

中高能重离子碰撞动力学过程中的 核物质密度, 碰撞数和熵*

刘建业 葛愉成

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

该工作主要研究中高能重离子碰撞动力学过程中, 平均场和核子-核子碰撞(包括自由核子-核子碰撞和介质中核子-核子碰撞)对核物质密度、碰撞数和熵的影响, 以此来加深对原子核物质状态方程(EOS)的了解。为此我们在有介质和无介质条件下分别考虑软方程和硬方程, 数值求解 BUU 方程计算了 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 在入射能量 $E_L = 400\text{MeV}/A$ 的中心碰撞($b = 0\text{fm}$) 情况下各种物理量的时间谱。计算结果表明, 核物质空间密度主要决定于平均场, 受核子-核子碰撞的影响不大。而核子动量空间密度分布、碰撞数和熵同时受平均场和核子-核子碰撞, 特别是介质效应的影响。而且这些因素对于以上各量的影响与入射能量密切相关。

一、前 言

对中高能重离子碰撞动力学过程的研究是现在人们非常感兴趣的课题, 因为这是唯一的在远离基态情况下, 对有限粒子数强相互作用量子系统性质所进行的研究。这些研究可以获得关于高密致核物质状态方程的知识。这些知识对于超新星爆炸, 中子星的稳定性以及由凝聚态核物质向夸克胶子等离子体过渡的了解具有重要意义。

中高能重离子碰撞的动力学过程是非常复杂的, 涉及多方面的物理因素, 主要归纳为三种, 即平均场、核子-核子碰撞和泡里阻塞。在低能重离子碰撞过程中, 平均场和泡里阻塞起主导作用, 但到了高能重离子碰撞中泡里阻塞减弱而核子-核子碰撞变得重要。处于低能和高能之间的中能重离子碰撞正好处在过渡区, 以上三种因素都起重要作用。由于泡里阻塞已在 BUU 方程的碰撞项中包含, 所以本文重点研究平均场和核子-核子碰撞特别是考虑介质中的核子-核子碰撞对于核物质密度分布, 碰撞数和熵的影响。

因为介质效应是通过碰撞项中的核子-核子碰撞截面引入的, 为了研究介质效应的影响, 在第三节中简要讨论了自由核子-核子碰撞截面和介质中核子-核子碰撞截面的能量依赖关系。为了便于仔细分析平均场, 核子-核子碰撞产生影响的物理过程, 在第四节中

本文 1990 年 4 月 30 日收到。

* 中国科学院重大课题基金和中国自然科学基金支持的课题。

计算了不同时间平均场和介质效应对核子空间密度分布 $\rho_r(x, 0), \rho_r(0, z)$ 以及核子动量空间密度分布 $\rho_p(p_x, 0), \rho_p(0, p_x)$ 的影响过程。接着在第五节计算和分析了靶核中心空间密度, 碰撞数和熵在各种条件 T_1 的时间谱。最后在第六节中为了研究这些影响与入射能量的关系, 分别计算了核子-核子弹性碰撞和非弹性碰撞条件下, 碰撞数随入射能量的关系。

二、模 型

与上篇文章^[4]作法相同, 采用 BUU 方程^[4]如下:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f_1 - \nabla U \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f_1 = - \int \frac{d\mathbf{p}_2 d\mathbf{p}'_1 d\mathbf{p}'_2}{(2\pi)^6} \sigma v_{12} [f_1 f_2 (1 - f'_1)(1 - f'_2) - f'_1 f'_2 (1 - f_1)(1 - f_2)] \delta^3(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}'_1 - \mathbf{p}'_2), \quad (1)$$

上式右边为核子-核子碰撞项。如令该项为零即为 Vlasov 方程, 只有平均场起作用。其中 U 为平均场; σ 是核子-核子碰撞截面, 可以采用自由核子-核子碰撞截面, 也可采用介质中核子-核子碰撞截面。平均场的形式为密度相关势

$$U(\rho) = A \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + B \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\sigma \quad (\text{MeV}), \quad (2)$$

可采用以下两组参数:

$$\begin{aligned} \text{硬势:} \quad U(\rho) &= -124 \frac{\rho}{\rho_0} + 70.5 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^2, \\ \text{软势:} \quad U(\rho) &= -218 \frac{\rho}{\rho_0} + 164 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{4}{3}}, \end{aligned} \quad (3)$$

