

# 相对论重离子反应的热化过程\*

李祝霞 茅广军 卓益忠

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

余自强

(南开大学物理系 天津 300071)

1993年2月4日收到

## 摘要

本文从相对论BUU理论出发研究了1 GeV/n能区重离子反应全局(global)和局域(local)平衡性质,计算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,有限核系统无论全局的还是局域的平衡均未能达到完全平衡,因而对有限核系统重离子反应基于完全热平衡概念的适用性值得怀疑。

**关键词** 相对论重离子反应,热化过程, RBUU.

## 1 引言

重离子反应提供了唯一的在实验室内研究远离基态的核物质性质的机会。但是实验室本身并不能直接得到热的高密核物质性质,只有通过适当的理论模型描述间接地获得,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反应的模型是基于重离子反应过程能很快达到热平衡的假设基础上的,于是一个非常基本的问题就产生了,即重离子反应果真能很快就达到热平衡了吗?系统的热平衡的程度和哪些因素有关?目前已有一些人研究这个问题,但不同的计算得到很不相同的结论。Frimen, Ivanov, Norenberg<sup>[1,2]</sup>等考虑了两核物质流当入射能量为1 GeV/n的情况,他们的结论是系统很快达到热平衡,由此得出结论,流体动力学模型假设是合适的;Randrup<sup>[3]</sup>考虑了同样的几何模型,用相对论Ueling-Uhlenbeck方程,理论计算得到了同样的结果。Cugnon<sup>[4]</sup> A. Lang<sup>[5]</sup>等分别用Monte Carlo和相对论BUU理论研究了<sup>40</sup>Ca + <sup>40</sup>Ca和<sup>43</sup>Nb + <sup>43</sup>Nb的碰撞,发现在入射能量为1 GeV/n情况下系统达不到热平衡。

他们的研究对1 GeV/n能区的重离子反应的热化程度的结论分歧很大,很可能表明

\* 国家自然科学基金资助。

达到平衡的程度与核系统的质量及能量存在一定的关系。另一方面在低能重离子反应过程中平均场对反应的动力学过程起着决定性的作用；当能量达到 ( $20\text{MeV}/n < \text{每核子能量} < 200\text{MeV}/n$ ) 时平均场和碰撞项两者均起作用,那么在相对论能量下平均场对动力学过程仍起作用吗? 本文就这几个非常基本的问题进行比较系统和认真的研究。

## 2 热化过程

### 2.1 理论模型及有效相互作用

在文献[6,7]中已经给出了我们的模型,考虑到  $\sigma$ - $\omega$  类型的有效拉氏量是目前认为比较成功的一种,也为了简化,本文先不考虑  $\pi$  介子场。

$$L = L_D + L_m + L_I. \quad (1)$$

$$L_I = g_s \bar{\psi}(x) \phi(x) \psi(x) - g_v \bar{\psi}(x) \gamma_\mu \psi(x) V^\mu(x).$$

其中  $L_m$  与  $L_D$  分别为自由介子、核子场拉氏密度,  $L_I$  是相互作用拉氏密度。在我们的模型中平均场和碰撞项是根据同一拉氏量推导的,整个 BUU 方程可表示为

$$\begin{aligned} & \left\{ \partial_x^\mu - \sum_{\text{HF}}^\mu(x, p) \partial_x^\mu - \partial_p^\nu \sum_{\text{HF}}^\mu(x, p) \partial_x^\nu \right\} \frac{P_\mu}{m^*} \\ & + [\partial_x^\nu \sum_{\text{HF}}^s(x) \partial_x^\nu - \partial_p^\nu \sum_{\text{HF}}^s(x, p) \partial_x^\nu] f(x, p) \\ & = \frac{1}{2} \int \frac{d^3 p_2}{(2\pi)^3} \sigma(s, t) v [F_2^0 - F_1^0] dQ, \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\sum_{\text{HF}}^\nu(x, p) = \partial_x^\nu \sum_{\text{HF}}^\nu(x) - \partial_x^\nu \sum_{\text{HF}}^\mu(x). \quad (3)$$

$\sum_{\text{HF}}^s(x, p)$ ,  $\sum_{\text{HF}}^\nu(x, p)$  是自能项的标量和矢量部分, H、F 分别表示 Hartree 和 Fock

