

中子星物质中的 K^- , \bar{K}^0 凝聚*

丁文波¹⁾ 刘广洲²⁾

(吉林大学理论物理中心 长春 130023)

摘要 采用相对论平均场理论研究 \bar{K} 凝聚对中子星物质的影响. 研究发现即使在含重子八重态和 Δ 共振态 ($n, p, \Lambda, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-, \Delta^0, \Delta^-$) 的中子星物质中, K^- , \bar{K}^0 凝聚也可以发生, 并详细研究了超子与 \bar{K} 凝聚相互影响的行为. \bar{K}^0 凝聚压低 K^- 凝聚, 促进 Δ 共振态的出现, 在中子星的核心区域, 最终形成多种重子共存的、各重子数密度趋于均衡、且 \bar{K}^0 凝聚占最大比重的中子星物质. \bar{K} 凝聚使物态方程变软, 进而减小中子星的最大质量, 使之更接近于中子星正则质量.

关键词 中子星物质 物态方程 \bar{K} 凝聚

1 引言

中子星作为致密物质的天然实验室, 近来已成为强子物理和天体物理学研究的热点. 在高密条件下, 很多物质形态会出现, 像超子^[1]、反 K 介子的玻色爱因斯坦凝聚^[2, 3] 和退禁闭的夸克物质^[4-6] 等等. 目前很多重离子碰撞实验都显示 K^- 介子有较高的产率^[7, 8], 并且 K^- 与重子之间有很强的吸引作用^[9, 10], 所以 K^- 凝聚很可能存在于中子星内部.

研究致密物质中 \bar{K} 凝聚的模型主要有: 相对论平均场理论 (RMFT) 下的介子交换模型^[11-14], 手征微扰模型^[9, 10], 以及密度依赖强子场模型^[15]. 本文采用相对论平均场理论, 考虑了重子八重态及 Δ 共振态, 研究重子与 \bar{K} 凝聚相互影响的行为.

2 理论模型和结果讨论

总的拉氏量由重子、轻子、 K 介子部分组成.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_B = & \sum_B \bar{\Psi}_B (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_B + g_{\sigma B} \sigma - g_{\omega B} \gamma_\mu \omega^\mu - \\ & \frac{1}{2} g_{\rho B} \gamma_\mu \boldsymbol{\tau}_B \cdot \boldsymbol{\rho}^\mu) \Psi_B + \frac{1}{2} \partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \\ & U(\sigma) - \frac{1}{4} \omega_{\mu\nu} \omega^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4} \boldsymbol{\rho}_{\mu\nu} \cdot \boldsymbol{\rho}^{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2} m_\rho^2 \boldsymbol{\rho}_\mu \cdot \boldsymbol{\rho}^\mu. \end{aligned} \quad (1)$$

重子用 $B = \{n, p, \Lambda, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-, \Delta^0, \Delta^-\}$ 表示. Ψ_B 为重子 B 的狄拉克旋量, m_B 为其真空质量, τ_B 为同位旋算符, $g_{\sigma B}$, $g_{\omega B}$, $g_{\rho B}$ 为重子 B 与 σ , ω , ρ 场的耦合常数, $\omega^{\mu\nu}$, $\rho^{\mu\nu}$ 为 ω , ρ 场的场张量. 轻子部分拉氏量为

$$\mathcal{L}_l = \sum_l \bar{\Psi}_l (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_l) \Psi_l. \quad (2)$$

$l = (e, \mu)$, m_l 为轻子质量, Ψ_l 为轻子旋量. 反 K 介子的拉氏量表示为

$$\mathcal{L}_K = D_\mu^* \bar{K} D^\mu K - m_K^* \bar{K} K, \quad (3)$$

$$D_\mu = \partial_\mu + ig_{\omega K} \omega_\mu + ig_{\rho K} \boldsymbol{\tau}_K \cdot \boldsymbol{\rho}^\mu, \quad (4)$$

$$m_K^* = m_K - g_{\sigma K} \sigma. \quad (5)$$

K 介子的两个同位旋二重态分别表示为: $K = (K^+, K^0)$, $\bar{K} = (K^-, \bar{K}^0)$. \bar{K} 在介质中的有效能量:

$$w_{\bar{K}} = m_{\bar{K}} - g_{\sigma K} \sigma - g_{\omega K} \omega_0 \mp \frac{1}{2} g_{\rho K} \rho_{03}. \quad (6)$$

