓慢上升, 随后随着密度的下降, T_{33} 和 T_{11} 不再变化. 很显然, 在不考虑碰撞项贡献的情况 (e) 下, R 值非常大, 说明两体碰撞在相对论重离子碰撞的热化过程中起主导作用. 同时由于平均场对反应动力学过程的影响, 系统的热化程度还与平均场有关, 态方程越软 (m^* 大和 K 小) 达到平衡的程度越高, 由于这一计算结果相应于 $b=0$ 的理想情形, 实际的碰撞所能达到的平衡程度要比图3给出的少得多.

为了研究重离子碰撞的热化程度和系统质量的关系, 我们分别研究了 1 GeV/u $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 和 $^{139}\text{La} + ^{139}\text{La}$ ($b=0$) 反应的动力学流张量的时间演化. 结果表明, T_{33} 和 T_{11} 的时间演化总的特征与 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 类似, 但系统达

到的热化程度则显示出与其质量大小有很密切的关系, 即系统越重达到的热化程度越高.

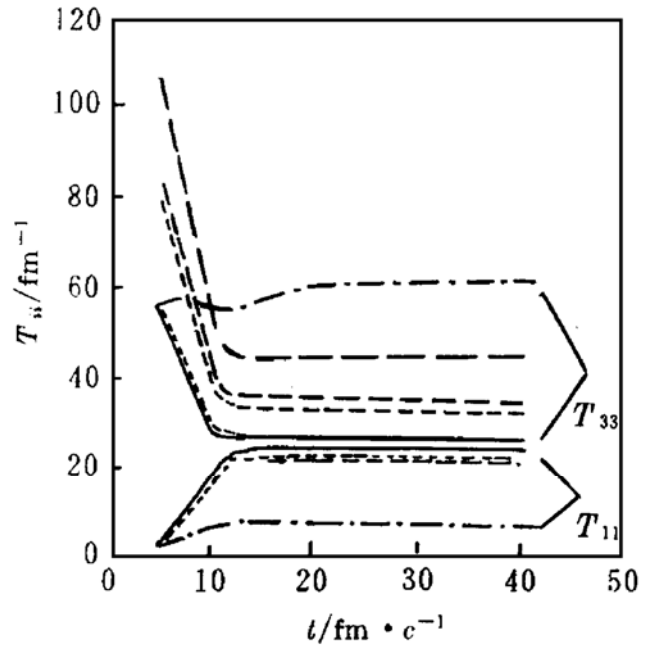


图3 1 GeV/u $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 反应动力学流张量随时间的演化

--- a, ... b, --- c, — d, -.- e, — f.

由于图3给出的结果是相应于 $b=0$ 的理想情形, 而实际的碰撞系统达到的平衡程度要比图中给出的小得多. 对于有限系统, 由于在 T_{33} 和 T_{11} 趋近平衡值时已开始膨胀, 密度随之下降, 此时两体碰撞数急剧减少, 从而不能进一步交换纵向动量和横向动量, 因而很难达到全局平衡. 随着系统的变重和维持高密度的时间增长, 达到平衡的程度也随之增大. 而对于两块核物质的碰撞, 由于密度保持不变, 系统就有可能达到完全热平衡.

4 局域平衡

为了便于定量描述局域平衡的程度, 我们将碰撞系统分成 5 个区, 即以质心为中心的 5 个同心圆壳 $r_1 \leq 2.5 \text{ fm}$ 、 $2.5 \text{ fm} < r_2 \leq 4.5 \text{ fm}$ 、 $4.5 \text{ fm} < r_3 \leq 7.4 \text{ fm}$ 、 $7.4 \text{ fm} < r_4 \leq 12.5 \text{ fm}$ 和 $r_5 > 12.5 \text{ fm}$, 研究各区内的平均横向动量和纵向动量之比

$$R_i = \frac{2}{\pi} \frac{\langle P_{\perp} \rangle_i}{\langle P_{\parallel} \rangle_i} \quad i = 1, \dots, 5$$

及随机运动动能与总动能之比

$$R_i^* = \frac{E_{\text{int}}(i)}{E_{\text{coll}}(i) + E_{\text{int}}(i)} \quad i = 1, \dots, 5$$

的时间演化. 此处, 不同于一般的做法, 在文献[2]中引入 R^* 作为 R 的补充. 现考察入射能量为 $1 \text{ GeV/u } ^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 对头碰时的情形(见图4), 平均局域密度

$$\langle \rho \rangle_i = \frac{\int_{V_i} \rho^2 dr}{\int_{V_i} \rho dr} \quad i = 1, \dots, 5$$

随着时间的演化过程. 从第1区中易见, 态方程越软, 达到的平均密度越大, 其最大密度为 $2 \sim 3\rho_0$; 在第2区中只有很小的压缩; 在第3区由于 r 增大只达到很低的密度. 图5给出了在 $1 \sim 3$ 区中 R 随时间的演化. 在中心区和在两

