

介质效应对中子星性质的影响*

刘波^{1;1)} 郭华²

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2(北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 用 Bonn 势和包含介质修正的相对论平均场模型讨论了介质效应对中子星性质的影响,结果表明 BR 标度参数的增加导致中子星质量及半径的增加.

关键词 Bonn 势 相对论平均场模型 介质效应 中子星

1 引言

高能核-核碰撞为在实验室内研究热密物质提供了可能性,所以研究热密物质的性质,尤其是研究极端条件下核物质的性质已引起理论物理学家和实验物理学家很大的兴趣,同时放射性束流引起的重离子反应也为研究远离 β 稳定线的核素和中子物质以及中子星的性质开辟了新的途径. 这些方面的实验拓宽了核物理研究的范围,也对现有的核理论模型的检验和完善以及发展起到了极大的推动作用.

Walecka^[1,2] 根据相对论量子场论首先提出了量子强子动力学(QHD)来描述相对论多体问题. 在 QHD 中,核子通过交换 σ 和 ω 介子相互作用,所以该模型又称为 Walecka 的 σ - ω 模型. 解这个模型的通常方法是平均场近似,既介子场是由其平均值代替,人们通常称为相对论平均场(RMF)近似. 近年来,相对论平均场近似被广泛用来研究有限核的静态和动力学以及核物质和中子星的状态方程并取得较大成功^[3-20],但平均场近似方法忽略了介子在核物质中的极化所引起的对状态方程的修正等效应^[21],其中某些效应在极端条件下也可能是重要的,因此对现有的相对论平均场近似模型作适当的改进是有意义的.

Brown 和 Rho^[22] 提出了密度有关的有效场理论描述多粒子体系和 Brown-Rho(BR)标度描述介质效

应对强子质量的修正. 近来 Song et al.^[23,24] 用有效的手征对称拉氏量密度和 BR 标度来描述对称核物质的基态性质,该模型的可调参数较多^[19,23,24]. 实际上,模型参数特别是核子与介子相互作用常数反映了强作用的强度,是与核力相关联的,而核力的作用强度和范围又可以通过核子-核子(N-N)散射实验数据来唯象地确定,例如,相对论的 Bonn 势^[25] 的参数是通过符合氘核的性质和低能 N-N 散射实验而确定的,能很好地描述低能时自由的 N-N 散射相移和氘核的基态性质. 我们用 Bonn 势的 B 组参数在相对论平均场理论的框架下,并引入 BR 标度描述介质对强子质量的修正效应,构造出改进的相对论平均场有效模型,在某种意义上是一种新的密度相关的模型,并进一步把该模型推广到有限温度的情况^[26]. 而本文的目的在于把所构造的相对论平均场有效模型用于研究介质效应对中子星性质的影响.

2 模型拉氏量密度和运动方程

具有 BR 标度且包括非线性项的有效拉氏量密度可以写为

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \bar{\psi} [i\gamma_{\mu} \partial^{\mu} - M^{*} + g_{\sigma} \phi - g_{\omega} \gamma_{\mu} \omega^{\mu} - g_{\rho} \gamma^{\mu} \tau \cdot \mathbf{b}_{\mu}] \psi + \\ & \frac{1}{2} (\partial_{\mu} \phi \partial^{\mu} \phi - m_{\sigma}^2 \phi^2) - U(\phi) + \\ & \frac{1}{2} m_{\omega}^2 \omega_{\mu} \omega^{\mu} + \frac{1}{4} c (\omega_{\mu} \omega^{\mu})^2 + \frac{1}{2} m_{\rho}^2 \mathbf{b}_{\mu} \cdot \mathbf{b}^{\mu} - \end{aligned}$$

2002-11-04 收稿,2003-02-09 收修改稿

国家自然科学基金(10275002),国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)资助

1) E-mail: liub@mail.ihep.ac.cn

$$\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu} G^{\mu\nu}, \quad (1)$$