K^- 对应负号, \bar{K}^0 对应正号, m_{K^-} 与 $m_{\bar{K}^0}$ 略有差别. 对于冷中子星, 化学势满足:

$$\mu_n - \mu_p = \mu_e = \mu_\mu, \mu_{K^-} = \mu_e, \mu_{\bar{K}^0} = 0. \quad (7)$$

K^- , \bar{K}^0 凝聚的条件为

* 国家自然科学基金(10275029)资助

1) E-mail: dingwenbo1980@eyou.com

2) E-mail: lgz@jlu.edu.cn

$$w_{K^-} = \mu_{K^-} = \mu_e. \quad (8)$$

$$w_{\bar{K}^0} = \mu_{\bar{K}^0} = 0. \quad (9)$$

本文采用GL91参数^[11]. K 介子的耦合常数 $g_{\omega K} = 1/3g_{\omega N}$, $g_{\rho K} = g_{\rho N}$. $g_{\sigma K}$ 由(10)式得到:

$$U_{\bar{K}}(r_0) = -g_{\sigma K}\sigma - g_{\omega K}\omega_0. \quad (10)$$

含核子、轻子、超子、 Δ 共振态、 \bar{K} 凝聚的中子星物质(npHK $-\bar{K}^0$)的相关结果见表1. 超子的出现使物态方程变软, 迫使 \bar{K} 凝聚的临界条件只能在较高的密度处得到满足. 从不含 \bar{K} 凝聚的粒子分布(图1(a))来看, 各重子及 Δ 共振态都在中子星达到最大质量前出现, 并且随密度的增加, 各重子数正在趋于一致.

致. $U_{\bar{K}} = -120\text{MeV}$ 时 K^- 凝聚发生在 0.5399fm^{-3} 处(图1(b)), 随着 $|U_{\bar{K}}|$ 的增加, $\rho_{\text{cr}}(K^-)$ 减小. K^- 凝聚对中性重子($n, \Lambda, \Sigma^0, \Delta^0$)影响不是很大(表1), 只是共振态 Δ^0 比纯超子时提前出现. 受 K^- 凝聚影响较大的是带负电的重子 $\Sigma^-, \Xi^-, \Delta^-$. K^- 凝聚后, 本来迅速上升的 Σ^- 开始下降, 而质量较大的 Ξ^-, Δ^- 根本无法出现. 这些带负电的粒子被排斥的现象正是由于带负电的、三维动量为零的玻色子 K^- 取代其他带负电的重子来维持电中性, 使整个中子星能量最低的缘故. 带正电的粒子(p 和 Σ^+)增加较快, 这是由于过大的 ρ_{K^-} 需要正电粒子与其一同保持电中性的缘故, 并且光学势越深, 这种需要越迫切.

表1 各光学势下, npHK $-\bar{K}^0$ 物质与纯超子物质的主要计算结果

	-100(MeV)	-120(MeV)	-140(MeV)	-160(MeV)	纯超子
$\rho_{\text{cr}}(K^-)(u_{\text{cr}}(K^-))$	0.6565(4.291)	0.5399(3.529)	0.4558(2.979)	0.3921(2.563)	-
$\rho_{\text{cr}}(\bar{K}^0)(u_{\text{cr}}(\bar{K}^0))$	0.8692(5.681)	0.7522(4.916)	0.6468(4.227)	0.5511(3.602)	-
M_{max}/M_{\odot}	2.0474	1.9173	1.6922	1.4565	2.1318
R/km	11.877	12.286	12.856	13.473	11.189
$\rho_{\text{cent}}(u_{\text{cent}})$	0.9342(6.106)	0.8797(5.750)	0.7507(4.907)	0.5512(3.603)	1.0123(6.616)
$\rho_{\text{cr}}(\Lambda)(u_{\text{cr}}(\Lambda))$	0.2892(1.890)	0.2892(1.890)	0.2892(1.890)	0.2892(1.890)	0.2892(1.890)
$\rho_{\text{cr}}(\Sigma^-)(u_{\text{cr}}(\Sigma^-))$	0.2748(1.796)	0.2748(1.796)	0.2748(1.796)	0.2748(1.796)	0.2748(1.796)
$\rho_{\text{cr}}(\Sigma^0)(u_{\text{cr}}(\Sigma^0))$	0.5179(3.385)	0.5179(3.385)	0.5150(3.366)	0.5225(3.415)	0.5179(3.385)
$\rho_{\text{cr}}(\Sigma^+)(u_{\text{cr}}(\Sigma^+))$	0.6597(4.312)	0.6156(4.024)	0.5732(3.746)	0.5307(3.469)	0.6613(4.322)
$\rho_{\text{cr}}(\Xi^-)(u_{\text{cr}}(\Xi^-))$	0.5405(3.533)	-	-	-	0.5405(3.533)
$\rho_{\text{cr}}(\Delta^0)(u_{\text{cr}}(\Delta^0))$	0.8899(5.816)	0.8307(5.429)	0.7657(5.005)	-	0.9130(5.967)
$\rho_{\text{cr}}(\Delta^-)(u_{\text{cr}}(\Delta^-))$	0.9017(5.893)	0.8412(5.498)	0.7749(5.065)	-	0.7528(4.920)

