

文章编号: 1007-4627(2011)03-0272-04

超子耦合参数对热前中子星物质的影响*

喻 孜¹, 丁文波²

(1 南京林业大学理学院, 江苏 南京 210037;

2 渤海大学物理系, 辽宁 锦州 121001)

摘 要: 在相对论平均场理论框架内, 利用 Λ 超子的结合能和中子星质量的观测数据得到超子标量介子耦合参数 χ_σ 的范围是 0.33—0.77。在这个范围内, 研究了 χ_σ 取不同值时, 包含核子, Λ 和 Ξ 超子的热前中子星(固定单个重子熵 $s=1$)的性质。结果表明, 如果超子耦合参数变大, 前中子星核心温度变高, 中微子丰度变低, 前中子星的亚稳态质量范围变小。如果 χ_σ 超过了 0.75, 前中子星不可能演变成黑洞。联系 SN1987A 讨论了这一结果的意义。

关键词: 超子; 有限温; 前中子星; 相对论平均场

中图分类号: O572.24

文献标识码: A

1 引言

中子星物质内可能出现超子^[1], 但人们并不完全了解超子-核子以及超子-超子相互作用。因此, 在相对论平均场理论(RMFT)框架内, 对超子耦合参数尚未确定。利用中子星的观测数据和核实验数据, 只能给出超子耦合参数的范围^[2]。目前, 关于超子的耦合参数也存在多种取法^[1], 各种取法都可以在核物质饱和密度处得到相同的结果。然而, 在密度远高于饱和密度时, 不同的参数会得到不同的核物质状态方程。目前, 一些学者已经研究了超子耦合参数对中子星物质性质的影响^[3-6]。所有这些研究都包含了 Σ 超子。最新的核物理进展表明 Σ 超子似乎不太可能出现在稳定的核物质内^[7-9]。没有了 Σ 超子, 用天文观测和核实验数据确定的超子耦合参数的范围应该会变化。另一方面, 人们对超子耦合参数对前中子星物质影响的研究还比较少。前中子星诞生于 II 型超新星爆发事件, 是一个高温物体^[10-11]。在研究超子耦合参数对前中子星物质的影响时, 必须考虑温度。本文在相对论平均场框架内, 先结合天文观测与 Λ 超子的结合能给出了新的超子耦合参数范围。接着在这个范围内, 研究了超子耦合参数对热前中子星物质(单重子平均熵 $s=1$)的影响。联系天文观测讨论了结果的意义。

2 理论模型

在 RMFT 框架内, 包含超子的前中子星物质的拉氏密度^[1]为

$$\begin{aligned} L = & \sum_B \bar{\Psi}_B [i\gamma_\mu \partial_\mu - (M_B - g_{\sigma B} \tau \cdot \delta - g_{\sigma B} \sigma) - \\ & g_{\omega B} \omega_\mu \gamma^\mu - g_{\rho B} \gamma_\mu \tau \cdot \rho^\mu] \Psi_B + \\ & \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2) - U(\sigma) + \\ & \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho_\mu \rho^\mu + \\ & \frac{1}{2} (\partial_\mu \delta \partial^\mu \delta - m_\delta^2 \delta^2) - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - \\ & \frac{1}{4} G_{\mu\nu} G^{\mu\nu} + \sum_l L_l, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, 对 B 求和是对重子种类($n, p, \Lambda, \Xi^-, \Xi^0$)求和。 $U(\sigma)$ 代表 σ 介子的自耦合项, 具体形式为 $U(\sigma) = a\sigma^3/3 + b\sigma^4/4$ 。对 l 求和是对星体物质内可能出现的轻子种类求和。中子星内是对电子(e)以及 μ 介子求和, 而前中子星内是对电子以及电子中微子(ν_e)求和。

前中子星物质是一个整体电中性和 β 平衡物质, 因而满足化学势及电中性相关的等式(详情见文献[1])。定义粒子 i 的数密度与重子数密度的比为 $Y_i = \rho_i / \rho_B$ 。前中子星物质是一个丰轻子物质, 满

* 收稿日期: 2010-09-27; 修改日期: 2010-10-18

* 基金项目: 江苏省高校自然科学基金基础研究项目基金资助(10KJB140002)

