

中子星物质中的 K 介子凝聚*

郭华^{1,2} 刘波^{1,3} 李希国^{1,4} 陈晏军²

1 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2 (北京大学技术物理系, 教育部重离子物理重点实验室 北京 100871)

3 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

4 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 用密度相关的相对论平均场理论计算了中子星物质中的 K 介子凝聚, 结果表明中子星物质发生 K 介子凝聚的临界密度约为 $2.75\rho_0$. 中子星物质 URCA 过程发生的临界密度在考虑 DB 核物质中核子自能修正时为 $\frac{\rho}{\rho_0} \approx 3.16$, 在不考虑 DB 核物质中核子自能修正时为 $\frac{\rho}{\rho_0} \approx 2.25$, 并进一步计算了密度相关的相对论平均场理论两种参数形式对中子星物质状态方程的影响.

关键词 K 介子凝聚 密度相关的相对论平均场理论 中子星物质

1 引言

由于 Kaplan 与 Nelson 的工作^[1], 人们对核物质中 K 介子凝聚引起了极大的兴趣, K 介子凝聚的出现将影响核物质的状态方程及中子星的冷却速率. 用 $SU(3) \times SU(3)$ 手征拉氏量, 计算表明核物质的密度在 $2.3\rho_0 < \rho < 3\rho_0$ 的区域内可能存在 K 介子凝聚, 其中 ρ_0 为核物质的饱和密度^[1]. 在重离子碰撞的实验中, K 介子凝聚的可能观测信号为剩余超子的产生和 K 介子的相干产生及长寿命奇异强子物态的出现^[2]. 但在实际中, 当 K 介子有效质量减小到一定的程度, 将使反应 $\pi\pi \rightarrow KK$ 的阈能减小, 不利于 K 介子凝聚而有利于 K 介子的产生^[3]. 考虑到手征展开的高阶修正, 并采用 K 介子与核子的相互作用来确定手征拉氏量中的模型参数, 计算表明 K 介子凝聚的临界密度为 $3-4\rho_0$, 即 K 介子凝聚可能出现在中子星物质中^[4]. 使用线性 Walecka 模型^[5] 及 K 介子与核子的单玻色子交换模型, 研究表明在核环境中不存在 K 介子凝聚, 导致这一结果的原因是由于线性 Walecka 模型在核物质密度达到 $10\rho_0$ 时,

核子有效质量近似地趋于零, 使 K 介子的有效质量存在确定的下限, 不再随核物质密度的增加而减小, 使 K 介子凝聚不可能发生^[6]. 另一些研究者认为用非线性 Walecka 模型计算 K 介子在核物质中的凝聚时, 发现 K 介子凝聚使核子有效质量减小, 而核子有效质量的减小反过来抑制了 K 介子凝聚的出现^[7]. 若在非线性 Walecka 模型中除考虑 σ 介子的自相互作用之外, 进一步考虑 ω 介子的自相互作用, 同时引入超子自由度, 计算结果表明超子自由度的存在并不支持 K 介子凝聚的出现^[8]. 如果进一步考虑 K 介子的夸克结构, 并采用夸克介子耦合模型的框架, 研究表明 ρ 介子的作用将使 K 介子凝聚的临界密度增加^[9]. 使用微分耦合模型计算显示在稳定的中子星内部 K 介子凝聚可能不存在, 而与之相对应的非线性 Walecka 模型给出的 K 介子凝聚的密度较低, 约 $3.5\rho_0$, 似乎 K 介子凝聚可能出现在中子星的内部^[10]. 最近一些作者对核物质中 K 介子凝聚问题分析表明, K 介子凝聚相与正常相的混合区域存在于中子星的内部, 并有可能与脉冲星自转突然加快有关, 同时 K 介子凝聚相的存在将影响核子

2002-03-21 收稿

* 国家重点基础研究发展规划(G2000077400), 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJ92-SW-N02), 国家自然科学基金(19975053, 10075071, 10275002)资助

