

100MeV/u Au+Au 对心碰撞 中心集体流的发展*

郝鸿飞¹ 沈文庆² 诸永泰¹ 靳根明¹ 魏志勇¹

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

1996-06-26收稿

摘 要

用量子分子动力学(QMD)模型研究了100MeV/u Au+Au对心碰撞的时间演化过程,着重研究了各种物理量随时间的发展如何趋向平衡及freeze-out的条件.计算结果表明,对于100MeV/u Au+Au的对心碰撞,中心区的最高密度可以达到 $1.6\rho_0$,在达到最大压缩后,体系开始膨胀,并发展成一个与粒子位置相关的中心集体流.通过计算两粒子相对动量谱,可以将中心集体流与随机的热运动区分开来.研究了中心集体流与状态方程的依赖关系.

关键词 对心碰撞, 中心集体流, 量子分子动力学模型.

1 引 言

核物质状态方程是当前中高能重离子碰撞的主要研究对象之一^[1,2].核物质在极端条件下性质的研究一般是通过两个重核在中高能时的对心碰撞进行的.首先把核激发到很高的激发能,并压缩到一定密度,然后测量这个高温高密度体系的衰变及碰撞过程中生成的次级粒子,进而研究核的状态方程.这方面的实验研究工作基本上可分为两大类:一是高温高密度体系膨胀时产生碎片的能量、多重性、角分布等,即从所谓的多重碎裂过程来提取有关状态方程的信息^[1].二是在形成高密度核时,利用核子-核子之间激烈碰撞而产生的次级粒子来研究状态方程和粒子产生的介质效应^[2].最近在 GSI 的 SIS 加速器上开展的一系列实验发现,对于重核的中心碰撞存在一个中心集体流^[3,4].假定流的大小正比于碎片产生地点距中心的距离,则可以较好地解释实验发现的碎片平均能量与质量数无关的现象.由于这种现象是在极中心的碰撞条件下发现的,所以一般认为中心集体流来源于压缩效应,因此与状态方程可能有较大的关系.

* 国家自然科学基金资助.

QMD是用来描述中高能重离子核反应比较好的模型之一^[5],它适合于中高能重离子碰撞过程的研究.利用QMD对 $b=0\text{fm}$ 的100MeV/u Au+Au碰撞进行了模拟,研究了这一反应的时间演化过程.

首先对几种物理量随时间的变化如何趋向平衡进行了研究,从而找出 freeze-out的时间.通过讨论两粒子的相对动量谱,将粒子的集体运动成份和热运动成份区分开来,并研究了集体运动成份(中心集体流)与状态方程的关系.

2 用 QMD 计算 $b=0\text{fm}$ 100MeV/u Au+Au 反应时间演化过程

为了了解重系统对心碰撞过程中体系如何向平衡发展,采用QMD方法对100MeV/u Au+Au系统在碰撞参数 $b=0\text{fm}$ 进行了计算,着重研究了这一反应体系的时间演化过程.在计算过程中输出QMD模型^[5]计算的在不同时间弹核与靶核中每个核

