

# 中高能核反应中的热化\*

陆中道 萨本豪 郑玉明 王 辉 储自力  
(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘 要** 用微观动力学模型研究了中高能核反应中的热化. 对 830 MeV  $p+^{56}\text{Fe}$  和 35 MeV/u  $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  反应的研究表明, 反应系统基本上达到了统计热平衡. 发现两核碰撞过程中存在明显的横向流.

**关键词** 中高能核反应 热化 横向流

**分类号** O571.42

热化或趋平衡是中高能核反应中的一个基本问题. 一个高能入射核进入靶核, 从开始碰撞到最后形成很多粒子碎块. 在这一过程中, 如在压缩最大以后, 能否形成一个能量上达到统计热平衡的反应体, 一直是人们十分关注的问题. 80年代初, Gugnion 等<sup>[1]</sup>利用初末态关联首先研究了这个问题, 其后 Aichelin 等<sup>[2]</sup>利用 QMD 模型研究了出射粒子的快度分布, 结果都认为反应不够充分, 反应体未充分热化, 没有达到统计热平衡. 90年代初, Morreto 等<sup>[3]</sup>研究了入射能量为 60 MeV/u 的  $^{197}\text{Au}$  与  $^{27}\text{Al}$ 、 $^{51}\text{V}$ 、 $^{\text{nat}}\text{Cu}$  反应中二体至五体衰变谱, 发现衰变几率只跟“源”的激发能有关, 且具有  $E^{-1/2}$  线性依赖关系. 这说明“源”已经达到统计热平衡, 源的衰变和源的形成无关. 这种线性依赖关系也被其它一些实验所证实. 例如, Pouliot 等<sup>[4]</sup>在分析入射能量为 50 MeV/u 的  $^{197}\text{Au}+^{16}\text{O}$  实验时, 也发现了这个关系.

目前, 一些理论研究和实验测量大多假设在最大压缩以后反应体将达到统计热平衡. 例如瞬时碎裂模型<sup>[5]</sup>和温度测量都用到这个假设. 但反应体能否充分热化达到统计热平衡, 或多大程度上热化仍然是尚未得到很好解决的问题. 实验测量到的粒子是整个核反应过程中发射出来的粒子, 很难把它们按发射的时刻进行分解. 因此只能用动力学

模拟的办法进行研究.

本文用微观动力学模型(MKM)分别研究了质子入射和 Ca 入射下反应中的热化问题. 通过动量分量的平方随时间变化的演示和分析, 可以看出统计热平衡可以基本达到.

## 1 模型简介

类似于 QMD 模型, 微观动力学模型(MKM)的基本组成包括初始核子在原子核相空间中的分布、核内平均场的建立、核子或核子激发态在平均场中的运动、粒子之间碰撞以及泡里效应等.

所采用的初始核子在原子核坐标空间中的分布是 Woods-Saxon 分布, 动量分布是 Wigner 分布. 由此得到每个粒子的空间坐标和动量坐标分别为  $\mathbf{r}_{0i}$  和  $\mathbf{p}_{0i}$ . 考虑量子效应, 每个粒子都是具有下列形式的波包.

$$f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = N \cdot e^{-a^2(\mathbf{r}-\mathbf{r}_{0i})^2} \cdot e^{-(\mathbf{p}-\mathbf{p}_{0i})^2/\pi a^2}, \quad (1)$$

其中,  $N$  为归一化常数,  $a$  是波包的逆宽度(取为  $0.5 \text{ fm}^{-1}$ ). 核子有效相互作用包括 Skyrme 势、Yukawa 势和 Coulomb 势, 即

$$V_{ij} = V_{ij}^S + V_{ij}^Y + V_{ij}^C, \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned}
 V_{ij}^S &= t_1 \delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) - \\
 &\quad t_2 \delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k), \\
 V_{ij}^Y &= t_3 \frac{e^{-\mu|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}}{\mu|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}, \\
 V_{ij}^C &= \frac{Z_1 Z_2 e^2}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|},
 \end{aligned}$$

这里  $t$  和  $\mu$  是参数, 取自文献[6,7].