有效质量及核物质的状态方程^[11]. 反映核物质状态方程的一些物理量, 如核物质的压缩模数也将影响 K 介子在介质中的行为及 K 介子在核核碰撞中的产生. 核物质状态方程的软(压缩模数小)、硬(压缩模数大)将影响 K 介子的产额. 与硬的核物态方程相比较, 软的核物态方程可以导致 K 介子产额的增加^[12]. 相对论输运模型数值模拟表明 K 介子的横向流的大小与 K 介子在核介质中感受到的相互作用势的形式有关, 它说明用重离子碰撞实验来探测 K 介子在核物质中的行为是可行的^[13]. 在重离子碰撞区域内, 由于 K⁺ 介子的平均自由程较大, 受介质效应的影响较小, 且矢量势排斥作用在高密度区域变强, 因而不可能引起 K⁺ 介子的大量产生, 而 K⁻ 介子则不同, 它受核介质效应影响较大, 并可能导致 K⁻ 介子产生的增加^[14], 因此探测 K⁺ 介子在核核碰撞过程中的产生是研究核物态方程的重要途径之一. 总之, 对 K 介子在核介质中的产生在理论与实验上同时进行研究是非常重要的. 目前, 不同的理论模型或同一理论模型考虑不同的物理自由度给出 K 介子凝聚现象的结论不尽一致, 需要理论与实验进一步的研究.

本文使用最近新参数化的密度相关的相对论平均场理论^[15] 及 K 介子的玻色子交换模型计算中子星物质中的 K 介子凝聚, 并对计算结果作简单的分析.

2 基本公式

密度相关的相对论平均场理论是采用 Dirac-Brueckner (DB) 计算的核物质中核子的自能结果来确定强子场理论中的相互作用顶点, 在平均场近似下, 使核子、介子的耦合常数与密度相关. 密度相关的相对论平均场理论对于耦合常数的确定有不同的版本. 本文采用最近的一种方案, 相应的拉氏密度为^[15]:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \psi(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi + \frac{1}{2}(\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2) + \\ & \frac{1}{2}(\partial_\mu \delta \partial^\mu \delta - m_\delta^2 \delta^2) + \\ & \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2} m_\rho^2 b_\mu b^\mu - \frac{1}{4} G_{\mu\nu} G^{\mu\nu} + \\ & \bar{\psi}[\Gamma_\sigma(\rho)\sigma - \Gamma_\omega(\rho)\gamma^\mu \omega_\mu + \Gamma_\delta(\rho)\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\delta} - \\ & \Gamma_\rho(\rho)\gamma^\mu \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{b}_\mu]\psi, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ψ 为核子场, $\sigma, \delta, \omega, \mathbf{b}$ 分别为 $\sigma, \delta, \omega, \rho$ 介子场, 其它一些量的含义与文献[15]相同. 在平均场近似下, 很容易给出相应场的运动方程:

$$\begin{aligned} [i\gamma^\mu \partial_\mu - \gamma^0(\Sigma_{i(0)} - \Sigma_{r(0)}) - m_i^*]\psi_i &= 0, \\ m_\sigma^2 \sigma &= \Gamma_\sigma(\rho)\rho^* \equiv \Gamma_\sigma(\rho)(\rho_p^* + \rho_n^*), \\ m_\delta^2 \delta_3 &= \Gamma_\delta(\rho)\rho_3^* \equiv \Gamma_\delta(\rho)(\rho_p^* - \rho_n^*), \\ m_\omega^2 \omega_0 &= \Gamma_\omega(\rho)\rho \equiv \Gamma_\omega(\rho)(\rho_p + \rho_n), \\ m_\rho^2 b_{3,0} &= \Gamma_\rho(\rho)\rho_3 \equiv \Gamma_\rho(\rho)(\rho_p - \rho_n), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 ρ_i, ρ_i^* ($i = n, p$) 分别对应于核子的数密度与标量密度, $\Sigma_{i(0)} \equiv \Gamma_\omega(\rho)\omega_0 + \tau_3 \Gamma_\rho(\rho)b_{3,0}$, $\Sigma_{r(0)} \equiv \frac{\partial \Gamma_\omega(\rho)}{\partial \rho}\omega_0 \rho + \frac{\partial \Gamma_\rho(\rho)}{\partial \rho}b_{3,0}\rho_3 - \frac{\partial \Gamma_\sigma(\rho)}{\partial \rho}\sigma\rho^* - \frac{\partial \Gamma_\delta(\rho)}{\partial \rho}\delta_3\rho_3^*$, 核子的有效质量定义为 $m_i^* = m - \Gamma_\sigma(\rho)\sigma - \tau_3 \Gamma_\delta(\rho)\delta_3$, 核物质中不对称参数定义为 $\alpha \equiv \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho} \left(= \frac{N - Z}{A} \right)$, 密度相关的耦合常数被确定为^[15]