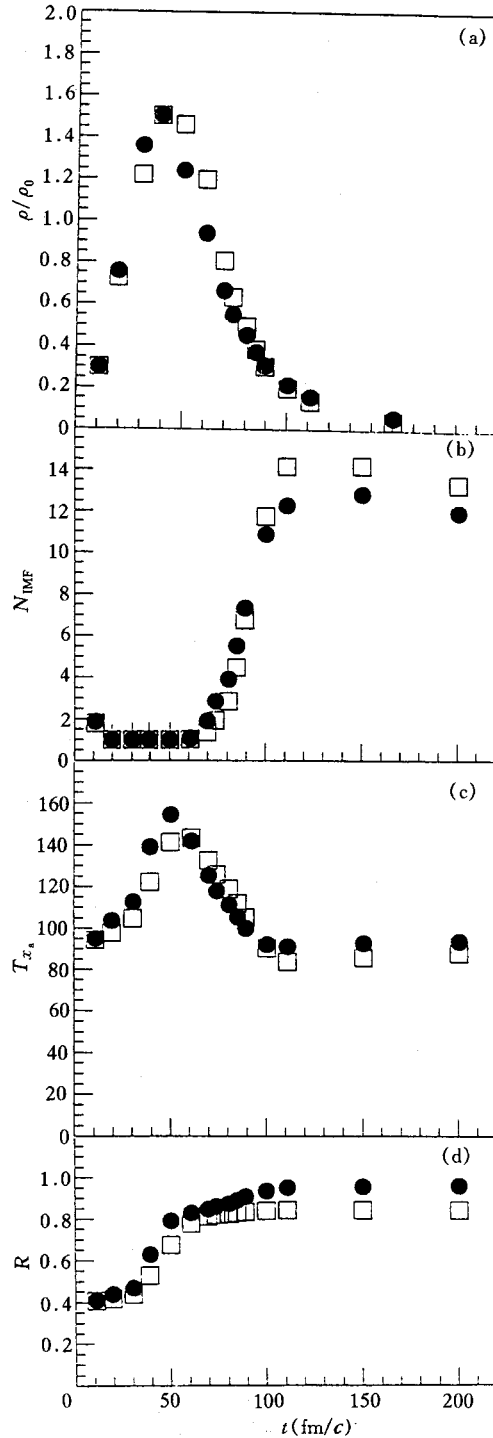


图1 $b=0\text{fm}$ 100MeV/u Au+Au碰撞中一些宏观量随反应时间的变化 (a)中心区密度随时间的演化关系;(b)IMF($A>4$)的多重数随时间的演化关系;(c)反应体系中最大结团核子动量分布宽度与时间的演化关系;(d)动量空间中非对称因子 R 随时间的演化关系.●表示硬态方程计算的结果;□表示软态方程计算的结果.

子的动量(p_x, p_y, p_z)及坐标(x, y, z), 然后进行分析处理, 并假设如果两核子的距离小于 3fm, 则这两个核子属于同一结团^[5].

为了研究体系趋向平衡的过程, 主要分析了以下几个物理量的变化规律. 图 1(a)给出了碰撞过程中心区密度随时间的演化, 当 $t \sim 40\text{fm}/c$ 时, 体系的压缩达到最大, 约为正常核密度的 1.6 倍, 然后体系开始膨胀. 图 1(b)为 $A > 4$ 的 IMF 平均多重性随时间的演化, 从图中可以看到 IMF 多重性在 $t \sim 60-100\text{fm}/c$ 内迅速增加, 100fm/c 以后基本达到平衡, 这反映出体系在 60—100fm/c 时间内发生了多重碎裂, 迅速分为几个 IMF 及轻粒子. 图 1(c)表示体系中最大结团核内的动量分布宽度 T_{xa} , 定义为:

$$T_{xa} = \sqrt{\sum_{i=1}^{A_{\max}} (V_{x_i} - \bar{V}_x)^2 / A_{\max}}, \quad (1)$$

其中 $\bar{V}_x = \sum_{i=1}^{A_{\max}} V_{x_i} / A_{\max}$, A_{\max} 表示最大结团核的质量数, V_{x_i} 表示属于这个结团中第 i 个核子在 x 轴方向的动量分量. 在计算过程中 z 轴为束流方向. 从图中可以看出当 $t < 40\text{fm}/c$ 时, 弹核和靶核连接在一起, 因此 $A_{\max} \sim 394$. 在 $t \sim 40\text{fm}/c$ 时, T_{xa} 由于体系内部核子经过多次碰撞达到最大, 而后体系膨胀并冷却, 在 100fm/c 后 T_{xa} 达到平衡, 这也说明在 100fm/c 后所形成的 IMF 基本上处于基态.

图 1(d)表示反应体系在动量空间的平衡情况, 非平衡因子 R 定义为:

$$R = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^A p_{x_i}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^A p_{y_i}^2}}{2\sqrt{\sum_{i=1}^A p_{z_i}^2}}, \quad (2)$$

其中 $A = 394$ 为体系的质量数. 从图中可以看到, 在 100fm/c 以后动量空间的分布基本上达到了平衡.