(1) 式中 $(1 - f)$ 项为泡里阻塞因子。我们采用蒙特卡诺抽样和试验粒子网格法求解上面方程, 以计算填充几率 f 进而计算有关物理量。

三、核子-核子碰撞截面

为了研究核子-核子碰撞对各种物理量的影响, 本文分别采用自由核子-核子碰撞和介质中核子-核子碰撞截面。从 ter Harr 和 R. Malfliet^[2] 计算的在介质中未考虑泡里阻塞情况下的核子-核子弹性碰撞截面, 以及 G. Bertsch 和 G. E. Brown^[3] 计算的介质中核子-核子非弹性碰撞截面, 看出具有以下明显规律性:

(1) 在 $E_L = 1\text{GeV}$ 以下, 自由核子-核子弹性截面均比介质中核子-核子弹性碰撞截面增加。

(2) 随着核物质密度的减小核子-核子弹性碰撞截面增加。

(3) 在介质中核子-核子非弹性碰撞截面比自由核子-核子非弹性碰撞截面增加。且这种增加量随着核物质密度的增加而增加。这刚好与核子-核子弹性碰撞的变化趋势相反。

四、核子坐标和动量空间密度分布

如上所述, (1)式碰撞项中的核子-核子碰撞截面分别采用有介质和无介质中的核子-核子弹性碰撞截面和非弹性碰撞截面。对反应 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$, 能量为 $E_L = 400\text{MeV}/A$ 的中心碰撞 ($b = 0\text{fm}$) 进行了具体计算。质心系中不同时间核子坐标空间密度分布 $\rho_r(x, 0)$ 和 $\rho_r(0, z)$ (对 y 方向求和) 表示在图 1 中, 其中自由核子-核子碰撞(包括弹性碰撞和非弹性碰撞)和硬方程表示为 FH, 而介质中核子-核子碰撞和硬方程表示为 MH。可以看出介质效应对核子坐标空间密度分布影响不大, 说明 ρ_r 主要决定于平均场。而不同时间核子动量空间的密度分布 $\rho_p(p_x, 0)$ 和 $\rho_p(0, p_x)$ (同样对 p_y 方向求和) 列在图 2 中。横向动量分布 $\rho_p(p_x, 0)$ 呈现为单峰, 主要是在核物质扩散过程中横向挤压产生的, 其峰值在考虑介质效应后比自由核子-核子碰撞降低。纵向动量密度分布 $\rho_p(0, p_x)$ 则在弹核和靶核动量处形成双峰, 且随时间而发展, 介质效应对应的双峰与自由核子碰撞的双峰相比, 比较慢地变为单峰, 说明介质效应使核物质扩散过程变慢, 相当于增大了核物质的粘滞性。

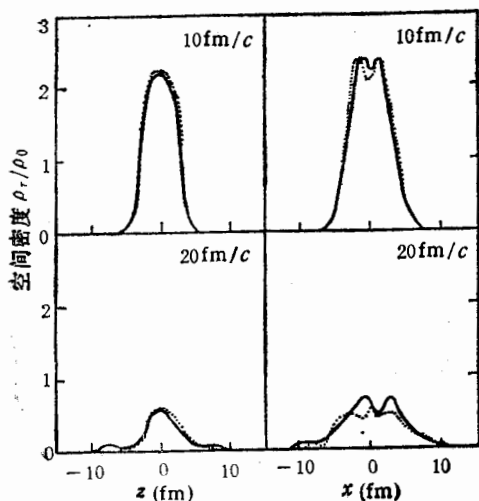


图 1 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ $E_L = 400\text{MeV}/A$ $B = 0$
 $\tau = 10\text{fm}/c, 20\text{fm}/c$ 时 z 轴和 x 轴上密度分布 $\rho_r(0, z), \rho_r(x, 0)$

(—)FH (····)MH

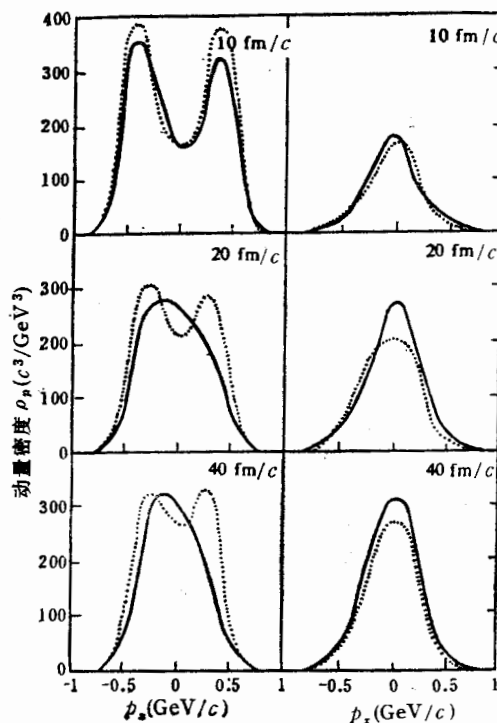


图 2 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ $E_L = 400\text{MeV}/A$ $B = 0$
 $\tau = 10, 20, 40\text{fm}/c$ 时 p_x 轴和 p_x 轴上动量分布 $\rho_p(0, p_x)$ 和 $\rho_p(p_x, 0)$ 其中