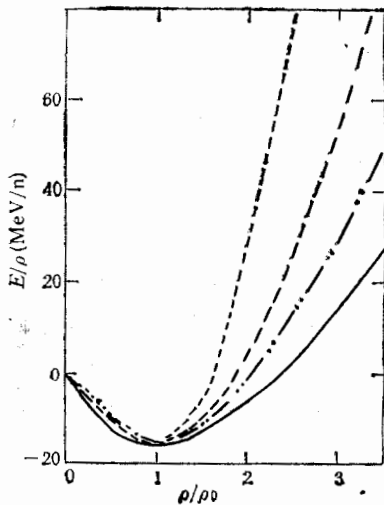


图1 表1所列各组耦合常数对应的核态方程

项;截面  $\sigma(s, t)$  和自能项的表达式在文献[6]中给出。采用试验粒子方法计算  $f(x, p)$  的时间演化, (2) 中碰撞项的计算采用了 Monte Carlo 模拟方法。考虑到计算量,我们采用简化模型;即首先忽略了 Fock 项;其次,核介质内的核子-核子碰撞截面采用了 Cugnon 参数化,并考虑了 Delta 产生道。由于 Cugnon 参数化由符合自由核子-核子散射截面得到的,为了考虑介质效应,同时计算了  $\sigma_{\text{eff}} = 0.81, 0.64, 0.45 \times \sigma_{\text{free}}$  对结果的影响。表1给出数值计算中所采用的耦合常数和相应的核物质的饱和和性质。

这四组耦合常数相应的态方程在图1给出,这几组参数分别来自文献[3]和[5]。我们看出态方程和有效质量  $m^*$ , 和压缩系数  $K$  两者都有关系,这一点与一般的非相对论计算情况不一样,在非相对论情况

下如果不考虑动量相关则态方程仅和  $K$  有关。

表 1

	$g_s$	$g_v$	$B$	$C$	$m^*$	$K(\text{MeV})$
set1	9.57	11.67			0.56	540
set2	6.90	7.54	-40.49	383.07	0.83	380
set3	9.40	10.95	-0.69	40.44	0.70	380
set4	7.937	6.696	42.35	157.55	0.85	210

## 2.2 热化过程

对于热化过程的描写分别观察了两种情况,一种是全局,另一种是局域情况。首先看一下全局情况,我们系统地研究了  $1\text{GeV}/n$   $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  对头碰情况,然后通过与轻系统  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$  和重系统  $^{139}\text{La} + ^{139}\text{La}$  相比较研究热化过程与系统质量的关系。

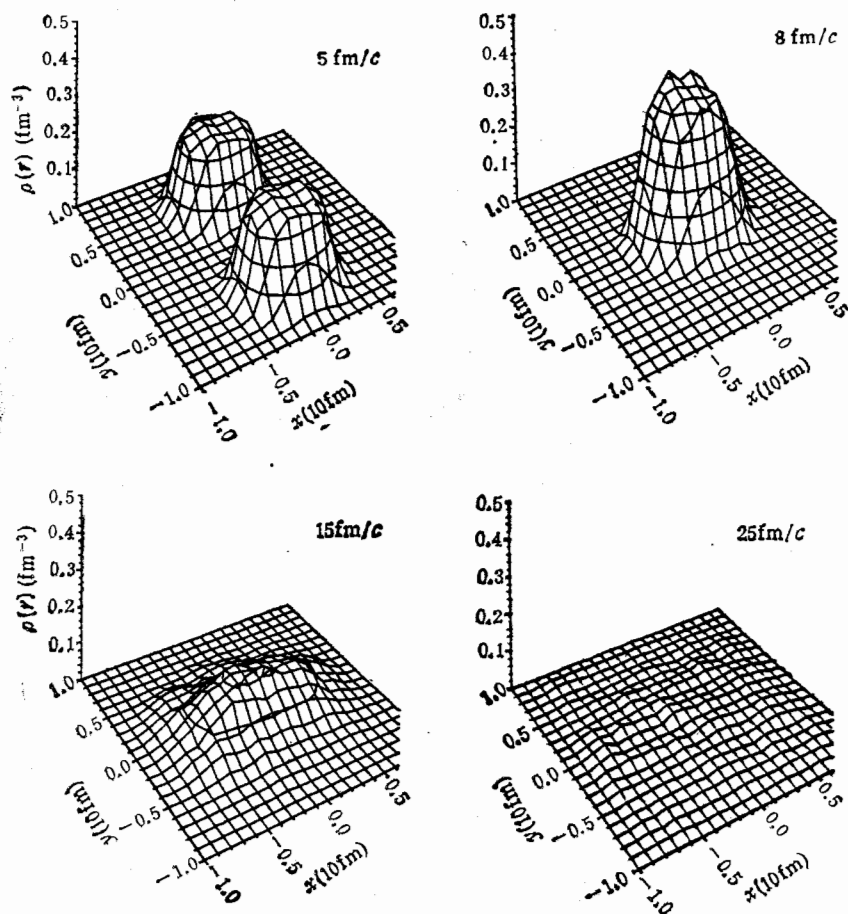


图 2  $1000\text{MeV}/n$   $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  反应重离子密度的时间演化过程