从图 1 的几个基本物理量随时间的演化关系, 可以看出反应大致可分为两个阶段. 在 40fm/c 以前体系中核子经过碰撞, 达到最高温度和最大压缩, 在 40—100fm/c 以内体系快速膨胀并产生出大量的 IMF, 表明发生了多重碎裂. 在 100fm/c 以后体系基本达到了平衡, 不再发生大的变化. 因此, 我们认为 freeze-out 发生在 100fm/c.

3 反应过程中热运动与集体运动

为了研究 $b = 0\text{fm}$ 的 100MeV/u Au + Au 在碰撞过程中集体运动与无规热运动随时间的演化, 将反应区域按不同的半径分为 4 个区(如图 2 所示). 从反应的中心出发以 30° 为锥角将反应区域切为区 I 及区 II, 对于同一事件, 我们计算两种动量谱: P 和 Q , $Q = |\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2|$, $P = |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|$, \mathbf{p}_1 表示区域 I 中的一个粒子的动量, \mathbf{p}_2 表示区域 II 中的一个粒子的动量, 这两个粒子处于同一半径区域之内. 为了研究热运动和集体运动对 P 及 Q 的影响, 首先作一个简单的蒙特卡罗模拟. 假定粒子分布在一个半径为 r_0 的球内, 其动量

分布为高斯型, 即 $f(p) \sim \exp\left(-\frac{p^2}{2\sigma^2}\right)$, 其中 σ 表示动量分布宽度. 现将这个球如上述方法进行分割, 计算得到了 $\sigma = 5\text{MeV}/c$ 时 P 谱和 Q 谱, 它们基本上重合.

再假定存在一个与半径成正比的集体流 P_0 且 $P_{ir} = P_0 \frac{r}{r_0}$, r_0 表示球的半径,

则每个粒子的动量 $P_i = P_{iT} + P_{ir}$ 其中 P_{iT} 表示热运动, 服从高斯分布. 图 3 给出了 P_0 分别为 0, 3, 5 及 $7\text{MeV}/c$ 时 P 及 Q 谱, 从图中可以看到存在集体流时 P

与 Q 谱是不相同的, Q 谱仅与热运动有关. 通过对这一简单的蒙特卡罗模拟结果的分析, 可以将无规热运动参量 T 表示为:

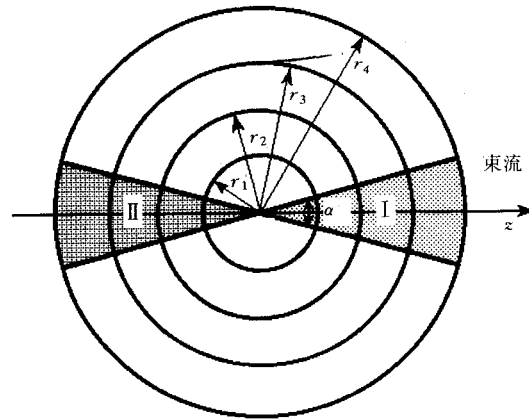


图 2 反应区域划分示意图

$$\alpha = 30^\circ.$$

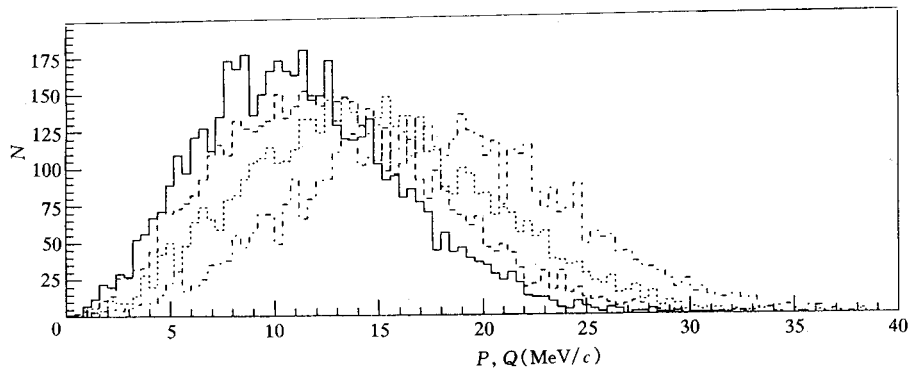


图 3 热源模型在 $\sigma = 5\text{MeV}/c$ 不同径向流时的 P 谱和 Q 谱

— $P_0 = 0\text{MeV}/c$, --- $P_0 = 3\text{MeV}/c$, $P_0 = 5\text{MeV}/c$, - · - · - $P_0 = 7\text{MeV}/c$.