$$\Gamma_i(\rho) = a_i \frac{1 + b_i \left(\frac{\rho}{\rho_0} + d_i \right)^2}{1 + c_i \left(\frac{\rho}{\rho_0} + e_i \right)^2}, \quad i = (\sigma, \omega, \rho, \delta), \quad (3)$$

式中 ρ_0 相应于 DB 理论计算的核物质饱和密度. 如果进一步考虑费米动量对 DB 核子自能的修正, 则由此引起的对密度相关的耦合常数所造成的修正为^[15]

$$\hat{\Gamma}_i(\rho) = \Gamma_i(\rho) \sqrt{1 + \xi_i K_F^2}, \quad K_F = \left(\frac{3\pi^2}{2} \rho \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

核物质的能量密度与压强分别为

$$\begin{aligned} \epsilon &= 2 \left[\int_0^{K_{Fp}} \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \sqrt{k^2 + m_p^2} \right. \\ & \quad \left. + \int_0^{K_{Fn}} \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \sqrt{k^2 + m_n^2} \right] + \\ & \quad \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_0^2 + \frac{1}{2} m_\rho^2 b_0^2 + \frac{1}{2} m_\delta^2 \delta_3^2, \\ p &= \frac{2}{3} \left[\int_0^{K_{Fp}} \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \frac{k^2}{\sqrt{k^2 + m_p^2}} + \right. \\ & \quad \left. \int_0^{K_{Fn}} \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \frac{k^2}{\sqrt{k^2 + m_n^2}} \right] - \\ & \quad \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_0^2 + \frac{1}{2} m_\rho^2 b_0^2 - \\ & \quad \frac{1}{2} m_\delta^2 \delta_3^2 + \rho \Sigma_{r(0)}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 K_{Fp}, K_{Fn} 分别为质子、中子的费米动量.

K 介子是有同位旋量子数的粒子,其表示为 $K = \begin{pmatrix} K^+ \\ K^0 \end{pmatrix}$, $\bar{K} = (K^-, \bar{K}^0)$, K 介子与核子的相互作用可以采用 K 介子与核物质中介子(玻色子)交换的模型,其拉氏度密为^[8,10,14]

$$\mathcal{L} = \mathcal{D}_\mu^* \bar{K} \mathcal{D}^\mu K - m_K^2 \bar{K} K + g_{\omega K} m_K \bar{K} K \omega - g_{\delta K} m_K \bar{K} K \tau_{3,K} \delta_3, \quad (6)$$

式中协变微分定义为 $\mathcal{D}_\mu = \partial_\mu + i g_{\omega K} \omega_\mu + i g_{\rho K} \tau_{3,K} b_{3,\mu}$, 协变微分的引入保证了 K 介子流守恒. 通过简单的计算可以给出 K 介子在核物质中的色散关系

$$\omega_{K,\bar{K}} = \sqrt{m_K^2 - g_{\omega K} m_K \omega + g_{\delta K} m_K \tau_{3,K} \delta_3 + k^2} \pm (g_{\omega K} \omega_0 + g_{\rho K} \tau_{3,K} b_{3,0}), \quad (7)$$