图 2 和图 3 给出在平面的重子数密度  $\rho(x, 0, z)$  和动量密度  $\rho_p(p_x, p_x)$  随时间的演化过程,初始时两核在坐标空间和动量空间完全分离,当  $t = 5\text{fm}/c$  时两核在坐标空间部分重叠;当  $t = 8\text{fm}/c$  时两核在坐标空间完全重叠,这时两个重叠的核系统在  $z$  方向的

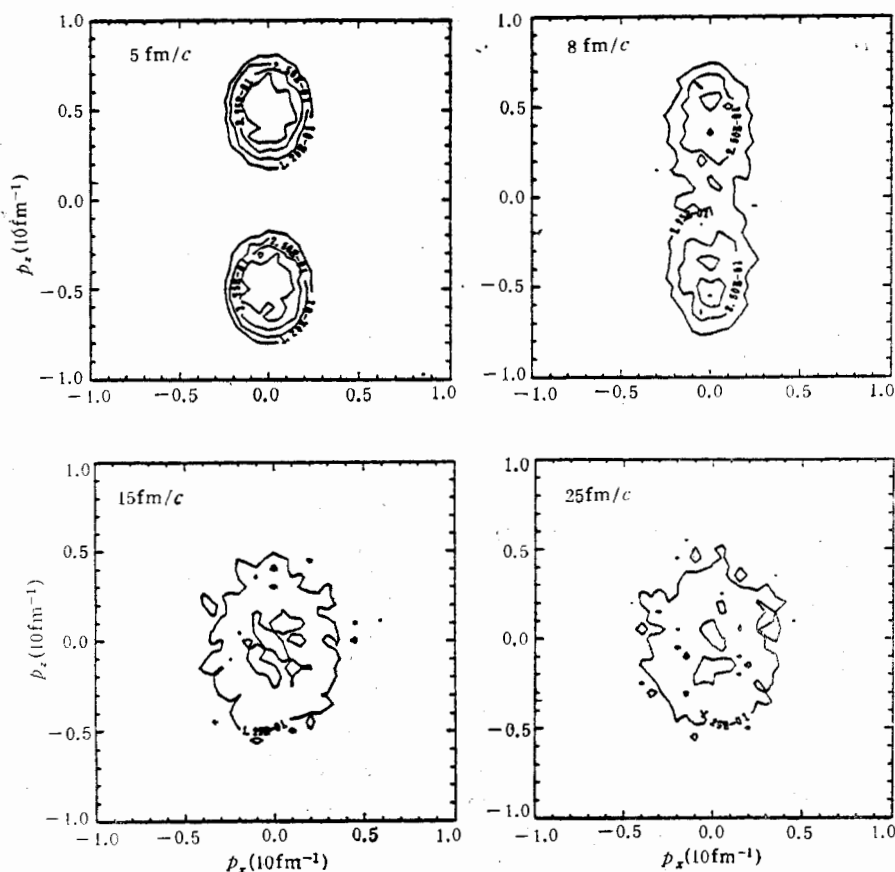


图3 图2同一反应的动量空间分布  $\rho(p_x, p_z, t)$  随时间演化过程

大小与一个  $^{40}\text{Ca}$  核类似,但  $x$  方向则略宽一些,直到  $t = 15\text{fm}/c$  时两核在动量空间才达到完全重叠,此时坐标空间中系统已经开始膨胀故而密度开始下降。图4给出在快度空间密度分布的时间演化过程,与图3相应初始时有两个峰分别位于两核的初始快度处, $t = 8\text{fm}/c$  开始小快度区迅速填充,到  $t = 15\text{fm}/c$  时其快度分布形状类似于纵向平衡基本上已经达到。

