

中能重离子碰撞中的局域平衡讨论*

曾祥华 陈列文 张丰收 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 在BUU框架下,讨论了中能重离子碰撞过程中的平衡过程,以及相关的物理量,如集体流、温度、化学势.研究发现,一定时间以后达到局域平衡,且中心区域最先达到平衡,同时周边碰撞时也发现存在局域平衡.平衡时温度为5—7MeV.

关键词 重离子碰撞 局域平衡 费米分布

1 引言

研究中能重离子碰撞的主要目的之一是探讨高温、高压核物质的特点.但由于高压区域存在时间很短,高能核子将导致系统裂变,因此,在如此短的时间里推断系统的特征是个很大的挑战.另一方面,核物质状态方程的概念依赖于平衡或局域平衡,因此压缩的核物质是否到达热化显得也很重要.如果人们想利用流体动力学描述重离子碰撞中的动力学,局域平衡的研究也显得很重要.探讨热化的过程同时可得到有关热力学极限方面的知识.

研究热化的特点,如温度,实验上只能从未态粒子的分析中得到^[1-5],由于没有直接的方法知道压缩的核物质是否热化,因此只能从理论上利用不同的模型得到一些与热化有关的物理量.有关这方面的工作,利用BUU模型、量子分子动力学(QMD)模型以及它们的相对论扩展——相对论BUU和相对论QMD也有一些报道.但不同的模型给出的结论并不一致.传统的看法认为,低能时费米能以下平均场使核子束缚在一起,此系统能近似达到整体平衡,但随能量的升高核子-核子碰撞破坏了这种整体平衡.于是有关局域平衡的概念在重离子碰撞中被提出来^[6].文献[6]讨论了相对论重离子碰撞中的局域平衡,得到了平均场、有效质量、核物质不可压缩系数对局域平衡的影响.文献[7]对这一问题已有初步结果.本文就这一问题在中能区域,对50和90MeV/u Nb+ Nb碰撞系统进一步地给出计算结果.同时对局域平衡相关的温度和化学势也进行了讨论.

1998-12-21 收稿

* 中国科学院基金资助项目

2 模型

单粒子分布满足在相互作用局域近似下的 Boltzmann 方程^[6]

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \nabla_r - \nabla_p\right) f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = I_{\text{Coll}},$$

I_{Coll} 为 Uehling-Uhlenbeck 形式的碰撞项, 即

$$I_{\text{Coll}} = - \int \frac{d^3 p_2 d^3 p_1 d^3 p_2'}{(2\pi)^9} \sigma_{\text{NN}} v_{12} [ff_2(1-f_1')(1-f_2') - (1-f)(1-f_2)f_1'f_2'] (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{p} + \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1' - \mathbf{p}_2'), \quad (2)$$

v_{12} 是碰撞核的相对速度, $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ 是相空间单粒子的分布函数, σ_{NN} 是参数化的核子-核子碰撞截面. 本文只考虑 5 个反应道核子-核子、核子- Δ 、 Δ - Δ 弹性道以及 Δ 产生和 Δ 吸收. 相互作用势为

$$U = U_{\text{Coul}} + U_{\text{Sky}},$$

平均场 U_{Sky} 采用硬势

$$U(\rho) = -124 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) + 70.5 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^2$$

库仑相互作用

$$U_{\text{Coul}} = C_{\text{Coul}} \frac{1}{r}, \quad (5)$$

相空间密度 ρ 为

$$\rho = \int f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d^3 p, \quad (6)$$

ρ_0 为核物质正常密度 0.168 fm^{-3} . 计算中采用实验粒子和网格化方法, 网格尺寸为 1 fm , 时间步长为 $0.5 \text{ fm}/c$, 为使统计效果更好, 实验粒子数取 120.

3 讨论

3.1 局域平衡

通常人们利用如下两种方法判断平衡的概念: 一种是计算动量分布的各向同性, 即 $R = \frac{p_x^2 + p_y^2}{p_z^2}$, 动量与局域共动坐标系 (co-move system) 相关, 如果完全热化, 此时动量分布为各向同性 $R \approx 1$; 另一种是计算平均密度的变化, 即

$$\langle \rho \rangle = \frac{\int \rho^2 d^3 r}{\int \rho d^3 r}.$$

如果 $\langle \rho \rangle$ 在 ρ_0 附近振荡, 则系统到达平衡^[6,7]

本文中有关局域平衡的论述将通过研究流的变化(矩)进行讨论. 根据流体力学, 这种平衡与相空间的位置相关^[9]. 首先定义与方程(1)相关的矩

$$\psi_1 = m, \psi_2 = m\mathbf{v}, \psi_3 = \frac{1}{2}m|\mathbf{v} - \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)|^2, \quad (8)$$

