

强子的内部激发和 QCD 真空在核物质的热力学行为上的效应

贺泽君 张家驹 陈军锋 邱锡钧

(中国科学院原子核研究所, 上海 201800)

摘 要

基于混合相模型本文研究了强子的内部激发和 QCD 真空在核系统的热力学行为上的效应. 结果表明这两个效应带来了一个合理的相变图象, 并改变了系统的热力学行为.

多年来核物质的热力学行为的研究一直有着强烈的吸引力, 这由于它在重离子碰撞和天体演化的研究中有重要的应用. 迄今为止, 格点量子色动力学、两相模型和单相模型已广泛地应用来预言了强子到夸克的相变. 然而我们知道, 夸克禁闭直接联系着真空在夸克上的作用, 它引起夸克能量向上移动. 此外, 在相对论性原子核碰撞中, 处于极高温度环境中的强子要发生内部激发^[1,2], 导致强子能量升高. 人们可以期望这两个效应会依次改变强子和夸克在能级上的占有数、热力学量、相边界和为夸克形成所预言的特征物理量.

在本文中, 我们类似文献[3], 描述产生于极端相对论性原子核碰撞的混合系统为一个“大袋”. 在袋的外面是强子真空, 其袋常数 $B=0$. 在袋的内部强子间的夸克-胶子等离子体区域 $B \neq 0$. 袋常数 B 是维持一个袋所需的能量密度. 于是, 在夸克-胶子等离子体中, 一个夸克在 QCD 真空作用下获得的能量为 B/ρ . ρ 是夸克的数密度. 当限定在相变过程中系统的总体积不变, 且强子仅为核子, 则 $B/\rho = \frac{BV}{3}$. V 是核子的体积. 于是在等离子体中, 一个夸克的能量应为 $E_q = E_q + \frac{BV}{3}$. E_q 是夸克的自由运动能量. 此外, 在本文中我们已取 $3KT^4V$ 为强子的内部激发能(这里 K 是与夸克味有关的量), 它被用在夸克的退禁闭研究中已获得显著的成功^[1], 与按照适当的权重对产生于禁闭在强子中的夸克和胶子系统的分离能态求和作严格计算得到的结果相比较^[2], 发现前者是后者的很好近似.

对于强子相(仅限于核子)和夸克相的混合系统, 当包括了两种效应后可用推广的 Walecka 平均场理论描述^[4]. 推广的标量密度 n_s , 重子密度 n_b 分别表示为

$$M_n^*(T) = M_n - (g_s/\hbar c^3 v^2)n_s(T)$$

$$n_s(T) = \frac{\gamma_n}{2\pi^2} \int \frac{M_n^*}{(k^2 + M_n^{*2})^{3/2}} (N_n^+ + N_n^-) k^2 dk \quad (1)$$

$$n_b(T) = \frac{\gamma_n}{2\pi^2} \int (N_n^+ - N_n^-) k^2 dk + \frac{1}{3} \frac{\gamma_q}{2\pi^2} \int (N_q^+ - N_q^-) k^2 dk [1 - \frac{2\alpha_s}{\pi}] \quad (2)$$

$$N_n^\pm = 1 / \{ \exp[(E_n + 3KT^4V \mp \mu_n) / T] + 1 \} \quad (3)$$

$$N_q^\pm = 1 / \{ \exp[(E_q + BV/3 \mp \mu_q) / T] + 1 \} \quad (4)$$

$$E_n = [k^2 + M_n^{*2}]^{1/2}, \quad E_q = k \quad (5)$$

(2)式右边的第一、二项依次是核子、夸克的贡献。 $\nu, M_n^*, M_n, N_n, \mu_n, N_q$ 和 μ_q 依次是康普顿波长的倒数、核子的有效质量、质量、占有数、化学势,夸克的占有数和化学势。由于夸克质量近似为零,因而它对标量密度 n_s 没有明显贡献。

介超越方程组(1)(2)得化学势 μ_n 和 μ_q ,于是采用 Walecka 理论的公式可计算核系统中核子和夸克的压强、能密度^[4]。

1)不考虑两个效应,核子与夸克的分布函数是通常的费米分布。由于 E_n 比 E_q 大得多(看(5)式),则夸克的占有数比核子的高得多,造成低温时夸克占统治。显然与事实不符。

2)只考虑真空在夸克上的作用,夸克的零点能向上移动 $BV/3$,造成低温时核子占统治。随温度的上升,核子的化学势和有效质量下降,反核子的贡献变得重要,导致核子向夸克转化。但当 $B^{1/2} = 240$ MeV,在温度 $T = 90$ MeV 时转化已完成。显然转换太快了。