核内平均场是所有粒子相互作用的平均, 所有粒子都受到这个场的作用, 它们在这个场中的运动遵循牛顿运动方程

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}_i}, \quad \frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial \mathbf{r}_i}, \quad (3)$$

其中,  $H$  是哈密顿量. 当两个核子充分靠近, 距离满足  $|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| \leq \sqrt{\sigma_i(\sqrt{s})/\pi} \cdot (\sigma_i(\sqrt{s})$  是总截面) 时, 就能发生碰撞. 碰撞有两类: 弹性碰撞和非弹性碰撞. 它们包括  $N+N \rightarrow N+N$ 、 $N+N \rightarrow N+\Delta$ 、 $N+\Delta \rightarrow N+N$ 、 $N+\Delta \rightarrow N+\Delta$  和  $\Delta+\Delta \rightarrow \Delta+\Delta$  5 个反应道. 碰撞能否成功由 Pauli 效应决定, 为此引入 Pauli 阻尼因子来考虑此效应. 碰撞截面采用参数化的形式[8].

## 2 结果讨论

我们首先研究质子与  $^{56}\text{Fe}$  相互作用中的热化问题. 质子质心系的入射能量为 830 MeV. 考察系统动量分量的平方随时间的演化. 取对心碰撞,  $z$  方向为质子入射的方向. 为清楚地了解整个演化过程的细节, 可任意取一个事件来观察. 从图1看出, 开始时由于入射质子带进的大动量, 入射方向(纵方向)的动量平方要比垂直方向(横方向)2个分量大得多. 垂直方向的动量来自于初始费米动量, 比较小. 当  $t=10 \text{ fm}/c$  时, 质子开始进入靶核并发生碰撞. 可以清楚地看出, 只经过三次碰撞, 入射质子就已损失掉大部分动能, 而且动量从入射方向转移到垂直方向. 其间只经过大约  $4 \text{ fm}/c$ , 这段时间是剧烈碰撞阶段. 随后, 核系统热膨胀, 核子之间仍

有碰撞并交换能量, 但并不剧烈(是热碰撞和热能量交换). 此阶段一直持续到  $22 \text{ fm}/c$  时才有一粒子离去, 其间经历约  $8 \text{ fm}/c$ , 可将这一阶段分类作热膨胀阶段. 最后粒子逃离靶核, 是系统衰变和粒子逃逸阶段. 从整个碰撞过程和量的时间演化中可以看出, 在第1阶段, 入射质子的动能迅速转移到靶核, 反应系统趋向统计热平衡; 但在以后两个阶段, 入射方向的量始终比垂直方向的量大些, 表明能量的交换并不完全充分. 由此可以认为在第1阶段末, 反应系统基本上达到了统计热平衡——准热平衡, 然后系统经历热膨胀直到衰变解体.