质量密度

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \int d^3v f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \equiv \psi_1(\mathbf{r}, t), \quad (9)$$

动量密度

$$\rho(\mathbf{r}, t)\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \int d^3v \mathbf{v}f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \equiv \psi_2(\mathbf{r}, t), \quad (10)$$

动能密度

$$\frac{3}{2m}\rho(\mathbf{r}, t)k_B T = \int d^3v |\mathbf{v} - \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)|^2 f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \equiv \psi_3(\mathbf{r}, t). \quad (11)$$

其中, \mathbf{v} 为粒子速度, \mathbf{u} 为相对速度, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为核温度. 为研究局域平衡, 我们将空间分成不同的区域: I $(-2, 2) \times (-2, 2) \times (-2, 2)\text{fm}^3$, II $(0, 4) \times (0, 4) \times (0, 4)\text{fm}^3$, III $(0, 4) \times (0, 4) \times (4, 8)\text{fm}^3$, 并看其动量流的变化.

在 $t = 20\text{fm}/c$ 时, 碰撞系统已经开始压缩, 对区域 I (参加者), z 方向的相对动量分布比 x, y 方向动量更宽, 计算结果证实(如图 1 所示), 此时初始的平衡已被破坏. 区域 II 也是如此, 初始平衡已经被破坏. 对区域 III (旁观者), 从 $m(\mathbf{v} - \mathbf{u})$ 三分量都有相同的分布不难看出, 平衡应仍然保持.

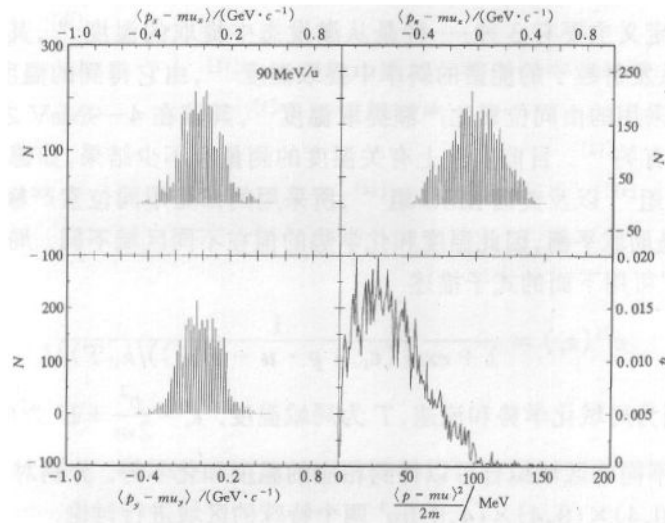


图1 $t = 20\text{fm}/c$, 在区域 $(-2, 2) \times (-2, 2) \times (-2, 2)\text{fm}^3$ 内, 相对动量 $m(\mathbf{v} - \mathbf{u})$ 在 p_x, p_y, p_z 方向的分布

在 $t = 75\text{fm}/c$ 时, 伴随着能量高的粒子发射, 激发能降低, 系统将可能趋向于平衡. 从图 2 给出的动量分布可以看出, 三分量的分布趋向一致, 即各向同性. 这说明在区域 $(-8, 5) \times (-8, -5) \times (3, 6)\text{fm}^3$ 平衡已经达到. 对中心区域也有同样的结果, 这表明区

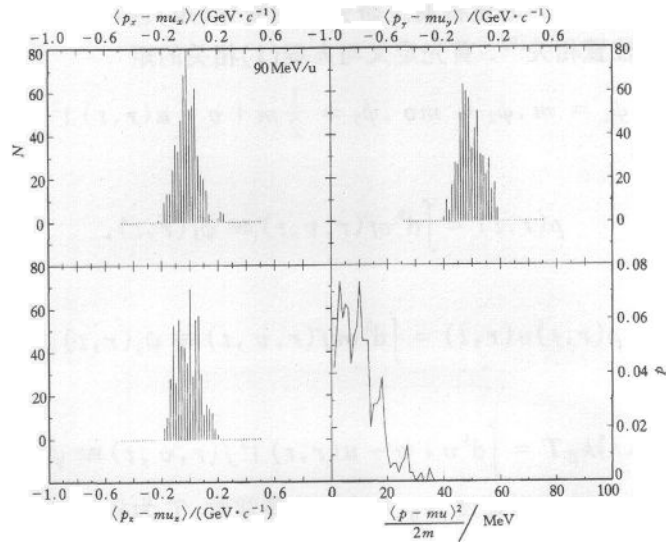


图2 $t = 75\text{fm}/c$, 在区域 $(-8, 5) \times (-8, -5) \times (3, 6)\text{fm}^3$ 内,
相对动量 $m(\mathbf{v} - \mathbf{u})$ 在 p_x, p_y, p_z 方向的分布

域平衡已经达到. 这些区域内平衡的达到, 是否表明整体平衡已达到? 为讨论这个问题, 我们将估计温度和化学势的大小.

