

# 重离子碰撞中的热化、膨胀和径向流\*

曾祥华 葛凌霄

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-12-27 收稿

## 摘 要

在 BUU 方程框架下讨论了中能重离子碰撞过程中的热化、膨胀和径向流。低能时, 由四极矩和密度分布的计算知道系统的整体平衡可以达到。对于能量较高时理论计算表明, 系统的整体平衡被破坏, 但局域平衡可以达到。同时计算还指出重离子碰撞过程中存在着径向膨胀。在 Skyrme 有效相互作用下, 讨论了状态方程对径向流的影响, 证明径向流对状态方程中有效质量较灵敏, 对压缩系数不灵敏。

**关键词** 重离子碰撞, 热化, 状态方程, 径向膨胀。

## 1 引 言

重离子碰撞中存在着一个能量阈, 在这个能量阈以下四极矩的计算给出  $Q_{zz}=0$ , 即系统的动量分布达到各向同性, 因此系统达到了热化<sup>[1]</sup>。而超过这一能量阈时, 四极矩分布  $Q_{zz}$  远远大于零, 整个空间的动量分布不是各向同性, 说明系统热化未能达到。低能时, 整体平衡可以保持, 但随着能量升高该平衡被破坏。因此用反应的最后阶段达到统计平衡的模型来描述重离子碰撞是不恰当的。但是否存在着局域平衡? 目前有关中能重离子碰撞中平衡的讨论还比较少, 它不同于复合核的研究, 无足够的实验结果, 如测量蒸发粒子的角分布是否各向同性<sup>[2,3]</sup>, 各个方向发射粒子几率是否相同。另外, 以达到统计平衡为假设的统计模型在描述物理观测量时可以很好地符合实验<sup>[4]</sup>, 这是否说明可以达到统计平衡。因此, 对中能重离子碰撞有关热化问题的讨论可以为统计模型等提供依据。

实验上对径向膨胀已有研究, 并且是目前比较热门的课题之一, 较早的实验是对 Au+Au(150MeV/u) 中心碰撞的研究, 在测量中等质量碎片的中等快度源<sup>[5]</sup>时, 发现这些中等质量碎片的单粒子平均能量作为  $Z$  的函数显示了集体膨胀, 膨胀能量占可利用能量的  $1/4$ <sup>[6,7]</sup>。

本文将讨论系统的热化问题, 局域平衡同状态方程、能量的关系。还将从理论上对

\* 国家自然科学基金和中国科学院 LWTZ-1298 部分基金资助。

系统的径向膨胀给出较直观的图象, 同时讨论状态方程对径向膨胀的影响.

## 2 模 型

基于的模型是单粒子分布函数服从 Boltzmann 方程的 BUU 模型. 在考虑非局域近似下的相互作用时, BUU 方程为<sup>[4]</sup>

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m^*} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} - \nabla_{\mathbf{r}} \cdot \sum^{\text{HF}} \cdot \nabla_{\mathbf{p}} \right) f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = I_{\text{coll}}, \quad (1)$$

$I_{\text{coll}}$  是 Uehling-Uhlenbeck 形式的碰撞项

$$I_{\text{coll}} = - \int \frac{d^3 p_2 d^3 p_{1'} d^3 p_{2'}}{(2\pi)^9} \sigma_{\text{NN}} v_{12} [f f_2 (1-f_{1'}) (1-f_{2'}) - f_{1'} f_2 (1-f) (1-f_2)] (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{p} + \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_{1'} - \mathbf{p}_{2'}), \quad (2)$$

其中  $v_{12}$  是碰撞核子的相对速度,  $\sigma_{\text{NN}}$  是核子-核子碰撞截面. 由于相互作用的非局域性, 有效质量定义为

$$m^*/m = \left( 1 + \frac{m}{p} \cdot \nabla_{\mathbf{p}} U \right)^{-1}. \quad (3)$$

它表示了平均场的动量依赖特征, 非局域近似下的平均场见文献[1].

## 3 结 果 讨 论

### 3.1 热化的讨论 —— 局域平衡

碰撞系统是否达到热化通常用以下标准来衡量: 发射中子的平均能量随时间的演化在一定时间以后是否平衡; 碰撞系统的重叠区密度随时间的演化在一定时间以后变化不大; 核子-核子碰撞数随时间演化保持不变; 动量分布四极矩随时间演化在 0 附近振荡.