式中 K 介子与核物质中矢量介子的耦合常数由 SU(3)关系给出: $g_{\omega K} = g_{\rho K} = 3.02^{[14]}$, K 介子与核物质中标量介子的耦合常数 $g_{\sigma K}, g_{\delta K}$ 由 K 介子与核子的散射长度来确定^[8,10,14]:

$$a_0^{I=1} = -0.31 \text{fm} = \frac{m_K}{4\pi \left(1 + \frac{m_K}{m}\right)} \times \left(g_{\sigma K} \frac{g_{\sigma N}}{m_\sigma^2} + g_{\delta K} \frac{g_{\delta N}}{m_\delta^2} - 2g_{\omega K} \frac{g_{\omega N}}{m_\omega^2} - 2g_{\rho K} \frac{g_{\rho N}}{m_\rho^2} \right),$$

$$a_0^{I=0} = -0.09 \text{fm} = \frac{m_K}{4\pi \left(1 + \frac{m_K}{m}\right)} \times \left(g_{\sigma K} \frac{g_{\sigma N}}{m_\sigma^2} - 3g_{\delta K} \frac{g_{\delta N}}{m_\delta^2} - 2g_{\omega K} \frac{g_{\omega N}}{m_\omega^2} + 6g_{\rho K} \frac{g_{\rho N}}{m_\rho^2} \right). \quad (8)$$

注意上式中核子与介子的耦合常数是在真空中的耦合常数,它们与密度相关的耦合常数的关系为 $g_{i,N} = \Gamma_i(\rho)|_{\rho=0}$.

URCA 过程是中子星形成初期主要的降温途径之一^[16],中子星物质中发生的 URCA 过程为: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$, 反应的平衡条件为

$$\mu_n = \mu_p + \mu_e, \quad (9)$$

对于由 (n, p, e) 组成的中子星物质,电中性条件为

$$x_p \equiv \frac{\rho_p}{\rho} = \frac{\rho_e}{\rho}. \quad (10)$$

在中子星物质中发生 K 介子凝聚的过程为 $e^- \rightarrow K^- + \nu_e$ ^[8,10,14,16], 而发生此反应的临界条件为 $\omega_{K^-}(k=0) = \mu_e$, 如果 $\omega_{K^-}(k=0) = 0$, 则为在对称核物质中发生 K 介子凝聚的临界条件. 本文计算表明 K^+ 没有发生凝聚的迹象,在这里仅考虑 K^- 介子的凝聚.

3 计算结果

由表 1 给出的模型参数是不考虑 DB 核物质中核子自能修正时的情况. 如果考虑了 DB 核子自能的动量修正,则表 1 中第五行与 ρ 介子有关的参数应分别替换为 $(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i) = (19.6270, 1.7566, 8.5541, 0.7783, 0.5746)$, 而表 1 中其它参数不变,此时相应的 DB 核物质的饱和密度仍然为 $\rho_0 = 0.16 \text{fm}^{-3,15}$.

表 1 密度相关的相对论平均场模型的

模型参数及介子质量^[15] (MeV)

i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
σ	13.1334	0.4258	0.6578	0.7914	0.7914
ω	15.1640	0.3474	0.5152	0.5989	0.5989
δ	19.1023	1.3653	2.3054	0.0693	0.5388
ρ	12.8373	2.4822	5.8681	0.3671	0.3598

图 1(a), (b), (c), (d) 分别计算了 K 介子的能量与电子的化学势,中子星物质中质子的含量,核子有效质量的比率及中子星物质中的不对称参数分别随核物质密度的变化. 从图 1(a)中可以看出 K^- 介子的能量随核物质的密度增加而单调减小,并与中子星物质中电子的化学势相交,满足中子星物质中 K 介子凝聚的条件,因此在中子星物质中可能出现 K^- 凝聚. 如果比较考虑(实线)或不考虑(虚线) DB 核物质中核子自能修正,两种情况给出 K^- 凝聚时的核物质密度很接近 ($\sim 2.75\rho_0$), 由于该凝聚密度比较低,完全可能出现在中子星内部,这一结论与手征理论^[1,2,4] 及非线性 Walecka 模型^[10,11] 给出的结果基本一致. 随着核物质密度的进一步增加, K^- 介子的能量可以减小到零,它说明 K^- 凝聚也可以在对称核物质中出现,此时核物质的密度很高 ($6.5\rho_0 - 7\rho_0$), 只能看作是理论的预言结果. 而 K^+ 介子的能量随核物质密度的增加而单调增加,因而不可能在中子星物质中发生 K^+ 凝聚现象. 同时从图 1(a)中可以看出是否考虑 DB 核物质中核子自能修正对中子星物质 K 介子的能量及电子的化学势影响不大,对 K^- 凝聚的临界密度也影响不大. 从图 1(b)可以看出中子星物质中质子的含量 x_p 随核物质的密度增加而单调增加,考虑 DB 核物质中核子自能修正给出的计算结果比不考虑此修正给出的计算结果要小,并且是否考虑 DB 核物质中核子自能修正对中子星物质中质子含