3.2 温度

有关温度的定义主要有3种: 一种是从激发态中提取的温度^[10], 其值大约在5MeV左右; 第二种是从发射粒子的能谱的斜率中提取温度^[11], 由它得到的温度偏大; 第三种是目前实验上普遍采用的由同位素比产额提取温度^[3], 其值在4—9MeV之间, 与入射能量和同位素的选择有关^[12]. 目前实验上有关温度的测量有不少结果, 如德国 GSI Aladin^[12]组、法国 INDRA 组^[13]以及美国 MSU 组^[14], 所采用的都是用同位素产额比方法. 在本文中, 由于讨论的是局域平衡, 因此温度和化学势的值在不同区域不同. 局域平衡时的单粒子分布 $n^{1e}(\epsilon)$ ^[15] 可用下面的式子描述

$$n^{1e}(\epsilon_i) = \frac{1}{1 + \exp[(\epsilon_i - \mathbf{p} \cdot \mathbf{u} - \mu(r))/k_B T]}, \quad (12)$$

其中 μ 和 u 分别为局域化学势和流速, T 为局域温度. $\epsilon_i = \frac{p^2}{2m} + U$ 为单粒子能量, U 是势能. 用上式对不同的区域拟合可以得到相应的温度和化学势. 分别对 a: $(0, 4) \times (0, 4) \times (0, 4)\text{fm}^3$, b: $(0, 4) \times (0, 4) \times (4, 8)\text{fm}^3$ 两个特殊的区域进行讨论.

对 a 区域, 计算了不同时间步长的化学势和温度. 在 $t = 60, 65\text{fm}/c$ 时, 化学势和温度分别为 29MeV, 7MeV; 30MeV, 5MeV. $t = 70\text{fm}/c$ 和 $75\text{fm}/c$ 时, μ 和 T 的值相同, 分别为 30MeV, 6MeV. 如果考虑涨落和统计误差, 在 60—75fm/c 的时间范围里, 区域 a 已经处于平衡, 单粒子能量分布与费米分布近似, 由此得到的温度值为 5—7MeV. 同样对区域 b, 由图 3 中的单粒子能量分布可以得到化学势和温度随时间的变化关系. 在 $t = 60, 65, 70, 75, 80\text{fm}/c$ 时, 化学势分别为 19MeV, 22MeV, 24MeV, 27MeV, 29MeV; 温度分别

为 7MeV, 6MeV, 7MeV, 7MeV, 7MeV. 而在 85—95fm/c 的时间范围内, 化学势和温度都相等, 分别为 30MeV 和 7MeV, 图中只给出了 85fm/c 时的结果. 因此化学平衡要在 75fm/c 以后与中心区域的值相同, 即在 75fm/c 后化学势达到平衡. 由于在 60fm/c 时, 不同区域对应的化学势不同, 因此整体平衡没有达到. 从化学势的值可以看出, 中心区域的粒子分布较早地向费米分布靠近, 而边沿区域此时还有高能量的粒子, 分布与 Boltzmann 分布类似. 这是由于核的膨胀效应, 高能量的粒子发射使中间区域的温度降低, 最先处于平衡. 这说明平衡过程是从内向外, 与相对论能区的计算是一致的^[7], 但这种由内向外的平衡变化过程与入射能量有关. 在我们讨论的能区 (90MeV/u), 这种平衡的时间弛豫大约是 20fm/c. 由于相空间粒子数在反应的后期 (85fm/c) 非常少, 因此统计处理出现很大的困难, 但并不影响定性的讨论. 而对 50MeV/u 的碰撞, 区域平衡的时间延长, 并且动量分布的宽度要比 90MeV/u 的宽. 这是由于能量高时, 相互作用激烈, 能量耗散更大, 内部激发能转化为膨胀能, 使大量的轻粒子发射. 在 50MeV/u 时反映出非全熔合仍存在, 因此, 动量分布宽度更宽.

对系统入射能量为 50MeV/u 时的周边碰撞的情形也作了讨论, 即 $b = 5\text{fm}$, 得到在 $t = 150\text{fm}/c$ 局域平衡可以达到, 这与文献[16]的结果有所不同. 平均场和有效质量对热化的影响已在文献[7]中讨论, 对局域平衡也有相同的结果, 即平均场对局域平衡影响较大. 动量相关势增加了排斥性, 因此热化时间缩短, 达到局域平衡时间更早. 而同样在动量相关平均场下, 有效质量和压缩系数对局域平衡影响不大.