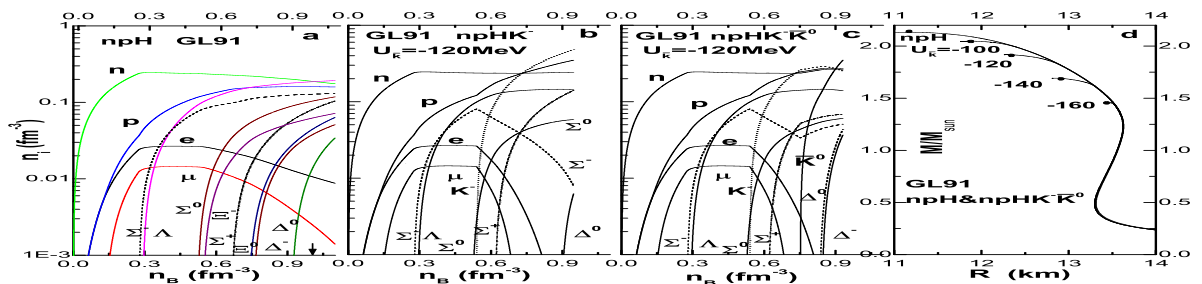


图1 (a) GL91参数下, 仅含超子的中子星物质的粒子分布图(箭头对应中子星达到最大质量时的核心密度); (b) $U_{\bar{K}} = -120\text{MeV}$ 时, npHK $^-$ 中子星物质的粒子分布图; (c) $U_{\bar{K}} = -120\text{MeV}$, npHK $-\bar{K}^0$ 的中子星物质的粒子分布图; (d) npHK $-\bar{K}^0$ 物质在各光学势下得出的中子星质量半径关系(各曲线上的圆点对应最大质量)

\bar{K}^0 凝聚在重子数密度为 0.7522fm^{-3} 处发生(图1(c)), 其后各粒子所占比重发生很大变化. 观察图1(c)发现, \bar{K}^0 凝聚阻碍原本(npHK $^-$ 时)迅速上升的 K^- , p , Σ^+ 粒子数密度的增加, 促进原本下降的带负电超子 Σ^- 密度曲线上升, 利于共振态 Δ^0, Δ^- 的出现, 而 \bar{K}^0 本身以非常快的速度上升. 所以 \bar{K}^0 凝聚的作用是促使物质向多重子、各重子数趋于均衡、 \bar{K}^0 凝聚占

优^[16]的方向逼近.

超子和 \bar{K} 凝聚使物态方程在很大程度上被软化. 通过求解TOV方程^[17, 18]得到中子星质量半径关系, 见图1(d). 半径随光学势的加深而增大, 中子星最大质量减小, 尤其是 $U_{\bar{K}} = -160\text{MeV}$ 时, 最大质量降到 $1.4565M_{\odot}$, 这已经与实验观测数据很接近了.

3 结论

采用相对论平均场理论^[1, 13], K^- , \bar{K}^0 凝聚都按二级相变处理, 分别讨论了核物质(np), np K^- \bar{K}^0 物质, 超子(重子八重态, Δ^0, Δ^-)物质及npHK $^-$ \bar{K}^0 物质在各光学势下的结果. 发现无论在np K^- \bar{K}^0 还是npHK $^-$ \bar{K}^0 物质中, K^- , \bar{K}^0 凝聚在合适的光学势下都可以发生. \bar{K} 凝聚受光学势影响较明显. $|U_{\bar{K}}|$ 越大, \bar{K} 凝聚的临界密度越小, 并且 K^- 凝聚总是先于 \bar{K}^0 凝聚发生. \bar{K} 凝聚使物态方程变软, 在这方面起主要作用