量的影响是比较大的. 在中子星内部发生 URCA 过程时要求质子的含量为 $0.11 < \frac{\rho}{\rho_0} < 0.115^{[15]}$, 比较两种情况计算出的开始出现 URCA 过程的临界密度时可以看出前者为 $\frac{\rho}{\rho_0} \approx 3.16$, 后者为 $\frac{\rho}{\rho_0} \approx 2.25$, 因此在考虑 DB 核物质中核子自能动量的修正时给出的 URCA 过程的临界密度变大. 由于同位旋矢量标量 δ 介子的质量较大, 在核物质密度较小时通常被忽略, 但从图 1(c) 可以看出 δ 介子在中子星物质中对核子的有效质量影响较大, 应当考虑. 它的作用使质子、中子的有效质量在核物质中发生劈裂, 导致中子有效质量相对于质子有效质量变小.

图 1(d) 给出了中子星物质中不对称(或中子剩余度)参数 α 随核物质密度的变化. 从中可以看出是否考虑 DB 核物质中核子自能动量的修正对核物质不对称参数影响较大. 由于核物质不对称参数与核物质中质子含量满足简单的关系: $\alpha = 1 - 2x_p$, 因此图 1(b) 与图 1(d) 所包含的物理信息是一样的, 但由于在不对称核物质的研究中常用不对称参数, 而 URCA 过程的分析常用质子的含量, 这里同时做出图 1(b) 与图 1(d) 有助于对中子星物质物理问题的理解.

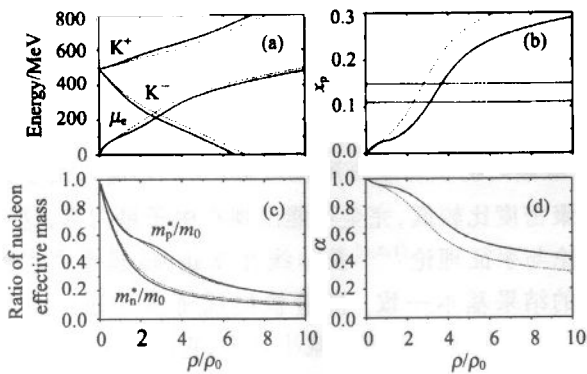


图 1 分别计算了 K 介子的能量与电子的化学势(a), 中子物质中质子的含量(b), 核子有效质量的比率(c)及中子星物质中的不对称参数(d)分别随核物质密度的变化
实线表示考虑 DB 核物质中核子自能动量的修正,
虚线表示不考虑 DB 核物质中核子自能动量的修正.

图 2 分别计算了中子星物质每核子能量与压强分别随核物质密度的变化. 从曲线的变化趋势来说是合理的, 它们简单地验证了密度相关的相对论平均场理论参数化方案是正确的. 从图 2 中可以看出不考虑 DB 核物质中核子自能动量的修正给出的核状态方程比考虑此修正后给出的状态方程更软一些.

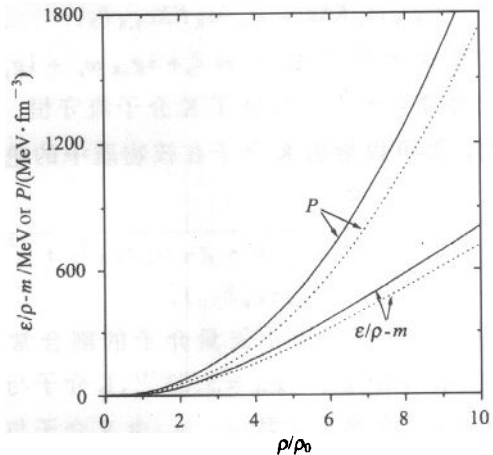


图 2 分别计算了中子星物质每核子能量与压强分别随核物质密度的变化
图中曲线说明同图 1.