其中 $\phi, \omega_\mu, \mathbf{b}_\mu$ 分别表示 σ, ω, ρ 介子场, τ 是同位旋矩阵, $F_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu \omega_\nu - \partial_\nu \omega_\mu$, $G_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu \mathbf{b}_\nu - \partial_\nu \mathbf{b}_\mu$, $U(\phi)$ 为 σ 介子的非线性势:

$$U(\phi) = \frac{1}{3} a\phi^3 + \frac{1}{4} b\phi^4, \quad (2)$$

式中 a 和 b 是 σ 介子非线性自相互作用项的系数, c 为 ω 介子非线性势的系数. 强子质量的 BR 标度为^[23]

$$\frac{M^*}{M} = \frac{m_\sigma^*}{m_\sigma} = \frac{m_\omega^*}{m_\omega} = \frac{m_\rho^*}{m_\rho} = \Phi(\rho), \quad (3)$$

其中 Φ 是核物质密度的函数^[23]

$$\Phi(\rho) = \frac{1}{1 + \gamma\rho/\rho_0}, \quad (4)$$

这里 γ 是所引入的 BR 标度参数, ρ 为重子数密度, ρ_0 是核物质饱和密度.

平均场近似下的场方程为

$$\begin{aligned} (i\gamma_\mu \partial^\mu - M^* + g_\sigma \phi - g_\omega \gamma^0 \omega_0 - g_\rho \gamma^0 \tau_3 b_0) \psi &= 0, \\ m_\sigma^{*2} \phi + a\phi^2 + b\phi^3 &= g_\sigma \langle \bar{\psi} \psi \rangle = g_\sigma \rho_i, \\ m_\omega^{*2} \omega_0 + c\omega_0^3 &= g_\omega \langle \psi^+ \psi \rangle = g_\omega \rho, \\ m_\rho^{*2} b_0 &= g_\rho \langle \psi^+ \tau_3 \psi \rangle = g_\rho \rho_3, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\rho_3 \equiv \rho_p - \rho_n$ 和 $\rho \equiv \rho_p + \rho_n$, 而 ρ_i 和 ρ_s 分别是核子 ($i = p, n$) 数密度和标量密度.

由于拉氏量密度(1)是与密度相关的, 为了保证热动力学自治性, 核子场的运动方程应包括重排项的贡献, 在平均场近似下可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \psi} &= \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \psi} + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial \psi} = \\ (i\gamma_\mu \partial^\mu - M^* + g_\sigma \phi - g_\omega \gamma^0 \omega_0 - g_\rho \gamma^0 \tau_3 b_0 + \gamma^0 \Sigma_0) \psi &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

这里 $\hat{\rho}^2 = j_\mu j^\mu$ 和 $j_\mu = \bar{\psi} \gamma_\mu \psi$,

$$\begin{aligned} \Sigma_0 &= m_\omega^* \omega_0^2 \frac{\partial m_\omega^*}{\partial \rho} + m_\rho^* b_0^2 \frac{\partial m_\rho^*}{\partial \rho} - m_\sigma^* \phi^2 \frac{\partial m_\sigma^*}{\partial \rho} - \\ &\bar{\psi} \psi \frac{\partial M^*}{\partial \rho}, \end{aligned}$$

其中

$$\frac{\partial M^*}{\partial \rho} = M \frac{\partial \Phi}{\partial \rho},$$

和

$$\frac{\partial m_i^*}{\partial \rho} = m_i \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} = -m_i \frac{\gamma}{\rho_0(1 + \gamma\rho/\rho_0)^2} \quad i = \sigma, \omega, \rho. \quad (9)$$