用上述条件来判定系统的热化时, 常用动量分布四极矩  $Q_{zz} = \Sigma(2p_z^2 - p_x^2 - p_y^2)$  来判断.  $Q_{zz} = 0$ , 热化达到,  $Q_{zz} \neq 0$ , 热化未达到. 以前对对称系统 Ca+Ca 中心碰撞采用硬势的平均场讨论过系统的热化, 在  $E_{\text{lab}} \leq 50 \text{ MeV/u}$  时系统的热化可以达到, 超过这一能量域值以后, 热化就不能达到, 从密度分布值也可以看出, 超过这一能量阈以后, 系统就发生相变, 出现碎片. 但是超过这一能量阈以后系统的平衡是否一定被破坏, 局域平衡是否可以达到? 这里, 定义  $R_E = \frac{\Sigma(p_x^2 + p_y^2)}{2p_z^2}$ . 与四极矩的判据一样, 若  $R_E < 1$ , 系统未达到热化;  $R_E = 1$ , 热化达到.

在质心系中, 取  $R = R_0$ , 在  $R_0$  的球里讨论  $R_E$  的变化情况:

(1) 局域平衡对能量的关系. 讨论  $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$  中心碰撞, 取球的半径为 6fm, 入射能量  $E_{\text{lab}} = 70 \text{ MeV/u}$ . 已有的计算结果表明在此能量下<sup>[7]</sup>, 系统的整体平衡已经被破坏. 在质心系中, 坐标中心取  $R = R_0$ , 计算发现  $R_E$  在  $t=0$  时很小, 随着时间步长的延

长逐渐增大,  $R_E$  由小于 1 变成大于 1; 随后在时间的演化过程中在 1 附近振荡. 这说明在  $R_0=6\text{fm}$  的球里达到了平衡. 同样, 对  $R_0=2, 3\text{fm}$  进行的计算表明也有同样的结果. 这是因为在  $R_0=6\text{fm}$  的球里, 系统达到了热化, 因此, 在这个区域的更小的范围内系统也是处于热化状态的. 达到热化时间分别为 110、100、105 $\text{fm}/c$ , 在时间尺度上也是一致的. 由于平均场的涨落引起密度的涨落, 在能量较高时, 由于密度涨落较大, 这种密度涨落来源于平均场的涨落. 由于密度不均匀, 核子将由密度较高的区域扩散到较低的区域去. 同时入射能量高时引起 Squeezeout 碎片的动能分布也不均匀, 动量较高的碎片或粒子将被发射, 这些都破坏粒子的整体平衡. 但在粒子发射以后, 在一个小区域内一定时间以后系统将在小区域内处于平衡状态. 这就是局域平衡. 在不同能量时, 得到了热化时间, 分别对  $E_{\text{lab}}=50, 70, 90, 110\text{MeV}/u$  进行了计算, 它们对应的热化时间分别为 105、85、80、80 $\text{fm}/c$ , 随着能量的升高, 热化时间逐渐变短. 由上知道  $E_{\text{lab}}=50, 70\text{MeV}/u$  时热化时间相差较长, 这说明相变的区域不同于别的能量区域.

(2) 局域平衡对状态方程的关系. 采用能刻划核内部性质的平均场, 即能用有效质量和压缩系数描述的平均场. 对四种参数 SKA、SKM、SGOI、SGOII 进行考察. 前两组有接近的压缩系数不同的有效质量, 后两组有不同的压缩系数, 相同的有效质量. 所得到的热化时间, 也就是对应于  $R_E$  不小于 1 的时间尺度分别为 60、60、55、50 $\text{fm}/c$ , 可以看到结果没有较大变化. 也就是说热化对于状态方程并不灵敏.

### 3.2 膨胀和径向流

由流体动力学预言的集体流以两种方式出现. 一种是旁观者在反应平面上的侧流 (Side-slash), 另一种是参加者在垂直方向上的挤压 (bounce-off), 即各向同性的径向膨胀流<sup>[8]</sup>. 实验也表明了径向膨胀流的存在. 在此从理论上讨论径向膨胀, 并给出其图象. 碰撞中是否有膨胀, 这里可以从考虑中心球中粒子数随时间演化入手. 定义:

$$f = \frac{\text{中心球内核子数目 (freeze-out)}}{\text{中心球内核子数目 (极大压缩)}} = \frac{N_{\text{freeze-out}}}{N_{\text{max}}} \quad (4)$$

对入射能量  $90\text{MeV}/u$   $^{93}\text{Nb}+^{93}\text{Nb}$  硬势中心碰撞, 取中心球半径为  $8\text{fm}$ , 由  $f$  随时间的关系 (图 1), 可以看到在  $t=30\text{fm}/c$  时, 系统达到极大压缩, 随着时间演化系统膨胀得