总之, 本文使用密度相关的相对论平均场理论新的参数化形式, 计算了中子星物质中的 K 介子凝聚及中子星物质中 URCA 过程发生的条件. 结果表明该理论模型是支持中子星物质中 K 介子凝聚的, 临界密度约为 $2.75\rho_0$. 在考虑 DB 核物质中核子自能动量修正时的 URCA 过程的临界密度为 $\frac{\rho}{\rho_0} \approx 3.16$, 而不考虑该修正时 URCA 过程的临界密度变小为 $\frac{\rho}{\rho_0} \approx 2.25$. 同时也表明在对密度相关的相对论平均场理论模型作参数化时是否考虑 DB 核物质中核子自能动量修正对中子星物质状态方程的影响是比较大的, 在中子星物质问题的分析中, 考虑 δ 介子也是非常必要的.

作者感谢兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心同行的有益讨论.

参考文献 (References)

- 1 Kaplan D B, Nelson A E. *Phys. Lett.*, 1986, **B175**:57—63
- 2 Nelson A E, Kaplan D B. *Phys. Lett.*, 1987, **B192**:193—197
- 3 Brown G E, Ko C M, Kubodera K. *Z. Phys.*, 1992, **A341**:301—305
- 4 Brown G E, Lee C H, Rho M et al. *Nucl. Phys.*, 1994, **A567**:937—956
- 5 Serot B D, Walecka J D. *Adv. Nucl. Phys.*, 1986, **16**:1—327
- 6 Schaffner J, Gal A, Mishustin I N et al. *Phys. Lett.*, 1994, **B334**:268—274
- 7 Maruyama T, Fujii H, Muto T et al. *Phys. Lett.*, 1994, **B337**:19—24
- 8 Schaffner J, Mishustin I N. *Phys. Rev.*, 1996, **C53**:1416—1429
- 9 Tsushima K, Saito K, Thomas A W et al. *Phys. Lett.*, 1998, **B429**:239—246
- 10 DAI Z G, CHENG K S. *Phys. Lett.*, 1997, **B401**:219—223
- 11 Glendenning N K, Schaffner J. *Phys. Rev.*, 1996, **C60**:025803 - 1—025803 - 13
- 12 Aichelin J, Ko C M. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**:2661—2663
- 13 LI G Q, Ko C M. *Nucl. Phys.*, 1995, **A594**:460—482
- 14 Schaffner J, Mishustin I N, Bondorf J. *Nucl. Phys.*, 1997, **A625**:325—346
- 15 Hofmann F, Keil C M, Lenske H. *Phys. Rev.*, 2001, **C64**:034314 - 1—034314—16
- 16 Lattimer J M, Pethick C J, Prakash M et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**:2701—2704

Kaon Condensation in Neutron Star Matter *

GUO Hua^{1,2} LIU Bo^{1,3} LI Xi-Guo^{1,4} CHEN Yan-Jun²

1 (Center of Nuclear Theoretical Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou 730000, China)

2 (Department of Technical Physics, and MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

3 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

4 (Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract The Kaon condensation in neutron star matter is calculated in the framework of the density dependent relativistic mean-field theory. The present results show that the critical density for the Kaon condensation is $\sim 2.75\rho_0$, while the critical densities for the URCA process in neutron star matter are $\frac{\rho}{\rho_0} \approx 3.16$ for the parameter set fitted to the DB nucleon self-energies of nuclear matter with the momentum-dependent correction, and $\frac{\rho}{\rho_0} \approx 2.25$ for the parameter set without the momentum-dependent correction. Then, influences of the two different model parameter sets on the equation of state of neutron star matter are discussed.

Key words Kaon condensation, density dependent relativistic mean-field theory, neutron star matter

Received 21 March 2002

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077400), CAS Knowledge Innovation Project (KJ92 - SW - N02) and National Natural Science Foundation of China (19975053, 10075071, 10275002)