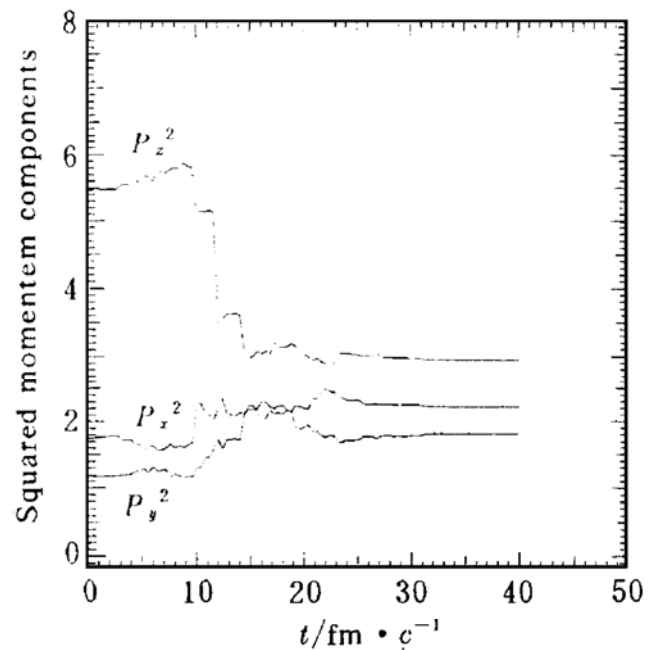


图1 830 MeV p+ $^{56}\text{Fe}$  对心碰撞中动量分量的平方随时间的变化

其次研究了  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  对心碰撞中的热化. 这是个对称反应系统, 入射能量为 35 MeV/u, 碰撞参数  $b=0 \text{ fm}$ . 动量分量的平方随时间的演化表示在图2中. 该图是 200 个事件平均的结果. 当  $t=15 \text{ fm}/c$  时, 两个核开始碰撞. 在其后的  $15 \text{ fm}/c$  的激烈碰撞中, 入射粒子的动能迅速地转移到靶核, 动量迅速地由入射方向(纵向)转移到垂直方向(横向). 可以看出, 当  $t=30 \text{ fm}/c$  时, 垂直方向的量突然由上升迅速转向下降, 这是有粒子从垂直方向被挤出核外引起. 这些粒子带走

了大量的横动量, 但没有带走多少纵动量. 粒子被挤出核外是在两个核碰撞压缩中核物质纵向压缩受阻, 只能从横向被挤出形成的横向流. 这一阶段持续了约 15 fm/c. 当  $t = 45$  fm/c 时, 横向流消失, 但能量继续从入射方向向垂直方向作少量转移, 直到 75 fm/c

系统衰变解体. 可以看出, 从开始的 30 fm/c 这段时间 ( $t = 15 \sim 45$  fm/c) 里, 反应过程异常激烈复杂, 有能量的激烈转移, 还有粒子发射和横向流. 这是激烈碰撞阶段. 其后的 30 fm/c ( $t = 45 \sim 75$  fm/c) 中, 虽然还有能量转移, 但已不很激烈, 是热膨胀阶段.  $t = 75$

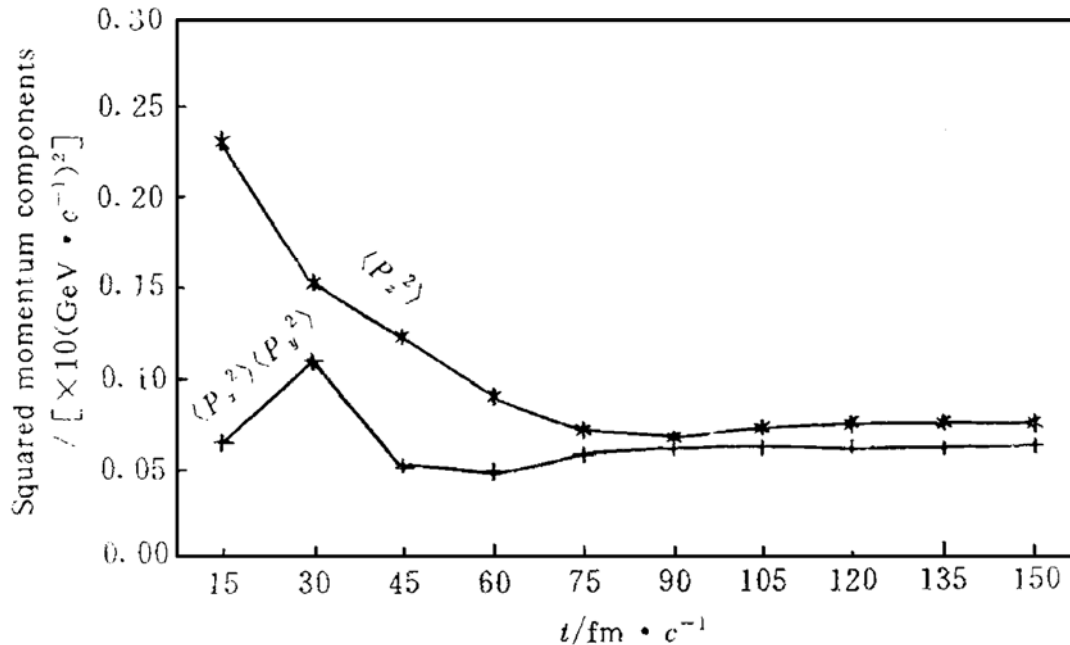


图2 35 MeV/u  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  ( $b = 0$  fm) 对心碰撞中动量分量的平方随时间的变化

fm/c 以后是系统衰变解体阶段. 从上面整个核反应过程的3个阶段的划分和讨论中, 可以认为: 第1阶段末反应系统基本上达到了统计热平衡, 但第2阶段和第3阶段纵方向的量仍比横方向的量大些, 表明这种平衡仍不完全充分, 因此是准热平衡.