— FH ····· MH

五、靶核中心密度, 碰撞数和熵

在图 3 中给出了靶核中心密度、碰撞数¹⁾和熵的时间谱, 其中 MS 表示介质中的核子-核子碰撞和软方程, FS 表示自由核子-核子碰撞和软方程. 而 FH 和 MH 同前面一样. 从图 3b 中可以看出靶核中心密度随时间 t 先是被压缩, 密度增大, 约在 $t \cong 11 \text{fm}/c$ 时达到极大值. 随后开始扩张, 核物质密度很快减小. 各种情况下靶核中心密度极大值之间的相对大小为 $\rho_{\text{max}}(\text{FS}) \cong \rho_{\text{max}}(\text{MS}) > \rho_{\text{max}}(\text{FH}) \cong \rho_{\text{max}}(\text{MH})$, 即考虑介质效应后对靶核中心密度影响不大, 这和前面核子坐标空间密度分布的结论一致, 说明核物质空间密度的大小主要决定于平均场, 而与碰撞项关系不大, 为了证实这一问题, 采用 Vlasov 方程(只有平均场), 计算了靶核中心密度的极大值及 BUU 方程, 计算结果列于表 1.

可以看到核子-核子碰撞对于核物质空间密度的分布影响不大; 但平均场对空间密度影响很明显, 软方程的核物质空间密度大于硬方程的密度值. 因为软方程的压缩系数小容易压缩, 故核物质空间密度大.

图 3a 是各种情况下碰撞数极大值的相对大小,

$N_{\text{max}}(\text{FS}) > N_{\text{max}}(\text{FH})$ 和 $N_{\text{max}}(\text{MS}) > N_{\text{max}}(\text{MH})$, 软方程相应的碰撞数大于硬方程的碰撞数. 因为软方程的核物质密度大, 核子平均自由程小, 故碰撞数增大. 考虑介质效应后, 在此能量条件下, 核子-核子弹性碰撞截面比自由核子-核子弹性截面的减少量大于介质中核子-核子非弹性碰撞截面相对于自由核子-核子非弹性碰撞截面的增加量, 即考虑介质效应后总的核子-核子碰撞截面减小了. 所以核子碰撞数在考虑介质效应后减小了. 即

$$N_{\text{max}}(\text{FS}) > N_{\text{max}}(\text{MS}), N_{\text{max}}(\text{FH}) > N_{\text{max}}(\text{MH}).$$

图 3c 给出了各种情况下熵的时间谱, 参看图 3b, 当核物质密度被压缩到极大值的过

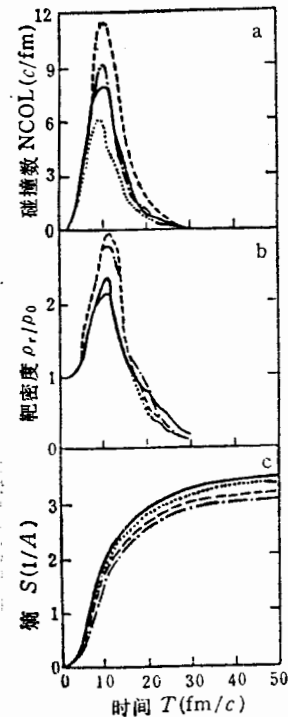


图 3 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ $E_L = 400$ MeV/u $B = 0 \text{fm}$ 碰撞率、靶核中心密度和熵随时间的变化.

(—)FH (---)FS
(···)MH (---)MS

表 1 靶核中心密度极大值

	FS	MS	FH	MH
Vlasov	2.551		1.885	
BUU	2.682	2.778	1.819	1.862

1) 指单位时间 ($\Delta t = 0.5 \text{fm}/c$) 的碰撞数.