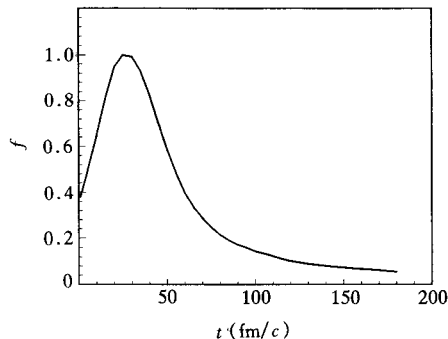


图 1 Freeze-out 时刻的粒子数同极大压缩时的粒子数之比  $f$  随时间的演化图

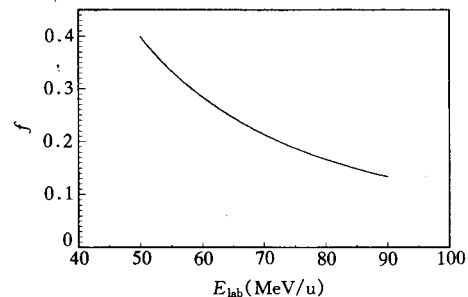


图 2 Freeze-out 时刻的粒子数同极大压缩时的粒子数之比和能量的关系

很快,并在  $t=80\text{fm}/c$  左右基本达到热化.同时对  $f$  与能量的关系也进行了计算(见图2).取  $R=6\text{fm}$  半径的球,对能量分别为 50、70、90MeV/u 进行了计算.随着能量的升高,  $f$  越小,膨胀也越大.

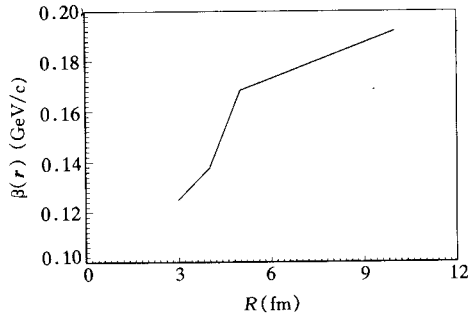


图3 径向膨胀速度同球半径的关系

大,速度越大,说明在半径为  $R$  的球里,中心区域里的速度小,边缘速度大.由此可以看到径向膨胀确实存在.

计算发现<sup>[9]</sup>径向能量对状态方程中的压缩系数不灵敏,这个结果与 M. A. Lisa<sup>[10]</sup> 所得结果是一致的.而径向膨胀能对有效质量很灵敏,有效质量越大,径向能越小;有效质量越小,势场的排斥性增大,因此径向膨胀也增大,反应在膨胀能上也较大.另外,与实验的比较发现,有效质量等于 0.8 能较好的符合实验.随着能量的升高径向能量增大.

## 4 总 结

综上所述,在重离子碰撞过程中,在相变能量以上,整体平衡被破坏,系统在一段时间后局域平衡可以达到.系统的热化对于状态方程并不灵敏.通过理论计算得出重离子碰撞过程中确实存在径向膨胀.这种径向膨胀对于状态方程中的有效质量比较灵敏,而对压缩系数并不灵敏.

## 参 考 文 献

- [1] Ge Lingxiao, Zeng Xianghua, Zuo Wei, *Phys. Rev.*, **C50**(1994)2129.
- [2] Moretto, L. G. et al., *Phys. Lett.*, **58B**(1975)31.
- [3] Poskanzer, A. M. et al., *Phys. Rev.*, **C3**(1971)882.
- [4] B. H. Sa, D. H. E. Gross, *Nucl. Phys.*, **A356**(1985)643; C. O. Dorso, *Phys. Rev.*, **C52**(1995)985.
- [5] J. P. Alard et al., *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992)889.
- [6] N. Herrmann, *Nucl. Phys.*, **A553**(1993)739c.
- [7] S. C. Jeong et al., *Phys. Rev. Lett.*, **72**(1994)3468; J. Barrette et al., *Phys. Rev. Lett.*, **73**(1994)2532.
- [8] B. Heide, H. W. Barz, *Nucl. Phys.*, **A588**(1995)918.
- [9] Zeng Xianghua, Ge Lingxiao, *Z. Physik*, **A354**(1996)317.
- [10] M. A. Lisa, S. Albero, F. Bieser et al., *Phys. Rev. Lett.*, **75**(1995)2662.

## Thermalization, Expansion and Radial Flow in HIC

Zeng Xianghua    Ge Lingxiao

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

Received 27 December 1995

### Abstract

The thermalization, expansion and radial flow are discussed in the processes of intermediate energy heavy ion collisions via BUU model. Our results show that at lower energies, the thermalization is reached for the collision system, but at higher energies the global thermalization is violated and only local equilibrium exists. The expansion process in the heavy ion collision at medium energies is also discussed.

**Key words** heavy ion collision, thermalization, EOS, radial expansion.