3)两个效应都考虑,当系统的温度 T 低时, $3KT^4V$ 的贡献不大,则粒子的占有与情况 2)相似。仅当 T 上升, $3KT^4V$ 变得重要,它补偿了在情况 2)中由于化学势和有效质量随温度的增加而减小,使得反核子的贡献又变得不重要,于是推迟核子向夸克的转化。综合两种效应,得到图 1 的结果。显然这时粒子的占有和转换才是合理的。

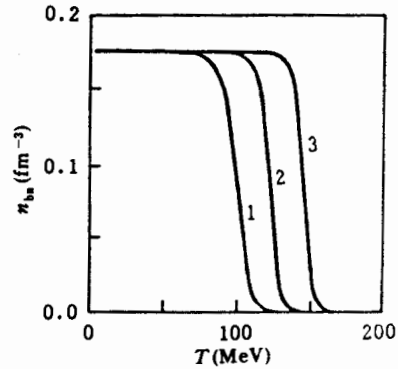


图 1 核子随系统温度升高向夸克的转换。

图中 1、2、3 对应着袋常数 $B^{1/2} = 200, 240, 280$ MeV。

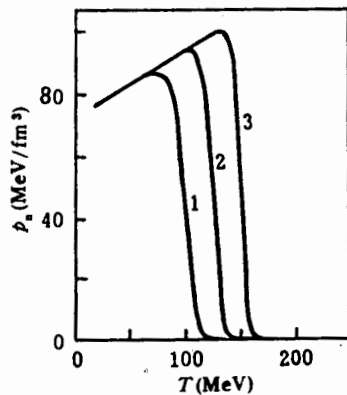


图 2 强子相的压强随温度的变化。

图中 1、2、3 对应着袋常数 $B^{1/2} = 200, 240, 280$ MeV。

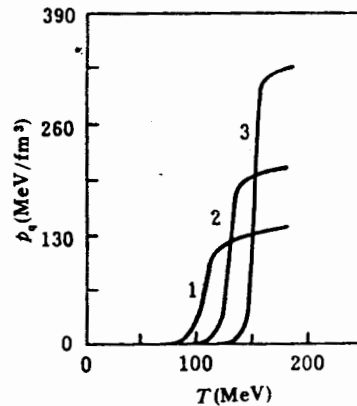


图 3 夸克相的压强随温度的变化。

图中 1、2、3 对应着袋常数 $B^{1/2} = 200, 240, 280$ MeV。

图 2 给出了核子压强与温度的关系。它反映了核子迅速相变的特征。当系统的温度接

近临界值时,核子很快地转变为夸克.于是与核子有关的热力学量就下降到零.图3给出了夸克和压强.由于低温时系统中没有什么夸克,因此,夸克的压强接近零.当温度升到临界附近,核子迅速地转换成夸克,因而夸克的压强很快地升高.然而过了临界点,转换很快完成,这时夸克压强仅随温度而上升,于是压强的上升变慢.结果给出了图3所示的行为.

从讨论可见,随核系统温度的升高,强子的内部激发对热力学的影响变得重要,结合着夸克与真空的作用,显著地改变了系统的热力学行为.进而必然修改为夸克的形成所预言的特征物理量.

参 考 文 献

- [1] F. Takagi, *Phys. Rev.*, **D35**(1987), 2226.
- [2] J. Dey, M. Dey and P. Ghose, *Phys. Lett.*, **B221**(1989), 161.
- [3] J. W. Clark, J. Cleymans and J. Rafelski, *Phys. Rev.*, **C33**(1986), 703;
Bi Pin-Zhen and Shi Zhu-Pei, *Phys. Rev.*, **C38**(1988), 1069.
- [4] S. A. Garpman, N. K. Glendenning and Y. J. Karant, *Nucl. Phys.*, **A322**(1978), 382.

Effects of the Internal Excitation of the Hadron and QCD Vacuum on the Thermodynamic Behavior of Nuclear Matter

HE ZEJUN ZHANG JIAJU CHEN JUNFENG QIU XIJUN

(Institute of Nuclear Research, Academia Sinica)

ABSTRACT

The influences of the internal excitation of the hadron and QCD vacuum on the thermodynamic behavior have been studied on the basis of a mixed phase model. The results well show that these two effects bring a reasonable phase transition picture from nucleons to quarks, and significantly change the thermodynamic behavior of nuclear matter.