作者简介: 喻孜(1981—), 男(汉族), 湖北武汉人, 博士, 讲师, 从事核天体物理研究; E-mail: ziyu1981@gmail.com

足 $Y_e + Y_{\nu_e} = 0.4$ ，其中下标 e 和 ν_e 分别代表电子和电子中微子。基于前人的工作^[11]，认为前中子星是一个等熵物体，其中单重子平均熵为 $s = 1$ ，即满足

$$s = \frac{1}{\rho_B V} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial T} \right)_{V, \mu} = \frac{1}{\rho_B T} (p + \varepsilon - \sum_B \mu_B \rho_B) = 1, \quad (2)$$

式中， p 和 ε 分别表示前中子星物质的压强和能量密度。计算前需要确定耦合参数。对于核子，采用了 GL91 参数组(详情见文献[2])。对于超子，耦合参数由超核的数据决定。通常将超子-核子耦合参数

$$\chi_\sigma = \frac{g_{H\sigma}}{g_\sigma}, \quad \chi_\omega = \frac{g_{H\omega}}{g_\omega}, \quad \chi_\rho = \frac{g_{H\rho}}{g_\rho}$$

分别称为超子标量介子耦合参数、超子矢量介子耦合参数和超子同位旋介子耦合参数。目前，有大量关于 Λ 超子的数据。对这些数据的分析表明， Λ 超子的结合能在 $-27 \sim -30$ MeV 之间^[12]，本文取为 -28 MeV。 Ξ 的数据很少，可简单认为与 Λ 超子的相同。相对论平均场框架内， Λ 的结合能可以写成^[2]

$$\frac{B}{A_\Lambda} = \chi_\omega g_\omega \omega_0 - \chi_\sigma g_\sigma \sigma_0 = -28 \text{ MeV}. \quad (3)$$

自由地选择 χ_σ ，对于每一个 χ_σ ， χ_ω 的值由式(3)决定。这样可以得到一对对的 χ_σ 与 χ_ω 的值。 χ_ρ 的值对状态方程影响不大，可认为 $\chi_\rho = \chi_\sigma$ 。

3 结果与讨论

图 1 给出了中子星的最大质量随 χ_σ 的变化。对中子星质量的观测表明，中子星的最小质量约为 $1.45 M_{\text{sun}}$ ，而最大质量约为 $2.15 M_{\text{sun}}$ ^[13-14]。因而，变化 χ_σ 的值所得到的中子星的质量应该在这个范围内。如图 1 所示， χ_σ 的取值下限为 0.33。与前人的工作^[2]相比，由于排除了 Σ 超子，星体状态方程变硬，因而下限略有减小(文献[2]的取值下限为 0.5)。对于取值上限，文献[2]引用了早期的结果，认为应该小于 0.72。如果选定 0.72 作为上限，包含超子的中子星的质量将不会超过 $2.06 M_{\text{sun}}$ (见图 2)。最近的一些结果表明，包含了超子的中子星质量可能比 $2.06 M_{\text{sun}}$ 大^[15]。为了能够给出大质量前中子星的性质对超子耦合参数的依赖情况，本文完全采用中子星的观测质量来限定 χ_σ 的范围。这样， χ_σ 的上限为 0.77。

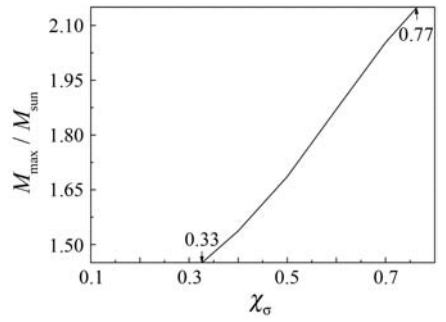


图 1 中子星最大质量随 χ_σ 的变化
纵坐标的最小值为 $1.45 M_{\text{sun}}$ ，最大值为 $2.15 M_{\text{sun}}$ 。