略去对介子场的微分后, 在平均场近似下, 能量动量张量可以表示为

$$T_{\mu\nu} = i\bar{\psi} \gamma_\mu \partial_\nu \psi + \left[\frac{1}{2} m_\sigma^2 \phi^2 + U(\phi) - \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\lambda \omega^\lambda - \right.$$

$$\left. \frac{1}{4} c(\omega_\lambda \omega^\lambda)^2 - \frac{1}{2} m_\rho^2 \mathbf{b}_\lambda \mathbf{b}^\lambda + \psi u_\lambda \gamma^\lambda \Sigma \psi \right] g_{\mu\nu}, \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \Sigma &= \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \beta} = m_\omega^* \omega_\mu \omega^\mu \left(\frac{\partial m_\omega^*}{\partial \beta} \right) + m_\rho^* \mathbf{b}_\mu \cdot \mathbf{b}^\mu \left(\frac{\partial m_\rho^*}{\partial \beta} \right) - \\ &m_\sigma^* \phi^2 \left(\frac{\partial m_\sigma^*}{\partial \beta} \right) - \bar{\psi} \psi \frac{\partial M^*}{\partial \beta}, \end{aligned} \quad (11)$$

在静止系中, 可以取 $u_\mu = (1, \mathbf{0})$.

3 核物质状态和中子星的 TOV 方程

对于均匀的核物质系统, 其能量密度和压强可以分别从能量动量张量中得到

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{2}{(2\pi)^3} \left[\int_0^{k_{F_n}} E_N^*(k) d^3 k + \int_0^{k_{F_p}} E_N^*(k) d^3 k \right] + \\ &\frac{1}{2} m_\sigma^{*2} \phi^2 + U(\phi) + \frac{1}{2} m_\omega^{*2} \omega_0^2 + \frac{3}{4} c\omega_0^4 + \\ &\frac{1}{2} m_\rho^{*2} b_0^2, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{3} \frac{2}{(2\pi)^3} \left[\int_0^{k_{F_n}} \frac{k^2}{E_N^*(k)} d^3 k + \int_0^{k_{F_p}} \frac{k^2}{E_N^*(k)} d^3 k \right] - \\ &\frac{1}{2} m_\sigma^{*2} \phi^2 - U(\phi) + \frac{1}{2} m_\omega^{*2} \omega_0^2 + \frac{1}{4} c\omega_0^4 \\ &\frac{1}{2} m_\rho^{*2} b_0^2 - \Sigma_0 \rho, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $E_N^* = \sqrt{k^2 + M_N^{*2}}$, 核子的有效质量定义为 $M_N^* = M^* - g_\sigma \phi$, 这里 M^* 是由式(3)给出的 BR 标度质量, k_{F_p} 和 k_{F_n} 分别是质子与中子的费密动量, 它们与核物质密度的关系为 $\rho = \frac{1}{3\pi^2} (k_{F_n}^3 + k_{F_p}^3)$.

中子星的性质可以由 Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) 方程确定^[20]

$$\frac{dP(r)}{dr} = - \frac{G[\epsilon(r) + P(r)][M_*(r) + 4\pi r^3 P(r)]}{r^2 [1 - 2GM_*(r)/r]}, \quad (14)$$

和

$$\frac{dM_*(r)}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon(r), \quad (15)$$

这里 M_* 表示中子星的质量, G 是引力常数.

中子星的半径定义为

$$P(R) = 0. \quad (16)$$

中子星的质量可以在坐标空间中对能量密度积分而得到

$$M_*(R) = \int_0^R dr 4\pi r^2 \epsilon(r). \quad (17)$$

4 结果与讨论

在相对论平均场理论的框架下,从 Bonn 势和具有 BR 标度且包括介子非线性自相互作用项的有效拉氏量密度出发,首先计算核物质状态方程(12)和(13),然后求解 TOV 方程,研究介质效应对中子星性质的影响.

使用 Bonn 势的 B 组参数^[25],其数值在表 1 中给出,虽然介子质量和耦合常数在 Bonn 势中已经给定,但是状态方程(12)和(13)中的系数 a, b 和 c 还需要重新确定. 为了研究介质效应对中子星性质的影响,可以固定核物质在饱和点处的 3 个经验值:核物质的饱和密度 $\rho_0 = 0.16\text{fm}^{-3}$;核子的有效质量 $M_N^* = 0.60M$ 和核物质的结合能(或饱和能) $E/A = \epsilon/\rho - M = -16\text{MeV}$. 改变描述介质效应的 BR 标度参数 y ,计算介子非线性自相互作用项的系数: $A = a/g_\sigma^3, B = b/g_\sigma^4, C = c/g_\omega^4$,得到的 3 组系数在表 2 中给出.

表 1 Bonn 势的参数和耦合常数^[25]

M	m_σ	m_ω	m_ρ	$g_\sigma^2/4\pi$	$g_\omega^2/4\pi$	$g_\rho^2/4\pi$
939	550	782.6	769	8.0769	20	0.95

表 2 由核物质在饱和点处的经验值所确定的模型参数

y	A/fm^{-1}	B	C
0.10	-0.0230298	0.0337494	0.0096414
0.08	-0.0300563	0.0324686	0.0102347
0.06	-0.0354435	0.0306952	0.0111201

由于表 2 中的 3 组系数所给出的核物质状态方程的变化趋势比较相似,所以选择 $y = 0.10$ 所对应的系数计算核物质的状态方程. 图 1 与图 2 分别给出了对称核物质的结合能与压强随核物质密度的变化. 图 1 和图 2 的结果显示核物质状态方程的变化行为是合理的,与通常使用的相对论平均场模型^[5-7]和密度相关的相对论平均场模型^[15,23]比较,本文所使用的模型可以再现核物质的基本性质. 用表 2 的系数计算核物质的不可压缩性: $K = 9 \frac{\partial p}{\partial \rho} \Big|_{\rho = \rho_0}$,对于 $y = 0.10$ 得到的不可压缩模数为 $K = 192\text{MeV}$,对于 $y = 0.08, K = 231\text{MeV}$,对于 $y = 0.06, K = 276\text{MeV}$,随着 y 值的减小, K 值变大. 在现在的框架下,用 Bonn 势的 B 组参数同时计算了 $y = 0$ (即无 BR 标度)情况下的核状态方程,结果表明:没有 BR 标度是得不到核物质状态方程的正确行为,这说明引入 BR 标度是必要的.

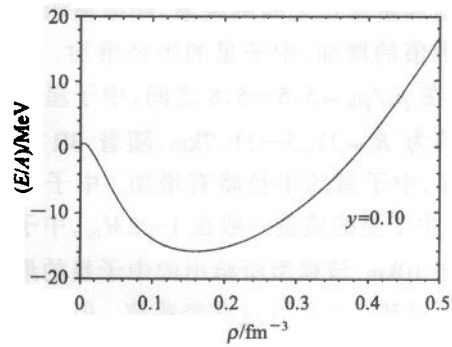


图 1 核物质的结合能随核物质密度的变化

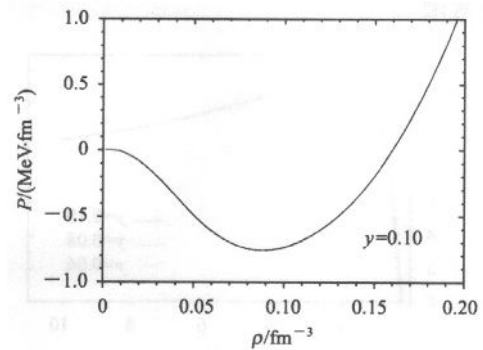


图 2 核物质的压强随核物质密度的变化

用核物质状态方程(12)和(13)及 TOV 方程进行数值求解,可以给出中子星(由中子组成的纯中子物质)的基本性质. 图 3 给出了中子星质量 M_s 与太阳质量 M_\odot 的比随中子星中心密度 ρ_c 与核物质饱和密度比的变化. 从图 3 可以看出随着介质效应的增强,即随着 BR 标度 y 值变大,中子星的质量增加,尤其是在 $\rho_c/\rho_0 > 2.0$ 时,介质效应较为明显. 对于 $y = 0.06, 0.08, 0.10$ 所对应的最大的中子星质量分别为: $M_s/M_\odot \approx 2.13, 2.22, 2.30$,相对应的中心密度分别为: $\rho_c/\rho_0 \approx 5.81, 5.75, 5.50$. 这些结果表明,中子星的质量对 BR 标度参数的变化是敏感的.