程中正是熵上升最快时期,在此期间原子核碰撞的相对动能转化为原子核的压缩能和热能,原子核的温度上升。随后随着核物质的扩散,核子的运动从有序向无序转化,熵逐步上升直到饱和值。各种条件下熵饱和值之间大小关系为:

$$S_{sat}(FH) > S_{sat}(MH) > S_{sat}(FS) > S_{sat}(MS)$$

由此式可看出硬方程对应熵的饱和值大于软方程对应的饱和值。考虑介质效应后熵的饱和值减小。由于熵的大小直接依赖于核子相空间填充数 n_i ,其表示式如下:

$$S = -4 \sum_i [n_i \ln n_i + (1 - n_i) \ln(1 - n_i)]$$

如上所述,考虑介质效应后碰撞数减小,核子-核子碰撞截面减小,故核子填充数 n_i 减小,直接导致到熵的减小。

六、介质效应的影响与能量有关

介质效应使各种物理量增加还是减小直接与核子入射能量相关。因为正如第四节中所讲,核子-核子碰撞截面是入射能量和密度相关的,而介质效应是在 BUU 方程中通过核子-核子碰撞截面引入的,故介质效应必然是能量、密度相关的。为此我们对于总碰撞数¹⁾在硬方程情况下,就无介质和有介质以及弹性碰撞、非弹性碰撞各自的贡献,随入射能量的变化分别进行了计算,结果列于图4中,其中FE和FI分别表示自由核子-核子弹

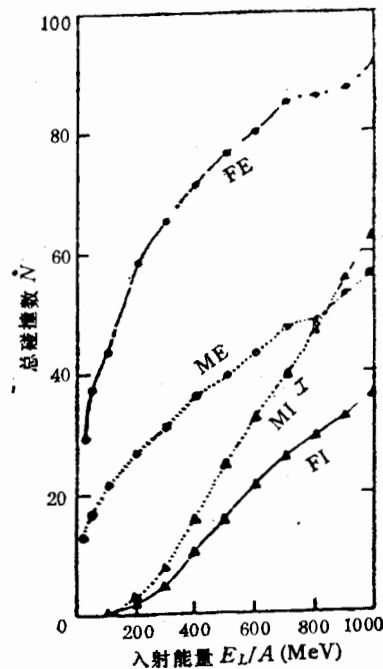


图4 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ $B = 0\text{fm}$ 弹性碰撞数和非弹性碰撞数随入射能量的变化

1) 这里总碰撞数是对确定能量情况下所有时间碰撞数的求和。

碰撞和自由核子-核子非弹性碰撞。ME 和 MI 为介质中核子-核子弹性碰撞和非弹性碰撞。很明显在四种情况下碰撞数极大值相对大小随入射能量而改变。当 $E_L \leq 800 \text{ MeV}/A$ 以前 $N_{\max}(\text{ME}) > N_{\max}(\text{MI})$ 。在 $E_L > 800 \text{ MeV}/A$ 以后 $N_{\max}(\text{ME}) < N_{\max}(\text{MI})$ 。

七、小 结

核物质空间密度分布主要决定于平均场, 软方程对应的空间密度明显大于硬方程对应的空间密度。但空间密度与核子-核子碰撞关系并不明显。对于 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$, 能量 $E_L = 400 \text{ MeV}/A$ 的中心碰撞, 核子动量空间密度分布在考虑介质以后有所减小, 核物质扩散过程与自由核子-核子碰撞相比有所减慢, 这相当使核物质粘滞系数增大。碰撞数的极大值和熵的饱和值同时受到平均场和核子-核子碰撞的影响。考虑介质效应后碰撞数的极大值和熵的饱和值均比自由核子碰撞相应的有所减小。以上各种物理量的极大值或饱和值在不同条件下的相对大小随入射能量的增加而改变。这与上篇文章^[1]关于集体流所得的结论是一致的。即不能笼统地讲, 在考虑介质后观测量是增大还是减小, 而是随能量而变的。

参 考 文 献

- [1] 刘建业、葛榆成、葛凌霄, 中能重离子碰撞动力学过程中的介质效应, 高能物理与核物理, 待发表。
- [2] ter Haar and R. Malfeld, *Phys. Rev.*, **C36**(1987), 1611.
- [3] G. Bertsch, G.E. Brown et al., *Nucl. Phys.*, **A490**(1988), 745.
- [4] G. Bertsch and S. Dasgupta, *Phys. Rep.*, **160**(1988), 190.

Nuclear Matter Density, Collision Number and Entropy in Dynamics Process of Intermediate High Energy Heavy Ion Collision

LIU JIANYE GE YUCHENG

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

ABSTRACT

The nuclear matter density, collision number and entropy in the dynamic process of heavy ion collision $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ at $E_L = 400 \text{ MeV}/A$ for very central collision were calculated. The results show that the nuclear spatial density distributions depend mainly on the mean field but rarely on the nucleon-nucleon collisions. The density distribution in the momentum space, collision number and entropy are influenced by the mean field and nucleon-nucleon collision, especially the medium effects.