$$T \doteq \frac{1}{2} \bar{Q}, \tag{3}$$

\bar{Q} 表示 Q 谱的平均值, 而集体运动分量 P_0 可表示为 $P_0 = \bar{P} - 2T$, 这里 \bar{P} 表示 P 谱的平均值.

用上述方法, 可以很好地将集体运动和无规热运动区分开来. 图 4 给出了 $t = 30, 60, 80\text{fm}/c$ 时的 P 与 Q 谱. 从图中可以看出, 在 $30\text{fm}/c$ 时由于弹和靶核的相对运动, P 和 Q 谱有很大差别, 在 $60\text{fm}/c$ 时, 由于核子经过多次碰撞, 动量空间基本上达到了平衡, 此时 P 和 Q 谱基本相同. 在 $80\text{fm}/c$ 时, 由于体系膨胀到了低密度区, 因此出现

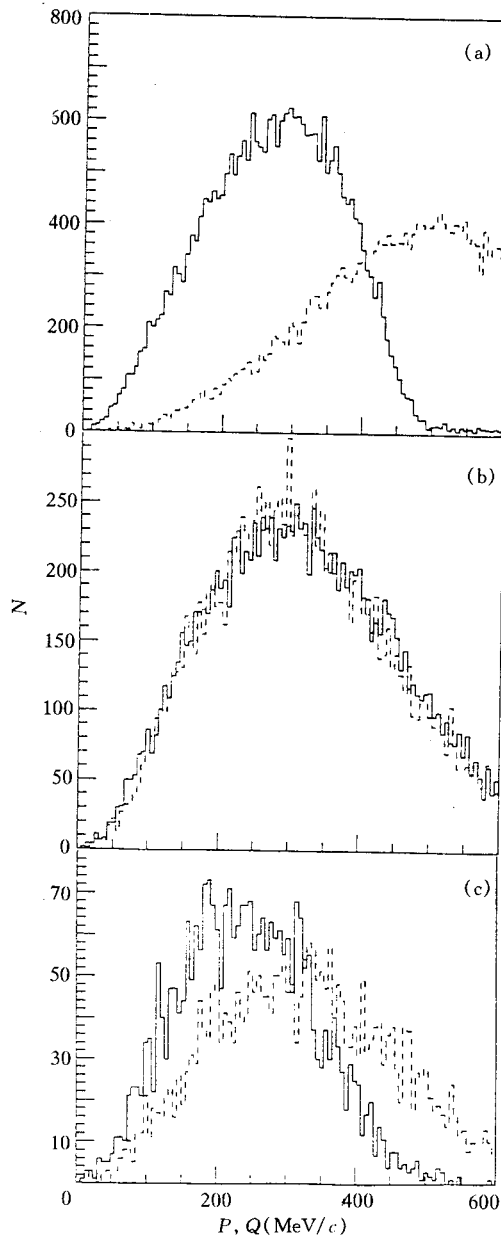


图4 用软态方程计算的 P 谱(虚线)和 Q 谱(实线)

(a) $t=30\text{fm}/c$; (b) $t=60\text{fm}/c$; (c) $t=80\text{fm}/c$.

系, 我们计算了 IMF 的平均能量及在质心系的角分布. 计算所得的 IMF 平均能量与电荷数的关系定性地拟合了实验数据, 平均能量与电荷数的关系受状态方程的影响也不大.