### 3 小结

利用微观动力学模型研究了中高能核反应中的热化. 从 830 MeV  $p + ^{56}\text{Fe}$  和  $^{40}\text{Ca}$  ( $E = 35$  MeV/u) +  $^{40}\text{Ca}$  的对心碰撞中可以看出, 整个反应过程可以分成3个阶段: 激烈碰撞阶段、热膨胀阶段和反应系统衰变解体阶段. 在激烈碰撞阶段, 入射粒子动能迅速向靶核转移, 动量迅速从纵向转向横向, 并有粒子从横向被挤出核外, 形成横向流. 在这个阶段末, 系统基本上达到统计热平衡. 但在整个反应过程中, 即使是在第2阶段直至进入

第3阶段, 纵向动量始终比横向动量要大些. 因此这种统计热平衡是不完全的热平衡——准热平衡.

### 参 考 文 献

- 1 Gugnion J, Mizutani T, Vandermeulen J. Equilibration in Relativistic Nuclear Collisions. A Monte Carlo Calculation. Nucl Phys, 1981, A352: 505~534
- 2 Aichelin J, Peilert G, Bohnet A *et al.* Quantum Molecular Dynamics Approach to Heavy Ion Collisions: Description of the Model, Comparison with Fragmentation Data, and the Mechanism of Fragment Formation. Phys Rev, 1988, C37: 2451~2468
- 3 Moretto L G, Delis D N, Wozniak G J *et al.* Experimental Signature for Statistical Multifragmentation. Phys Rev Lett, 1993, 71: 3935~3938
- 4 Pouliot J, Beaulieu L, Djerroud B *et al.* Evidence for the Statistical and Sequential Nature of  $^{16}\text{O}$  Breakup into Four Alphas. Phys Rev, 1993, C48: 2514~2516
- 5 Sa Benhao, Zheng Yuming, Zhang Xiaoze. Modified Statistical Model for the Disassembly of Hot Nuclei

- Formed in Intermediate Energy Heavy-Ion Collisions. Phys Rev, 1989, C40: 2680~2683
- 6 Zheng Yuming, Sa Benhao, Zhang Xiaoze. Dynamical Feature of Medium Energy Heavy Ion Collision Processes. Chin Phys Lett, 1989, 6(3): 117~121
- 7 Aichelin J, Quantum Molecular Dynamics-A Dynamical Microscopic n-body Approach to Investigate Fragment Formation and the Nuclear Equation of State in Heavy Ion Collisions. Phys Rep, 1991, 202(5~6): 233~360
- 8 Bertsch G F, Das Gupta S. A Guide to Microscopic Models for Intermediate Energy Heavy Ion Collisions. Phys Rep, 1988, 160(4): 189~233

## Thermalization in Intermediate-high Energy Reactions

Lu Zhongdao Sa Benhao Zheng Yuming Wang Hui Chu Zili  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Abstract** Thermalization in intermediate-high energy reaction is studied by microscopic kinetic model. The calculations are carried out for reactions  $830 \text{ MeV } p + {}^{56}\text{Fe}$  and  ${}^{40}\text{Ca} (E = 35 \text{ MeV/u}) + {}^{40}\text{Ca}$ . The calculations show that the quasi-equilibrium can be reached. It is found that there is an obvious transverse flow in the nucleus-nucleus reaction process.

**Key words** intermediate-high energy reaction thermalization transverse flow

(上接第241页)

systems  ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca} + {}^{40}\text{La}$  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  $1 \text{ GeV/u}$ . 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