的是 K^- 凝聚, 光学势越深, 中子星最大质量越小, 半径略微变大, 但也在理论允许的范围内^[19, 20]. K^- 凝聚的作用在于取代其它带负电的粒子来维持电中性, 使整个系统能量最低, 进而软化物态方程, 使中子星最大质量大幅度减小. 而 \bar{K}^0 凝聚的出现压低了 K^- 凝聚, 使带正电的p, Σ^+ 密度曲线上升幅度减小, 而 Σ^- 曲线则因 \bar{K}^0 凝聚开始回升, 共振态 Δ^- 得以出现. \bar{K}^0 凝聚只能在较小程度上减小中子星的最大质量, 而它的主要作用是促使多种重子出现, 且各重子数趋于均衡, 因此在中子星的密度极高的核心处, 最终会形成多种重子共存的 \bar{K}^0 凝聚占主导的物质.

参考文献(References)

- 1 Norman K Glendenning. *Astrophys. J.*, 1985, **293**: 470—493
- 2 Kaplan D B, Nelson A E. *Phys. Lett.*, 1986, **B175**: 57—63
- 3 Nelson A E, Kaplan D B. *Phys. Lett.*, 1987, **B192**: 193—197
- 4 Norman K Glendenning. *Compact Stars*. New York: Springer-Verlag New York, Inc, 1997. 1—179
- 5 Sarmistha Banik, Debades Bandyopadhyay. *Phys. Rev.*, 2003, **D67**: 123003-1—123003-10
- 6 Sarmistha Banik, Debades Bandyopadhyay. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 2004, **30**: s525—s530
- 7 Barth R, Senger P, Ahner W. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**: 4007—4010
- 8 LI G Q, Lee C H, Brown G E. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**: 5214—5217
- 9 Brown G E, Lee C H, Rho M et al. *Nucl. Phys.*, 1994, **A567**: 937—956
- 10 Lee Chang-Hwan, Brown G E, Min Dong-Pil. *Nucl. Phys.*, 1995, **A585**: 401—449
- 11 Norman K Glendenning. *Phys. Rep.*, 2001, **342**: 393—447
- 12 Subrata Pal, Debades Bandyopadhyay, Walter Greiner. *Nucl. Phys.*, 2000, **A674**: 553—577
- 13 Norman K Glendenning, Jürgen Schaffner-Bielich. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**: 025803-1—025803-12
- 14 Jürgen Schaffner-Bielich, Igor N. Mishustin, Jakob Bondorf. *Nucl. Phys.*, 1997, **A625**: 325—346
- 15 Sarmistha Banik, Debades Bandyopadhyay. *Phys. Rev.*, 2002, **C66**: 065801-1—065801-12
- 16 Debades Bandyopadhyay. *Journal-ref: Pramana*, 2006, **66**: 817—826
- 17 Tolman R C. *Phys. Rev.*, 1939, **55**: 364—373
- 18 Oppenheimer J R, Schwinger J S. *Phys. Rev.*, 1939, **56**: 1066—1067
- 19 Stockdale I E, Bodek A, Borcharding F et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **52**: 1384—1388
- 20 Coleman Miller M, Frederick K Lamb, Dimitrios Psaltis. *Astrophys. J.*, 1998, **508**: 791—830

Condensations of K^- and \bar{K}^0 in Neutron Star Matter*

DING Wen-Bo¹⁾ LIU Guang-Zhou²⁾

(Center for Theoretical Physics, Jilin University, Changchun 130023, China)

Abstract In the framework of the relativistic mean field theory(RMFT), the condensations of K^- and \bar{K}^0 in neutron star matter are studied. We find that K^- and \bar{K}^0 condensations can both occur, even in the case that the neutron star matter includes baryon octet and Δ resonances. Also we investigate how hyperons and \bar{K} condensations influence each other. \bar{K}^0 condensations depress K^- condensations and make Δ resonances appear easily. In the high density region, the system may consist of many kinds of baryons, whose number densities are becoming identical. And ultimately \bar{K}^0 -rich matter is formed in the core. The equation of state including \bar{K} condensations becomes softer resulting in a smaller maximum mass of neutron star.

Key words neutron star matter, the equation of state, \bar{K} condensations

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10275029)

1) E-mail: dingwenbo1980@eyou.com

2) E-mail: lgz@jlu.edu.cn