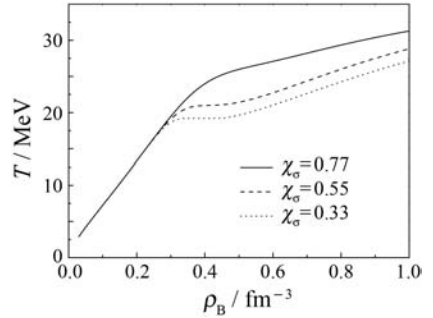


图 2 取不同 χ_σ 值时，前中子星物质的温度随密度的变化

得到了 χ_σ 的范围为 0.33—0.77，可以在这个范围内考查前中子星物质的性质。从图 2 可以看到，增大超子标量耦合参数，密度较低处，前中子星物质的温度没有变化。当密度高于 0.28 fm^{-3} 时，超子标量耦合参数越大，温度越高。这表明，如果超子-核子相互作用强度越大，前中子星的内核越热。中微子的丰度直接关系到前中子星的冷却，因而中微子丰度是前中子星物质的重要物理量。从图 3 可看到，在密度范围为 $0.3 \sim 0.6 \text{ fm}^{-3}$ 处， χ_σ 值越大，中微子丰度越小。前中子星最大中

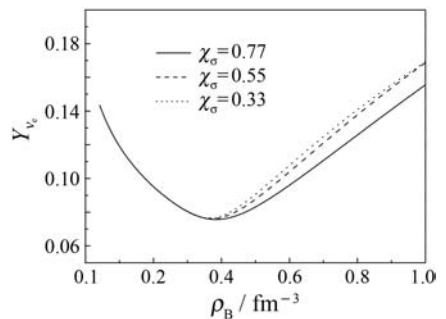


图 3 前中子星物质内中微子数比例随前中子星密度的变化
心密度范围一般位于 $0.3 \sim 0.6 \text{ fm}^{-3}$ 内，所以，图 3 表明，超子-核子相互作用强度越大，前中子星内核的中微子丰度越小。

前中子星诞生后,星体内束缚的中微子很快会逃逸。逃逸的中微子带走大量的热量,导致前中子星温度下降,成为一个少轻子的冷中子星($Y_\nu = 0, T=0$)。在演化过程中,整个星体的总重子数应该守恒。从图 4(a)可以看到,当 χ_σ 为 0.6 时,冷中子星最多能含有 $10^{57.40}$ 个重子,而热前中子星最多可含有 $10^{57.43}$ 个重子。质量在 AB 区域内的前中子星将不会演化成冷中子星。由于含有较多的重子数,这些中子星在演化过程中会进一步坍缩,变成一个

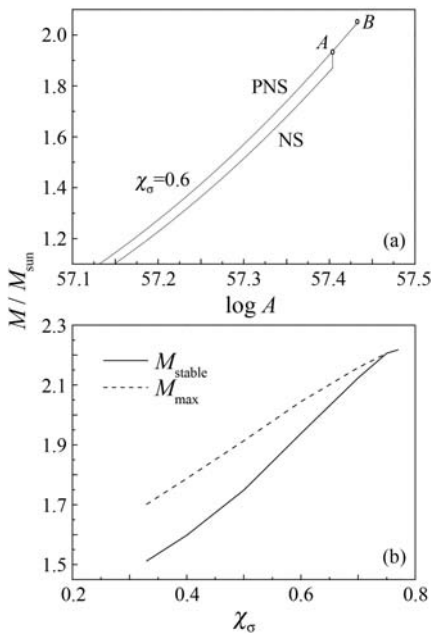


图 4 中子星的质量随 χ_σ 的变化

(a) $\chi_\sigma = 0.6$ 时,中子星(NS)及前中子星(PNS)的质量随星体总的重子数质量的变化, A 为星体总的重子数; (b)前中子星的最大质量 M_{max} 和最大稳定质量 M_{stable} 随超子标量耦合常数的变化。

小质量的黑洞。因为这些前中子星在演化过程中会发生不稳定的坍缩,所以把处于 AB 区域内的前中子星称为处于亚稳态的前中子星。把位于 A 点的前中子星称为具有最大稳定质量的前中子星。如果前中子星的质量比最大稳定质量小,它将会稳定地演化为一颗冷星。在 χ_σ 为其它值时,也可以找到处于亚稳态的前中子星,类似的图像没有给出来。图 4(b)给出了前中子星的最大质量 M_{max} 和最大稳定质量 M_{stable} 随超子标量耦合常数的变化。在图中两条曲线之间的部分就是亚稳态质量范围。随着超子标量耦合常数增大,亚稳态质量范围迅速变小。 χ_σ 为 0.33 时,亚稳态质量范围是 $0.3 M_{\text{sun}}$, χ_σ 为 0.75