通过以上的研究得到了有关局域平衡的信息. 在 90MeV/u Nb + Nb 碰撞过程的后期, 核反应的现象是由局域平衡向平衡过程演化. 靶炮弹相互作用一开始, 初始平衡就已被破坏, 此时旁观者区域仍处于平衡状态. 随着时间的演化, 核子-核子碰撞使中心区域最先处于平衡, 而能量高的粒子发射破坏其它区域的平衡, 经过一段时间的弛豫由局域平衡向整体平衡过渡, 此时化学势为 30MeV, 温度为 5—7MeV. 这与实验上得到的温度^[12] 4—9MeV 相一致.

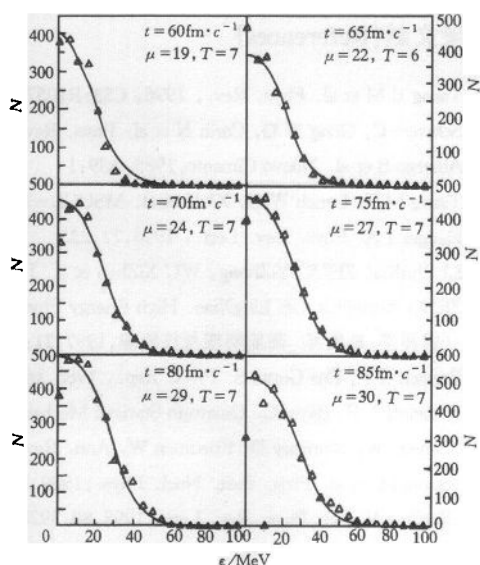


图3 能量为 90MeV/u, 区域 $(0, 4) \times (0, 4) \times (4, 8)\text{fm}^3$ 内不同时间步长时单粒子能谱分布随时间的变化关系
△ 计算结果, — 费米分布的结果.

参考文献(References)

- 1 Tsang B M et al. Phys. Rev. , 1996, **C53**:R1057
- 2 Schwarz C, Gong W G, Carin N et al. Phys. Rev. ,1993,**C48**:676
- 3 Albergo S et al. Nuovo Cimento,1985,**A89**:1
- 4 Tsang M B, Lynch W G, XI H et al. MSUCL-1035
- 5 Hauger J A. Phys. Rev. Lett. , 1996,**77**:235
- 6 LI ZhuXia, ZHUO YiZhong, WU XiZhen et al. J. Phys. G Nucl. Phys. ,1994,**20**:1829
- 7 ZENG XiangHua, GE LingXiao. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese),1997, **21**:157
(曾祥华,葛凌霄. 高能物理与核物理,1997,**21**:157)
- 8 Bertsch G F, Das Gupta S. Phys. Rep. , 1988,**160**:189
- 9 Kadanoff L P, Baym G. Quantum Statistical Mechanics, USA:the Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. 1962
- 10 Benson W, Morissey D, Friedman W. Ann. Rev. Nucl. Science, 1994,**27**
- 11 Surau E et al. Prog. Part. Nucl. Phys. ,1989,**23**:357—467
- 12 Serfling V et al. Phys. Rev. Lett. ,1998,**80**:3928; W. Trautmann for Aladin Collaboration. Thermodynamic Variables from Spectator Decay. In:14th Winter Workshop on Nucl. Dynamics. Snowbird, Utah,1998
- 13 MA Y G, Siwek A. Phys. Lett. ,1997,**B390**:47
- 14 XI H et al. Z. Physik, 1997,**A359**:397
- 15 Heiselberg H, Pethick C J, Ravenhall D G. Ann. Phys. (N. Y.),1993,**223**:37
- 16 ZHU F, Lynch W G, Bownann D R et al. Phys. Lett. , 1992,**B282**:299

Discussion on the Local Equilibrium in Intermediate HIC*

ZENG XiangHua CHEN LieWen ZHANG FengShou LUO YiXiao
(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Based on the BUU Model, the equilibrium process has been discussed in intermediate energy heavy ion collision, and some related physical quantities, collective flow, temperature and chemical potential have been discussed. Through our studies, we have found that the local equilibrium reaches at a certain time step. The local equilibrium begins from the central region. And for the peripheral collision, the local equilibrium has also been obtained. The temperature and chemical potential for the equilibrium is 5—7MeV and 30MeV, respectively.

Key words heavy ion collision, local equilibrium, Fermi distribution

Received 21 December 1998

* Project supported by Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences