

熵产生、碰撞数和热核的形成过程*

刘建业 杨富中

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

同时考虑真实的动量相关势和介质中核子-核子碰撞截面来求解 BUU 方程。在入射能量 $E_L/A = 100, 200, 400$ 和 800MeV 时,系统地计算和分析了核反应 $\text{Ca}^{40} + \text{Ca}^{40}$ 在各种碰撞参数下的熵产生和碰撞数随时间的变化过程。结果表明:动量相关势和介质效应对熵和碰撞数的影响是明显的,而且这种影响对碰撞参数和入射能量的依赖比较敏感,特别是熵产生和碰撞数在各种条件下随时间的演化过程反映了热核形成的动力学过程。

一、引 言

在中高能重离子碰撞过程中有很大一部分相对运动动能被转化为原子核的热能,从而产生了高温、高密度的热核,并通过各种反应道进行衰变。这种热核的形成和衰变的动力学过程是当前重离子物理研究的重要课题。

为了研究热核形成的动力学过程,必须寻找和研究能够记忆热核形成的初期特性,即反映重离子碰撞动力学过程的初期阶段特征的物理量。重离子碰撞系统的熵正好是在重离子碰撞初期核物质被压缩阶段由于核子-核子碰撞而产生的。热核膨胀和冷却时虽然有部分热能转化为集体流,使得核温度下降,但熵没有明显的改变,即为绝热和等熵膨胀。尽管通过实验得到的熵是末态熵值,但仍然保持着对重离子碰撞初期阶段热核特性的记忆。碰撞数在核物质被压缩阶段迅速上升,在核物质的膨胀阶段迅速减少,所以,也能给出热核压缩和膨胀过程的信息。

重离子碰撞过程中的熵和碰撞数与平均场和核子-核子碰撞截面的特征密切相关,故在我们的计算中同时选择了比较真实的动量相关势和介质中的核子-核子碰撞截面。为了分别比较和分析这两种效应对熵和碰撞数随时间变化的影响,特别是这种影响随碰撞参数和入射能量的变化关系,我们还选用目前常用的软势和硬势以及自由核子-核子碰撞截面进行了计算和比较。具体来说,在入射能量 $E_L/A = 100, 200, 400$ 和 800MeV 及碰撞参数 $b = 1.0, 3.0$ 和 5.0fm 时,对于反应系统 $\text{Ca}^{40} + \text{Ca}^{40}$,通过数值方法求解 BUU 方程,并计算了熵和碰撞数随时间演化的值。

第二节分析了几种平均场和有效核子-核子碰撞截面的特征。第三节是计算结果的分析 and 讨论,最后为小结。

本文 1991 年 5 月 23 日收到。

* 中国科学院重大课题基金和中国自然科学基金资助。

二、BUU 方程中的动量相关势和介 质中核子-核子碰撞截面

1. 核子-核子碰撞截面

核子-核子碰撞截面的选用和计算与文献[1]同,其中介质中核子-核子碰撞截面包括弹性和非弹性碰撞截面。两类截面均随入射能量和在确定能量下核物质密度的变化而变化。在 1GeV 以下的能区,对于各种核物质密度,介质中核子-核子弹性碰撞截面均比自由核子-核子弹性碰撞截面要小。随着入射能量的增加,这两类截面的差别逐渐缩小。但在该能区介质中核子-核子非弹性碰撞截面均比自由核子-核子非弹性碰撞截面要大。随着入射能量的增加,介质中核子-核子碰撞和自由核子-核子碰撞的非弹性碰撞截面增加,而弹性碰撞截面都在减小。故在较低能区(小于 400 MeV),介质中核子-核子的弹性和非弹性碰撞总截面要比自由核子-核子碰撞的总截面小。随着入射能量的增加,情况将会颠倒过来,即入射能量超过一定值后,介质中核子-核子碰撞总截面比自由核子-核子碰撞截面大。所以,后面将会看到介质效应对各种物理观察量的影响在不同能区是截然不同的。

2. 动量相关的单粒子势

Wirringa^[2] 利用真实的哈密顿量计算了核物质中的单粒子势。哈密顿量同时包括单粒子势 (UV14) 和三核子相互作用 (TNI), 总称为 UV14 + TNI。用这种动量相关势可以很好地拟合核子-核子散射数据,给出合理的少体核结合能和核物质饱和特性,该势的参数化形式为:

$$U(\rho, K) = \alpha(\rho) + \frac{\beta(\rho)}{1 + [K/\Lambda(\rho)]^2}, \quad (1)$$

可用最小二乘法确定每一个密度 ρ 处的 α , β 和 Λ 值(可参考文献[2]的表 1)。其中

$$K = \frac{p}{\hbar},$$

p 为单核子的动量。

C. Gale 等人对包括 UV14 + TNI 在内的 4 种动量相关势^[3], 通过计算、分析和比较重离子碰撞的集体流和状态方程,认为 UV14 + TNI 是最为合理的一种动量相关势,故我们的计算选用了动量相关势 UV14 + TNI。同时为了系统地分析和比较在各种条件下这种势对热核形成的动力学过程的影响,我们选用了 Bertsch、Kruse 和 Das Gupta^[4]

表 1

	$A(\text{MeV})$	$B(\text{MeV})$	δ	$K(\text{MeV})$ (压力系数)
HBKD	-124	70.5	2	380
SBKD	-356	303	7/6	200
UV14 + TNI				260

提出的硬势 (HBKD) 和软势 (SBKD). 各种势的形式和参数如下:

$$U(\rho) = -A(\rho/\rho_0) + B(\rho/\rho_0)^6. \quad (2)$$

以上三种单粒子势在两种温度 $T = 40$ 和 80 MeV 时的状态方程即压力与核物质密度 $\frac{\rho}{\rho_0}$ 的关系如图 1 所示. 可以看出在 $\rho/\rho_0 > 1$ 时, 压力 P 的关系为:

$$P(\text{HBKD}) > P(\text{UV14} + \text{TNI}) > P(\text{SBKD}).$$

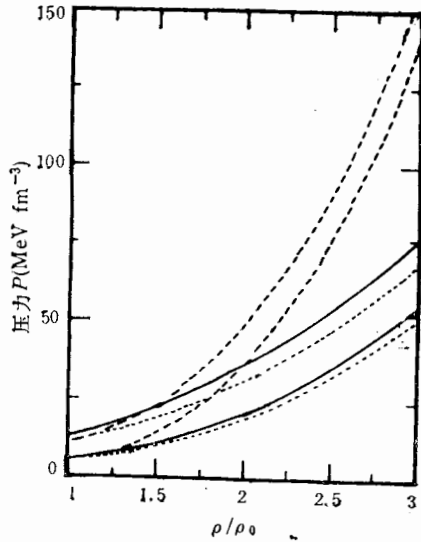


图 1 三种单粒子势 UV14 + TNI(—)、HBKD(---) 和 SBKD(.....) 的压力 P 与核物质密度 ρ/ρ_0 的关系曲线. 上面线对应于温度 $T = 80$ MeV, 下面线对应于温度 $T = 40$ MeV

三、计算结果和讨论

为了系统地比较和分析硬势 (HBKD)、软势 (SBKD) 和动量相关势 (UV14 + TNI) 以及有介质和无介质时的核子-核子碰撞对中、高能重离子碰撞动力学过程的作用, 我们计算了以下 4 种条件下的熵和碰撞数随时间的变化过程: (1) 动量相关势+自由核子-核子碰撞 (FP), (2) 动量相关势+介质中核子-核子碰撞 (MP), (3) 硬势+自由核子-核子碰撞 (FH), (4) 软势+自由核子-核子碰撞 (FS). 将单粒子势和核子-核子碰撞截面代入 BUU 方程中, 用蒙特卡罗模拟和试验粒子网格法求解 BUU 方程, 从而计算各种物理观测量.

熵的计算公式是:

$$S = -4 \int dr [f \ln f + (1-f) \ln(1-f)], \quad (3)$$

其中 f 是相空间填充数, 因子 4 是自旋同位旋引起的简并度, dr 是相空间体积元. 图 2(a) 给出了入射能量 $E_L/A = 200, 400$ 和 800 MeV, 碰撞参数 $b = 3.0$ fm 时反应系统 $\text{Ca}^{40} + \text{Ca}^{40}$ 在 4 种情况下的熵 S/A 随时间 t 的变化. 图 2(b) 给出了碰撞数的时间谱.

从图 2(a) 明显地看出: 1. 对所有情况来说, 在开始阶段熵 S/A 随时间 t 的增加而迅速增加, 到 $t = 10$ fm/c 附近, 熵随时间的增加突然变慢, 然后就逐渐趋向饱和值 (参看图 2(b)). 也正是在 $t = 10$ fm/c 附近或者稍后一些, 碰撞数到达极大值, 然后下降. 这种随时间的变化过程就反映了热核的形成和膨胀过程. 即在碰撞初期, 两个原子核以很快的速度相碰, 核物质被挤压在重叠区, 由于激烈的核子-核子碰撞, 相对动能转化为热能, 使碰撞系统的熵和碰撞数迅速增加. 同时, 根据费米气体理论, 熵 S/A 、温度 T 和激发能 E^* 之间有关系式:

$$E^* = aT^2 \text{ 和 } S = 2aT,$$

这里 a 是能级密度参数. 根据经验规律有 $a \approx A/8$ MeV, 即在碰撞初期随着核物质被压缩, 碰撞系统的激发能和温度很快上升, 随后碰撞数下降表明核系统在膨胀. 从系统膨

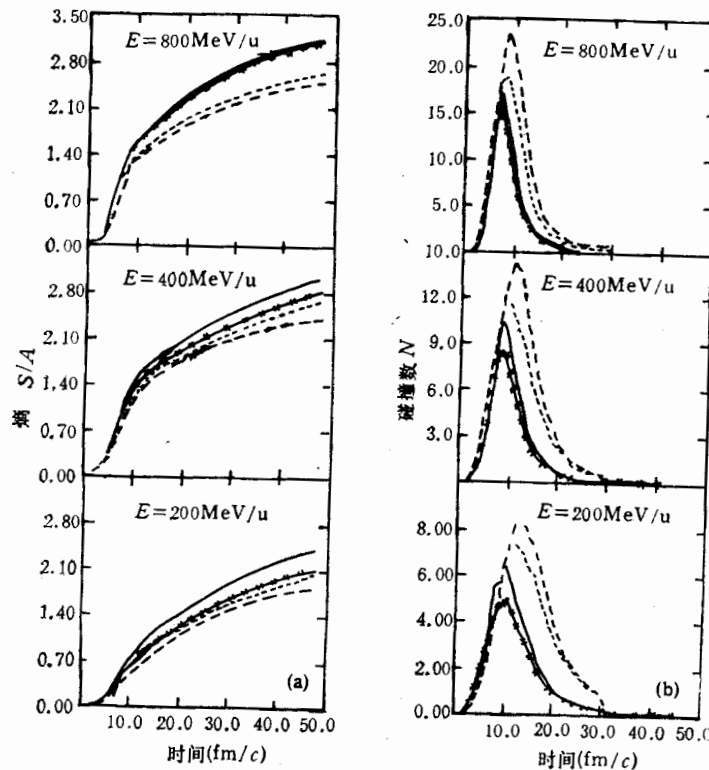


图 2

(a) 碰撞参数 $b = 3.0\text{fm}$ 时, 反应系统 $\text{Ca}^{40} + \text{Ca}^{40}$ 的熵 S/A 的时间谱
 ——FP FH ---FS +-+MP
 (b) 与(a) 相同情况下碰撞数
 的时间谱
 ——FP FH ---FS +-+MP

胀开始, 熵的增加速度变慢, 同时核温度下降。

2. 图 2(a) 的结果还表明, 在 3 种能量情况下, 不同条件下计算的熵有如下关系:

$$S/A(\text{FP}) > S/A(\text{FH}) > S/A(\text{FS}).$$

碰撞数的大小关系为:

$$N(\text{FP}) < N(\text{FH}) < N(\text{FS}).$$

这说明动量相关势比硬势和软势更有利于熵的增加和碰撞数的减少。但从图 1 中的几种状态方程来看, 在 $\rho > \rho_0$ 的密度区域, 对于确定的 ρ/ρ_0 , 有压力关系:

$$P(\text{FH}) > P(\text{FP}) > P(\text{FS}).$$

即尽管动量相关势的压力比硬势小, 但对于熵的增加来说更为有利。这表明动量相关势相对于这里所用的硬势增加了核物质的粘滞性, 增强了耗散, 减少了可压缩性, 故相对于硬势使得熵增加而集体流减少。

3. 图 2 还表明在 $E_L/A = 200$ 和 400MeV 时, 有:

$$S/A(\text{FP}) > S/A(\text{MP}),$$

$$N(\text{FP}) > N(\text{MP}).$$

即介质效应与自由核子-核子碰撞比较, 不利于熵和碰撞数增加。在 $E_L/A = 800\text{MeV}$ 处, 有:

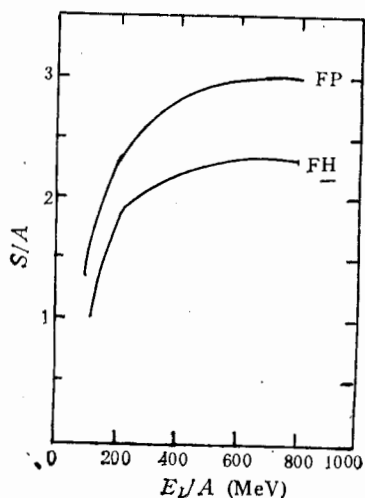


图3 熵 S/A 随入射能量 E_L/A 的变化关系

$$S/A(\text{FP}) \approx S/A(\text{MP}).$$

即在该能量处的介质效应对熵和碰撞数的影响不明显。对于集体流则有：

$$\frac{\langle p_x \rangle}{A}(\text{FP}) < \frac{\langle p_x \rangle}{A}(\text{MP}),$$

这些都表明介质效应对于重离子碰撞动力学过程的影响是随能量而变化的。在 $E_L/A = 200, 400 \text{ MeV}$ 时,使状态方程变软;在 $E_L/A = 800 \text{ MeV}$ 时,使状态方程变硬^[4]。

4. 图2b表明:碰撞数 $N(\text{FP})$ 和 $N(\text{MP})$ 与 $N(\text{FH})$ 和 $N(\text{FS})$ 比较, $N(\text{FP})$ 和 $N(\text{MP})$ 随时间的增加很快下降,使碰撞系统更快地膨胀和趋于平衡,表现出动量相关势和介质效应均有增大核物质粘滞性和加快耗散的作用,即增加了核物质的阻止本领。

5. 从图2可以看出碰撞数随入射能量的增加一直

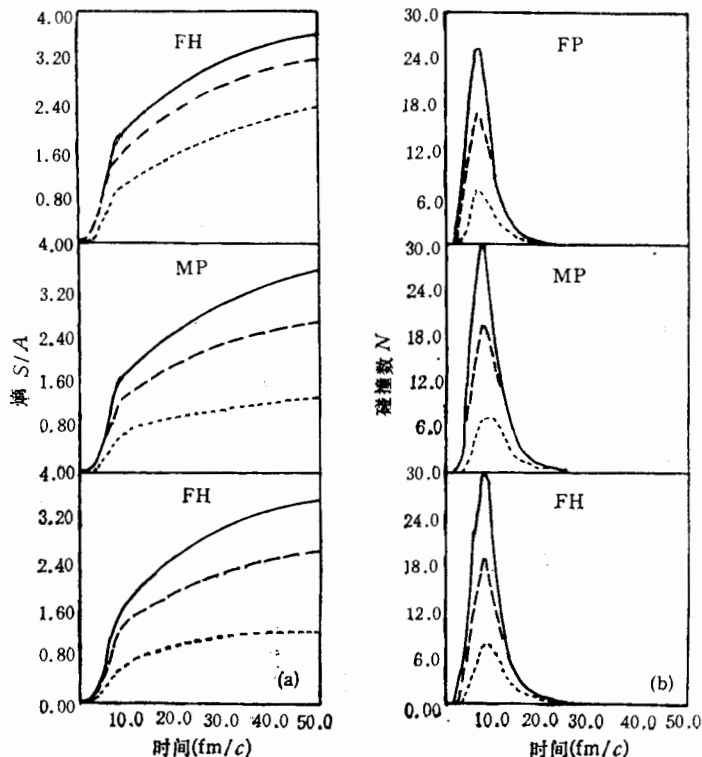


图4

(a) 反应 $\text{Ca}^{40} + \text{Ca}^{40}$ 在入射能量 $E_L/A = 800 \text{ MeV}$ 和不同碰撞参数 $b = 1.0 \text{ fm}$ (—)、 $b = 3.0 \text{ fm}$ (---) 及 $b = 5.0 \text{ fm}$ (.....) 时熵的时间谱

(b) 与(a)相同情况下的碰撞数的时间谱

在增加;但熵的最大值随入射能量的增加开始时很快,当增加到某个值后就开始变慢,直到趋向某个确定值.熵的最大值随入射能量的变化情况如图 3 所示.