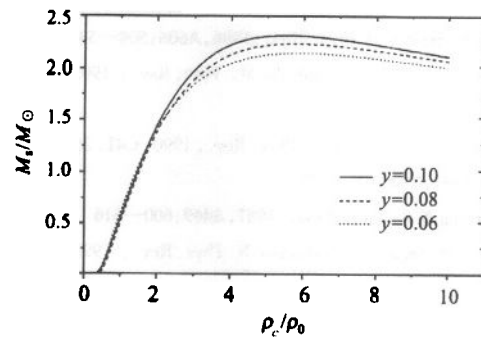


图 3 中子星质量与太阳质量的比随中子星中心密度与饱和密度比的变化

图 4 给出中子星半径 R 随中子星中心密度与

核物质饱和密度比之间的关系,结果显示,随着 BR 标度参数值的增加,中子星的半径增加. 由图 4 可以看出,在 $\rho_c/\rho_0 \approx 5.5-5.8$ 之间,中子星半径的变化范围约为 $R \approx 11.5-11.7\text{km}$,随着 BR 标度参数值的增加,中子星的半径略有增加. 中子星的经验值^[27]是:中子星的质量一般在 $1-2M_\odot$,中子星的半径大约在 10km ,该模型所给出的中子星的最大观测质量和半径基本上符合这些经验值. 但如果考虑到实际中子星的成分可能包含超子等其他粒子,则这样的模型所给出的中子星的最大质量将会减小到更合理的范围.

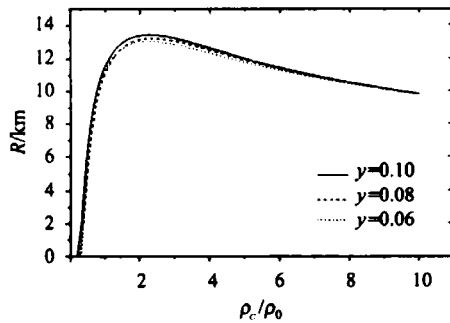


图 4 中子星半径随中子星中心密度与核物质饱和密度比的变化

图 5 给出了中子星的质量与中子星的半径关系. 图中显示中子星的质量随其半径的增加逐渐增加,在中子星半径较小时,中子星的质量对于 BR 标度参数的变化是不敏感的,在中子星半径较大时,随

着 BR 标度参数值的增加,中子星的质量减小. 从图 5 可以看到,当中子星半径增大到某个值时,中子星的质量半径关系曲线开始向相反方向变化即开始发生回转,当回转的曲线达到最大值后,中子星的质量开始逐渐减小,回转曲线的最大值就是中子星质量的最大值,回转曲线最大值处所对应的 R 就是相应的中子星的半径.

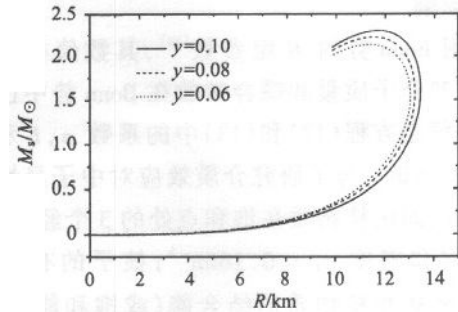


图 5 中子星质量与太阳质量的比随中子星半径的变化

本文用 Bonn 势和考虑介质修正效应的 BR 标度的相对论平均场模型研究了中子星的性质,得到较合理的结果,并定量地计算了介质效应对中子星的质量和半径以及中子星中心密度的影响. 计算结果显示介质效将使中子星的最大质量和半径有所增加. 计算结果表明用 Bonn 势和考虑介质效应所构造的相对论平均场模型是可行的,是一种新的尝试.