中心集体流是最近中高能重离子碰撞中发现的一个重要现象, QMD 模型的计算结果定性地拟合了实验数据. 在实验中由于探测器存在低能阈, 因此 IMF 的平均能量要高一些. 计算结果表明, 中心集体流在多重碎裂之前就已发展起来, 并对 IMF 有很大的影响, 在实验中得到的质心系的角分布将有助于状态方程的研究. 目前 GSI 正在开展这方

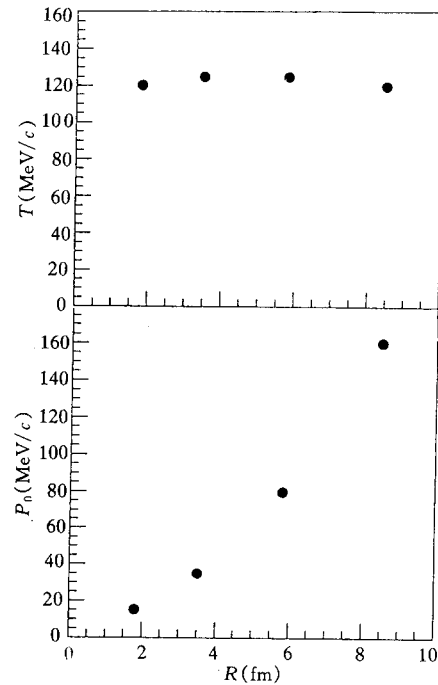


图5 用软态方程计算的 $t=80\text{fm}/c$ 时体系温度参量 T 及中心集体流 P_0 与半径的关系. 了一个中心集体流, 此时 P 和 Q 谱又变得不一样了. 注意到此时 IMF 多重性尚且不大, 体系仍为束缚在一起的一个大结团, 因此 P 与 Q 谱的差别反映了在这个大结团内核子在动量空间存在一个集体运动. 从图5中可以看出 T 与半径关系不大, 而中心集体流基本上正比于半径, 这与分析实验结果时所作的假设是一致的^[1].

4 结果与讨论

为了研究中心集体流与状态方程的关系,

我们计算了 IMF 的平均能量及在质心系的角分布. 计算所得的 IMF 平均能量与电荷数的关系定性地拟合了实验数据, 平均能量与电荷数的关系受状态方程的影响也不大.

中心集体流是最近中高能重离子碰撞中发现的一个重要现象, QMD 模型的计算结果定性地拟合了实验数据. 在实验中由于探测器存在低能阈, 因此 IMF 的平均能量要高一些. 计算结果表明, 中心集体流在多重碎裂之前就已发展起来, 并对 IMF 有很大的影响, 在实验中得到的质心系的角分布将有助于状态方程的研究. 目前 GSI 正在开展这方

面的实验研究, 在理论计算中引入动量相关势及核子-核子碰撞的介质效应来研究集体流是有意义的, 这方面的工作正在进行中。

参 考 文 献

- [1] H. Feldmeier, W. Nörenberg, Proceedings of the International Workshop XXII on Gross Property of Nuclei and Nuclear Excitation, 1994.
- [2] H. Feldmeier, W. Nörenberg, Proceedings of the International Workshop XXIII on Gross Property of Nuclei and Nuclear excitation, 1995.
- [3] S. C. Jeong *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 72(1994)3468.
- [4] G. J. Kunde *et al.*, GSI Scientific Report, 1993.
- [5] J. Aichelin, *Phys. Rep.*, 202(1991)233.

Development of Central Collective Flow in 100MeV / u Au + Au Central Collisions

Xi Hongfei¹ Shen Wenqing² Zhu Yongtai¹ Jin Genming¹ Wei Zhiyong

¹ (Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

² (Shanghai Institute of Nuclear Study, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Received 26 June 1996

Abstract

Using QMD model the time evolution of Au + Au system at 100 MeV / u is studied. For very central collisions the conditions for freeze-out and how the different physical quantities approaching equilibrium are investigated. The calculated results show that for 100 MeV / u Au + Au at $b = 0\text{fm}$, the maximum density can reach $1.6\rho_0$ and after that the system expands to a low density region. A position correlated central flow is developed during the expansion stage. By studying the two particle relative momentum spectrum it is able to separate central flow from random thermal motion. The dependence of this central flow on E. O. S. is also discussed.

Key words central collision, central collective flow, QMD model.