为了研究平均场和碰撞项的作用及对达到的热化程度作较为定量的描写,计算了动力学流张量随时间的演化,动力学流张量定义为

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

$T_{\parallel}$  和  $T_{\perp}$  相对差  $R = \frac{|T_{\parallel} - T_{\perp}|}{T_{\parallel} + T_{\perp}}$  可以作为弛豫程度的测量量。当  $R = 0$  时系统达到完全平衡,  $R$  越大偏离热平衡越远。

图5给出动力学流张量分量的时间演化(在对头碰情况下  $T_{\parallel}$  即  $T_{33}$ ,  $T_{\perp}$  即  $T_{11}$ )。分别计算了六种情况,即 a), b), c), d) 四种情况分别由平均场参数 set1, 2, 3, 4 加碰撞项;第五种情况 e) 仅考虑平均场;第六种情况 f) 仅考虑碰撞项。可以看到在前四种情况中由于平均场和碰撞项的共同作用,从  $t = 5-10\text{fm}/c$  系统很快热化,  $T_{33}$  很快下降,  $T_{11}$  很

快上升;从  $t = 10-15\text{fm}/c$ ,  $T_{33}$  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。很容易看出情况 e), 即没有两体碰撞情况下, 其  $R$  值比其他五种情况要大得多, 这是由分布函数  $f(x, p)$  的时间演化所决定的, 在此种情况下, 两核在动量空间的分布  $\rho_p(p)$  始终保持分离, 而在坐标空间的分布  $\rho_r(r)$  则虽然在  $t \sim 5\text{fm}/c$  时重叠但继而又分开, 这和图 2、3 所示的演化过程有很大差别。说明碰撞项在相对论重离子反应的热化过程起主导作用, 同时除了碰撞项之外平均场对反应动力学仍起一定作用, 即系统的热化程度和平均场有一定的关系。态方程对于热化过程的影响可以通过比较 a) b) c) d) 四种情况来得到, 从四种情况比较中可以看到大的  $g_v$  相应于更大的  $T_{11}$ , 这是由于矢量介子交换给出类似洛伦兹力的作用, 作用越强

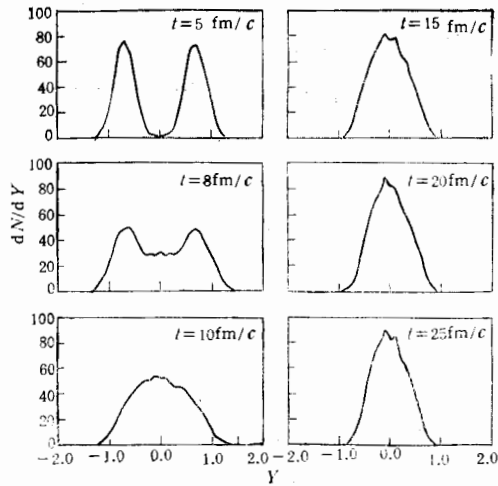


图 4 图 2 同一反应在快度空间的密度分布的时间演化过程

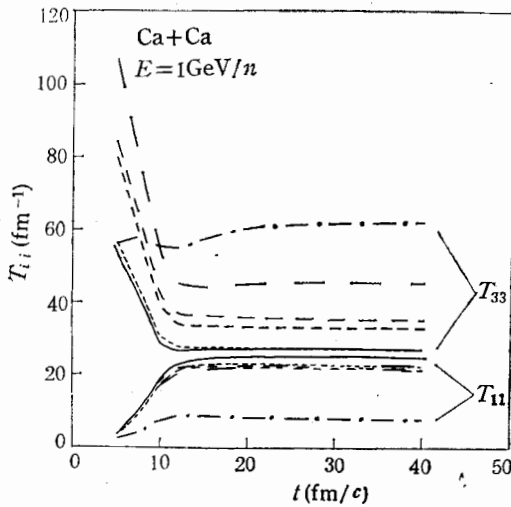


图 5 图 2 同一反应的动力学流张量的时间演化过程

—— a)                      d)  
 - - - - b)                      e)  
 - · - · c)                      f)

0.76, 当  $\sigma_{\text{eff}}/\sigma_{\text{free}} = 0.45$ . 结果表明介质效应对重离子碰撞可达到的热平衡程度有明显的关系, 也即正确考虑介质效应对正确了解重离子反应的热化程度是很重要的。