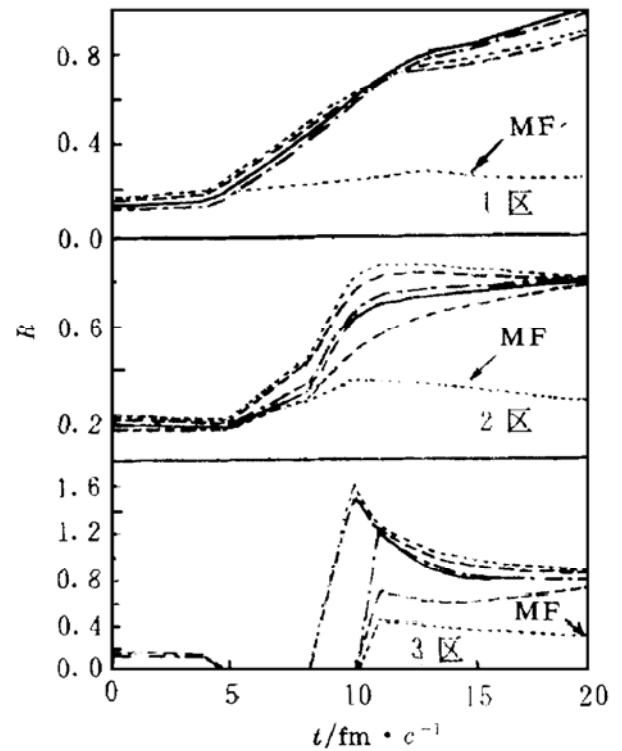


图5 反应同图4, $1 \sim 3$ 区的平均横向动量与平均纵向动量之比(质心系) R 随时间的演化 (各种曲线含意与图4相同).

核开始接触时, 由于两体碰撞数的增加, R 逐渐增加并在 $t \approx 12 \text{ fm/c}$ 后逐渐趋于饱和, 显然两体碰撞的贡献起着决定性的作用, 而对态方程的依赖却很弱. 与1区不同, 在第2区, 对包括平均场和两体碰撞而言, 在两核重叠之后 R 值剧烈增大, 然后趋于饱和值且对态方程显示出强烈的依赖. 对仅包括两体碰撞的情形, R 的行为与第1区相似. 第3区中, R 随时间演化显示出与第2区不同的特征. 由于 R 的行为包括了集体流的影响, 还需进一步计算 R^* . 图6给出了同一反应的 R^* 随时间的演化. 可以看出, R^* 随时间演化的行为在第1区和第2区中十分相似, 即两核重叠之后逐渐达到极大值, 然后随着系统密度的下降而逐渐下降; 但在第1区中, R^* 达到较高的值 ~ 0.8 , 而且保持较长时间; 第3区, R^* 只达很小的值, 仅 ~ 0.2 . 通过对 R 和 R^* 行为的比较之后, 在文献[2]中我们指出, R 值在压缩阶段之后达到的很大的值其实是一种径向集体运动的反映, 并不反映系统的热

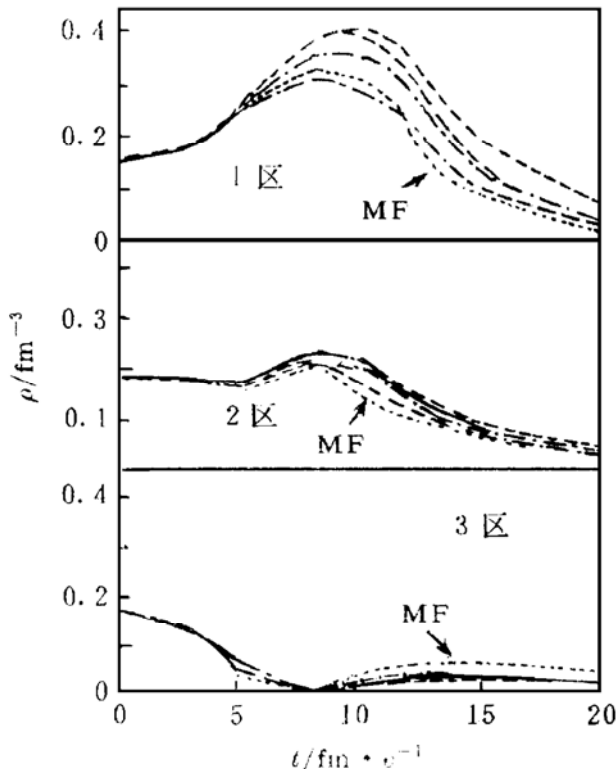


图4 $1 \text{ GeV/u } ^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ ($b=0$), $1 \sim 3$ 区的平均密度随时间的演化^[1,2]

实线指 Set4的结果, 点划线指 Set2的结果, 虚线 Set3, 点线 Set1(不考虑碰撞项的结果用 MF 指出), 长短划线指仅考虑碰撞项(没有平均场)的结果.