时质量范围缩小成了 0。当 $\chi_\sigma > 0.75$ 时,亚稳态区域消失。这说明当 $\chi_\sigma > 0.75$ 时前中子星不会演化成黑洞。

本文在 RMFT 框架内用天文观测的数据限定了 χ_σ 的范围为 0.33—0.77。在这个范围内讨论了超子耦合常数对前中子星的影响。结果表明,超子耦合常数增大,星体核心处温度变高,中微子丰度变小,前中子星的亚稳态质量范围变小。当 $\chi_\sigma > 0.75$ 时,前中子星将不会演化成黑洞。在 SN1987A 中应该诞生了一颗中子星,但是随后的数据表明 SN1987A 的残留物似乎应该是一个黑洞^[16]。其中的原因可能是,SN1987A 内先诞生了一颗处于亚稳态的前中子星而后这颗亚稳态的前中子星转化成了黑洞。如果确实发生了这种转化,本文的结果表明超子标量耦合常数不会超过 0.75。因此,这种由前中子星到黑洞转变的天文现象与超子-核子相互作用是有关联的,或许可以成为限定超子耦合参数的一种新方法。

参考文献 (References):

[1] Glendenning N K. Compact stars: Nuclear Physics, Particle Ph and General Relativity. Springer: New York, 1997: 206 — 234.

[2] Glendenning N K, Moszkowski S A. Phys Rev Lett, 1991, **67**: 2414.

[3] Glendenning N K. Phys Rev, 2001, **C64**: 025801.

[4] Jia Huanyu, Sun Baoxi, Meng Jie, *et al.* Chin Phys Lett, 2001, **18**: 1571.

[5] Sun Baoxi, Jia Huanyu, Meng Jie, *et al.* Commun Theor Phys, 2001, **36**: 446.

[6] Liu Guangzhou, Zhao Enguang, Liu Wei, *et al.* Commun Theor Phys, 2004, **41**: 269.

[7] Batty C J, Friedman E, Gal A, *et al.* Phys Lett, 1994, **B335**: 273.

[8] Balberg S, Gal A, Schaffner J. Prog Theor Phys, 1994, **117** (Suppl): 325.

[9] Stoks V G J, Lee T S H. Phys Rev, 1999, **C60**: 024006.

[10] Bethe H A. Rev Mod Phys, 1990, **62**: 801.

[11] Burrows A, Hayes J, Fryxell B A. The Astrophysical Journal, 1995, **450**: 830.

[12] Millener D J, Dover C B, Gal A. Phys Rev, 1988, **C38**: 2700.

[13] Taylor J H, Weisberg J M. Astrophys J, 1989, **345**: 434.

[14] Joss P C, Rappaport S A. Annu Rev Astron Astrophys,

1984, **22**: 537.

024021.

[15] Lackey B D, Nayyar M, Owen B J. Phys Rev, 2006, **D73**:[16] Burrows A. The Astrophysical Journal, 1988, **334**: 891.

Effect of Hyperon Couplings on Thermal Protoneutron Star Matter^{*}

YU Zi^{1, 1)}, DING Wen-bo²*(1 College of science, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;**2 Physics Department of Bohai University, Jinzhou 121000, Liaoning, China)*

Abstract: In the framework of the relativistic mean field theory(RMFT), protoneutron stars with hyperons are studied. To be compatible with neutron star masses, the hyperon scalar coupling χ_σ should lie in the range of 0.33—0.77. As the hyperon scalar coupling increases, in protoneutron star matter, the core temperature increases whereas the abundance of neutrinos decreases. The metastable mass range of protoneutron stars narrows as the temperature increases. It is found that a protoneutron star cannot subside into a low mass black hole when $\chi_\sigma > 0.75$. Furthermore, the case of SN1987A is discussed.

Key words: hyperon; finite temperature; protoneutron star; RMFT

* Received date: 27 Sep. 2010; Revised date: 18 Oct. 2010

* Foundation item: Natural Science Fundamental Research Project of Jiangsu Colleges and Universities(10KJB140002)

1) E-mail: ziyu1981@gmail.com