6. 图 4 是熵和碰撞数随碰撞参数 b 变化的时间谱.可以看出,熵和碰撞数随碰撞参数的减小而增大.因为碰撞参数越小,碰撞重叠体积越大,核子-核子碰撞越激烈,碰撞数就迅速增加,熵也随之增大.

7. 我们的计算结果表明动量相关势对熵的影响是明显的,这与文献[6]中的计算结果显然不同.文献[6]的结论是:熵对动量相关势不灵敏.事实上,熵与核物质的输运特性如粘滞性、热传导等密切相关,而动量相关势明显地影响核物质的输运特性,自然也会影响熵的大小.

我们利用没有考虑涨落的 BUU 方程只能计算粒子的熵,并未计算碎片的熵.由于在进行数值计算时,相格大小的选取对于计算结果的影响较灵敏,加之时间关系未能进行仔细的调试,故熵趋于饱和过程的曲线形状不理想.但是仍能反映不同条件下的定性和相对关系,而且所得计算结果与实验观测值(大约 3—4)接近.要得到精确的计算结果和碎片的熵必须考虑粒子间的关联效应,同时在数值计算中选用的相格大小也需仔细调节.这些工作正在进行中.

四、小 结

从以上动量相关势和介质中核子-核子碰撞对熵产生和碰撞数的影响来看,对熵和碰撞数的研究可以为了解中、高能重离子碰撞中热核形成的动力学过程提供信息.

动量相关势(UV14 + TNI)与软势(SBKD)相比,有利于熵、碰撞数和集体流的增加,故有增加排斥作用和使状态方程变硬的性质.但是,动量相关势又不完全类同于硬势(HBKD)的作用.动量相关势与硬势相比,一方面有利于熵的增加,另一方面又使集体流减小.在碰撞系统的膨胀过程中,动量相关势使碰撞数更快地减少,也即使碰撞系统较快地趋于平衡.从这种意义上说,动量相关势提高了核物质的粘滞性,因而加速了耗散过程,减小了可压缩性.

介质效应对各种物理观察量的影响随入射能量而变.在 $E_L/A = 200$ 和 400MeV 时有使状态方程变软的作用;但当 $E_L/A = 800\text{MeV}$ 时则有使状态方程变硬的作用.在碰撞系统的膨胀阶段,介质效应使碰撞数较快地下降,也即驱使系统较快地到达平衡.这就说明,介质效应有提高核物质粘滞性的作用.

熵和碰撞数随入射能量的增加及碰撞参数的减小而增加,而且,熵的最大值随入射能量的增加开始时增加较快;当能量达到某个值时,熵的增加变慢,甚至可能趋向某个确定值.

参 考 文 献

- [1] 刘建业, 葛榆成, 葛凌霄, 高能物理与核物理, 15(1991), 71.
- [2] R. B. Wiringa, *Phys. Rev.*, C38(1988), 2967.
- [3] C. Gale, G. M. Welke, M. Prakash, S. J. Lee, and S. Das Gupta, *Phys. Rev.*, C41(1990), 1545.
- [4] G. F. Bertsch and H. Kruse, and S. Das Gupta, *Phys. Rev.*, C29(1984), 673.

- [5] 杨富中, 刘建业, *Annal Report of Institute of Mordern Physics, Academia Sinica*, (1990).
[6] J. Aichelin, A. Rosenhauer, G. Stoecker and W. Greiner, *Phys. Rev. Lett.*, 58(1987), 1926.

Entropy Production, Collision Number and the Forming Process of Hot Nucleus

LIU JIANYE YANG FUZHONG

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

ABSTRACT

The time processes of entropy production and collision number in intermediate energy heavy ion collisions were calculated by use of BUU equation with momentum dependence mean field and nucleon-nucleon collisions in the medium. The effects of momentum dependence mean field and nucleon-nucleon collisions in the medium on the entropy production and collision number are obvious and sensitive to impact parameter and bombarding energy. Especially these time processes reflect the properties of hot nuclear matter.