为了研究重离子碰撞的热化程度和系统质量的关系, 图 6, 7 分别给出  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$  和  $^{139}\text{La} + ^{139}\text{La}$  系统动力学张量的时间演化,  $T_{33}, T_{11}$  的时间演化总的特征和  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  相类似, 但很容易看出系统可达到的热化程度与系统质量大小有很密切的关系, 即系统越重

则粒子偏离入射轴越大, 故而  $T_{11}$  越大; 另外, b) 和 d) 两种情况有效质量相近而  $K$  相差很大, b) 和 c) 两种情况有效质量相差很大而压缩系数  $K$  相同, 我们发现 b) 和 d)  $T_{33}$  相近而 b) 和 c)  $T_{33}$  相差很大, 这说明  $T_{33}$  对有效质量依赖比对  $K$  依赖要强, 我们知道有效质量和  $g_v$  有密切的关系, 因此可以说重离子反应达到的热化程度对有效质量有着更密切的关系。

通过比较不同的  $\sigma_{\text{eff}}/\sigma_{\text{free}}$  比值下的  $T_{33,11}(\sigma_{\text{eff}})/T_{33,11}(\sigma_{\text{free}})$  值来考察两体碰撞的介质效应。对前面提到的三种情况比例分别为  $T_{33,11}(\sigma_{\text{eff}})/T_{33,11}(\sigma_{\text{free}}) = 1.11, 0.95$ , 当  $\sigma_{\text{eff}}/\sigma_{\text{free}} = 0.81$ ;  $T_{33,11}(\sigma_{\text{eff}})/T_{33,11}(\sigma_{\text{free}}) = 1.20, 0.89$ , 当  $\sigma_{\text{eff}}/\sigma_{\text{free}} = 0.64$ ;  $T_{33,11}(\sigma_{\text{eff}})/T_{33,11}(\sigma_{\text{free}}) = 1.41,$

达到热化程度越高;但对有限系统是否能达到  $T_{33}$  和  $T_{11}$  完全相等并维持不变则还不能完全肯定,因为在系统开始膨胀以后系统密度下降而随之核子-核子碰撞就急剧减少,从而不能进一步交换纵向和横向动量;而对于无限核物质由于在坐标方向的密度不变,系统很可能达到完全热平衡。

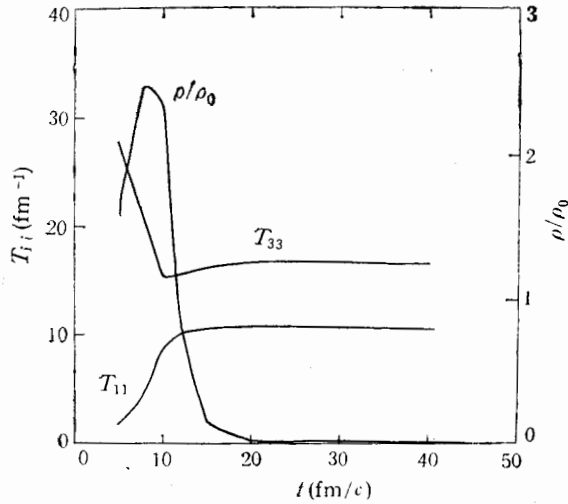


图6 1000MeV/n  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$  反应的动力学流张量的时间演化过程

$$R = \frac{\langle p_{\parallel}^2 \rangle - \langle p_{\perp}^2 \rangle}{\langle p_{\parallel}^2 \rangle + \langle p_{\perp}^2 \rangle},$$

图8给出  $R$  值随系统质量的变化,计算采用第四组耦合常数即软的态方程情况。由于系统质量不同,局域密度下降速度不同,重核下降要比轻核慢得多;  $R$  值选取在局域平均密度达到初始密度的  $\frac{1}{10}$  时刻,局

域平均密度定义为

$$\langle \rho \rangle = \frac{\int_{r < 10b} \rho^2 d\tau}{\int_{r < 10b} \rho d\tau}.$$

可以看到  $R$  值随系统质量的增大而变小。当  $A = 139$  时,  $R$  值已降到 0.1 左右;对  $\text{Au} + \text{Au}$  系统,计算得到  $R = 0.54$ ,看来对真正“有限核”来讲很难达到完全热平衡,这是由于一旦重离子碰撞达到膨胀阶段,对有限核系统来讲核密度急剧下降从而两体碰撞随之急剧下降。我们的计算表明 1GeV/n 能区重离子反应即使在中心区  $r < 10\text{fm}$  范围内局域平衡也未必能达到。