化程度, 这种径向运动其实就是在以后的实验中所证实的径向流. 综合 R 和 R^* 随时间演化的行为, 可以认为, 在中心碰撞中, 中心区基本达到局域平衡, 而在其它区则偏离局域平衡.

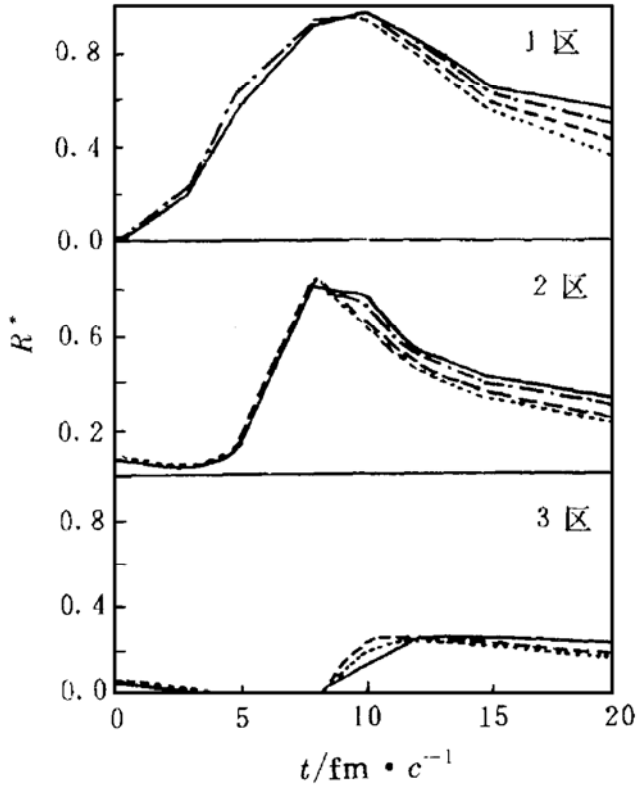


图6 与图4和图5同一反应, 1~3区的随机动能与总动能之比(质心系) R^* 随时间的演化
(各种曲线含意与图4相同).

与全局平衡类似, 局域平衡程度对体系的大小也显示出强烈的依赖关系, 即轻系统如 $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ 达到平衡的程度要低得多.

5 总结和讨论

从全局和局域2方面对相对论重离子碰撞进行了系统的研究. 快度分布的时间演化

表明反应的纵向平衡已基本达到, 但动力学流张量的时间演化则表明纵向和横向的平衡则没有完全达到. 由于平均场对反应动力学过程有明显的影响, 使得动力学流张量对态方程显示出依赖性.

通过局域的横向动量与纵向动量之比 R 及随机运动动能对总能之比 R^* 的时间演化研究了相对论重离子碰撞的局域平衡的程度. 研究表明, 对于中重核系统在中心区基本达到局域平衡, 而在边缘区则偏离平衡甚远; 达到平衡的程度与系统大小有着很密切的关系, 碰撞体系越重达到平衡的程度越高.

通过对1 GeV/u 能区重离子碰撞中动力学流张量及局域物理量 R 和 R^* 的时间演化行为的分析, 表明该能区重离子碰撞中平均场和碰撞项都具有十分重要的意义, 前者对反应动力学有着更为重要的作用, 后者对反应的统计行为起着决定性的作用, 中心区更多地反映统计行为, 而动力学行为则明显地在非中心区表现出来. 这些结论将有助于判断一些重离子碰撞模型的适用性.

参 考 文 献

- 1 Li Zhuxia, Zhuo Yizhong, Gu Yingqi *et al.* Equilibration in Relativistic Heavy-Ion Collisions with Relativistic VUU. Nucl Phys, 1993, A559: 603~616
- 2 Li Zhuxia, Zhuo Yizhong, Wu Xizhen *et al.* Further Studies of the Equilibration Process in Relativistic Heavy Ion Collisions. J Phys, G: Nucl Part Phys, 1994, 20: 1829~1840

Equilibration in Relativistic Heavy-ion Collisions

Li Zhuxia^(1,2) Zhuo Yizhong^{1,2)}

1) (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000)

2) (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The equilibration in relativistic heavy ion collisions for

(下转第261页)

(上接第241页)

systems $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$, $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ and $^{139}\text{La}+^{139}\text{La}$ is studied with RBUU theory. We have found that the mean field still plays a role in addition to the collision term in the equilibration process in relativistic heavy-ion collisions at energy around 1 GeV/u. For finite systems, the systems do not reach complete equilibrium. But at the center zone, the local equilibrium is almost reached.

Key words intermediate-high energy heavy-ion collisions equilibration time evolution