参考文献 (References)

- 1 Walecka J D. *Ann. Phys.*, 1974, **83**: 491—529
- 2 Serot B D, Walecka J D. *Adv. Nucl. Phys.*, 1986, **16**: 1—321
- 3 Müller H, Serot B D. *Phys. Rev.*, 1995, **C52**: 2072—2091
- 4 Müller H. *Nucl. Phys.*, 1997, **A618**: 349—370
- 5 Müller H, Serot B D. *Nucl. Phys.*, 1996, **A606**: 508—537
- 6 Delfino A, Coelho C T, Malheiro M. *Phys. Rev.*, 1995, **C51**: 2188—2195
- 7 Furnstahl R J, Serot B D. *Phys. Rev.*, 1990, **C41**: 262—279; *Phys. Rev.*, 1991, **C43**: 105—129
- 8 Glendening N K. *Nucl. Phys.*, 1987, **A469**: 600—616
- 9 Yoshida H, Sagawa H, Takigawa N. *Phys. Rev.*, 1998, **C58**: 2796—2806
- 10 Malheiro M, Delfino A, Coelho C T. *Phys. Rev.*, 1998, **C58**: 426—433
- 11 Haddad S, Weigel M K. *Phys. Rev.*, 1994, **C49**: 3228—3233
- 12 Fuchs C, Lenske H, Wolter H H. *Phys. Rev.*, 1995, **C52**: 3043—3060
- 13 Lenske H, Fuchs C. *Phys. Rev.*, 1995, **C52**: 3043—3060
- 14 Hofmann F, Keil C M, Lenske H. *Phys. Lett.*, 1995, **B345**: 335—360
- 15 Type S, Wolter H H. *Nucl. Phys.*, 1999, **A656**: 331—364
- 16 GUO Hua, LIU B, Toro M D. *Phys. Rev.*, 2000, **C62**: 035203(1)—035203(8)
- 17 LIU B et al. *Phys. Rev.*, 2002, **C65**: 045201(1)—045201(11)
- 18 Kaiser N, Fritsch S, Weise W. *Nucl. Phys.*, 2002, **A700**: 343—358
- 19 LIU Bo et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2002, **26**: 1056—1064 (in Chinese)
(刘波等. 高能物理与核物理, 2002, **26**: 1056—1064)
- 20 Tanaka K, Bentz W, Arima A. *Nucl. Phys.*, 1993, **A555**: 151—214
- 21 Bhattacharyya A, Ghosh S K, Phatak S C. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**: 044903(1)—044903(5)
- 22 Brown G E, Rho M. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**: 2720—2723
- 23 Song C. *Phys. Rep.*, 2001, **347**: 289—371
- 24 Song C, Min D P, Rho M. *Phys. Lett.*, 1998, **B424**: 226—234
- 25 Machleidt R. *Adv. Nucl. Phys.*, 1989, **19**: 189
- 26 LIU Bo, GUO Hua. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2003, **27**(7): 590 (in Chinese)
(刘波, 郭华. 高能物理与核物理, 2003, **27**(7): 590)
- 27 Baym G. *Nucl. Phys.*, 1995, **A590**: 233c—248c

In-Medium Effects on Neutron Stars *

LIU Bo¹ GUO Hua²

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

2(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Using the Bonn potential plus the BR scaling parameter induced by in-medium effects, the modified relativistic mean field model proposed recently is applied to investigate the properties of neutron star. The obtained results show that the BR scaling parameter leads to the increasing of maximum masses and radii of neutron star.

Key words Bonn potential, modified relativistic mean field model, neutron star, in-medium effects

Received 4 November 2002 , Revised 9 February 2003

* Supported by National Natural Science Foundation of China(10275002), Major State Basic Research Developing Program (G2000077400)

1) E-mail: liub@mail. ihep. ac. cn