计算中考虑了  $\delta$  产生道,为了了解  $\delta$  粒子产生的作用分别比较有  $\delta$  产生和没有  $\delta$  产生的两种不同情况,结果发现  $\delta$  产生仅对减少纵向动量有明显的作用,而对横向动量的时间演化则没有明显的作用。

以上仅讨论了对头碰撞情况,计算给出了系统达到热平衡程度的上限,对于比较真实的情况我们计算碰撞参数  $b = 2$  的情况。对这种情况研究在一个以系统质心为圆心、半径为 10fm 的球内所包含的粒子的纵向和横向动量的差即

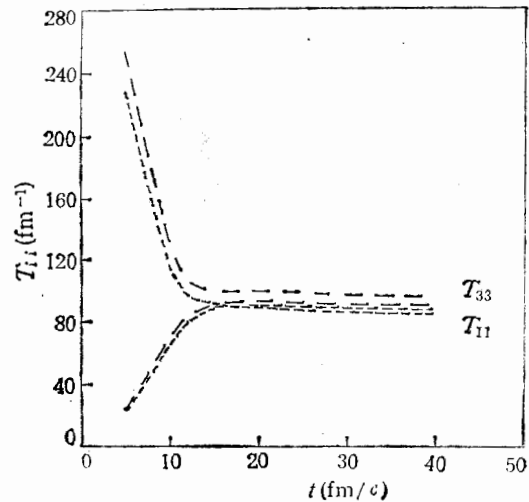


图7 与图6相同但系统为  $^{139}\text{La} + ^{139}\text{La}$  (--- c), (— d)

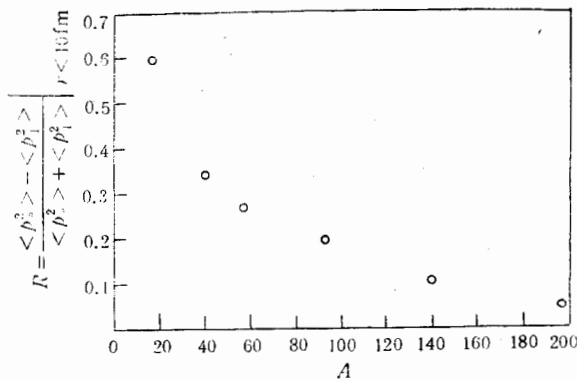


图 8 纵向和横向动量相对差随系统质量  $A$  的变化

### 3 总结讨论

从相对论 BUU 理论出发,研究了在 1GeV/n 能区重离子反应的热化过程,发现在这一能区平均场对反应动力学过程仍起相当的作用;达到平衡的程度与系统质量有密切的关系,越重的系统达到平衡的程度越高;对有限核系统特别是轻核和中等重量核系统无论局域的还是全局的热平衡均没有达到,在这种情况下基于热平衡的重离子反应模型的适用性值得怀疑。第二点是介质效应有很大的影响,说明完全自洽的计算对正确描写重离子反应动力学有着重大意义,这部分工作正在进行之中。

### 参 考 文 献

- [1] M. Cubero et al., *Zeitschrift für Physik*, **340**(1991) 185.
- [2] M. Cubero, M. Schonhofen, and B.L. Friman et al., *Nucl. Phys.*, **A519**(1990)345.
- [3] J.Randrup, *Nucl. Phys.*, **A314**(1979) 429.
- [4] Cugnon, T. Mizutani and J.Vandermeulen, *Nucl. Phys.*, **A359**(1981)505.
- [5] A.Lang, B.Blattel and V.Koch, *Z. Phys.*, **A340**, (1991)287
- [6] 余自强等,高能物理与核物理,**16**(1992)312.
- [7] Jin Xuemin et al., *Nucl. Phys.*, **A506**(1990)655.

## The Study of Equilibration in Relativistic Heavy Ion Collisions

Li Zhuxia Mao Guangjun Zhuo Yizhong  
(*Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

Yu Ziqiang  
(*Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)  
Received on February 4 1993

### Abstract

The equilibration in relativistic heavy ion collisions is studied with relativistic BUU theory. It is found that the mean field still play an important role in addition to the collision term of the equilibration process in relativistic heavy ion collisions at energy around 1GeV/n. The influence of the medium effects is studied. The light and medium systems do not reach complete equilibrium so that the concept based on the complete equilibrium is questionable for this case.

**Key words** relativistic heavyion collisions, equilibration procers, RBUU.