

模型参数对奇异星性质的影响*

包特木尔巴根^{1)†} 宋太平¹⁾ 崔甲武¹⁾ 唐高娃²⁾

1) (南阳师范学院物理与电子工程学院, 南阳 473061)

2) (南阳师范学院图书馆, 南阳 473061)

(2011 年 3 月 18 日收到; 2011 年 6 月 21 日收到修改稿)

用有效质量口袋模型描述奇异夸克物质, 研究了耦合常数和口袋常数的选取对奇异夸克物质的状态方程及奇异星性质的影响. 结果表明, 随着耦合常数和口袋常数的增大, 奇异夸克物质的状态方程变软, 相应的奇异星的引力质量和对应的半径均变小. 当耦合常数从 0.5 增大到 2.0 时, 奇异星的质量从 $1.43M_{\odot}$ ($M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30}$ kg) 减小到 $1.25M_{\odot}$, 相应的半径由 8.3 km 减小到 7.7 km; 当口袋常数 $B^{1/4}$ 由 160 MeV 增大到 175 MeV 时, 奇异星的质量和半径分别由 $1.47M_{\odot}$ 和 8.6 km 减小到 $1.22M_{\odot}$ 和 7.4 km. 这说明奇异夸克物质及奇异星的性质明显依赖于模型参数的取值.

关键词: 模型参数, 奇异星, 状态方程, 质量-半径关系

PACS: 21.65.Qr, 26.60.Kp, 26.60.-c

1. 引言

自从 Witten^[1] 提出“奇异夸克物质而不是通常核物质, 可能是量子色动力学 (QCD) 的真正基态”的观点以来, 奇异物质及奇异星性质的研究吸引了粒子物理学、核物理学和核天体物理学三方面的关注^[2-4]. 在夸克物质的描述上, 由于 QCD 在非微扰区域的困难, 只能用表征强相互作用的唯象模型. 人们比较熟悉且应用比较广泛的是口袋模型^[5], 该模型把夸克看成是自由粒子, 用袋内外真空的压强差——口袋常数来保持夸克禁闭. 然而, 夸克之间强作用所引起的所谓介质效应对奇异夸克物质的性质有很重要的作用. 考虑夸克间强作用的诸多夸克模型中, 常用的有四种模型. 质量密度依赖夸克模型, 起初由文献[6]引入. 文献[7, 8]用热力学方法给出了该模型的正确热力学关系, 并用于研究奇异夸克物质和奇异星. Nambu 和 Jona-Lasinio^[9] 提出的 NJL 模型, 该模型成功地描述了手征对称性破缺与组分夸克得到动力学质量之间的关系. Buballa 等^[10]用 NJL 模型研究了奇异物质及奇异星. 还有 Schertler 等^[11]提出的有效质量口袋模型, 该模型在口袋模型的基础上把夸克等效成准粒子, 而准粒子

通过与高密系统的相互作用而获得密度相关的有效质量. 最近, 我们在有效质量口袋模型的基础上对该模型做了热力学自洽处理, 称之为热力学自洽有效质量夸克模型^[12]. 上述四个模型用不同的方式体现了夸克间的强作用, 而且成功描述了奇异夸克物质及奇异星. 然而, 即使在相同的模型下, 模型参数的取值不同, 所得结果也会有很大不同. 本文采用有效质量口袋模型描述奇异夸克物质, 调解该模型中的可调参数——耦合常数和口袋常数, 研究模型参数的选取对奇异夸克物质的状态方程及奇异星性质的影响. 结果表明, 随着耦合常数和口袋常数的增大, 奇异夸克物质的状态方程变软, 奇异星的引力质量和对应的半径均变小.

2. 有效质量口袋模型下奇异夸克物质

处于 β 平衡的 u, d, s 三味夸克和电子构成的夸克物质有弱反应

$$\begin{aligned} d &\rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_{e-}, \\ s &\rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_{e-} \\ s + u &\rightarrow d + u. \end{aligned} \quad (1)$$

其化学势满足

* 国家自然科学基金 (批准号: 10275029)、河南省自然科学基金 (批准号: 112300410187) 和河南省教育厅自然科学研究计划 (批准号: 2008A140009) 资助的课题.

† E-mail: tmurbagen@nynu.edu.cn

$$\mu_s = \mu_d = \mu_u + \mu_e. \quad (2)$$

夸克物质的电中性条件为

$$\rho_e^{\text{QP}} = \frac{2}{3}\rho_u - \frac{1}{3}\rho_d - \frac{1}{3}\rho_s - \rho_e = 0, \quad (3)$$

其中 $\rho_f (f=u, d, s)$ 为夸克数密度. 奇异夸克物质的零温热力学势为

$$\Omega = -\frac{1}{48\pi^2} \sum_f g_f \left[\mu_f (\mu_f^2 - m_f^2)^{1/2} (2\mu_f^2 - 5m_f^2) + 3m_f^4 \ln \left(\frac{\mu_f + (\mu_f^2 - m_f^2)^{1/2}}{m_f} \right) \right]. \quad (4)$$

由(4)式和热力学关系

$$d\Omega_f = -S_f dT - p_f dV - N_f d\mu_f$$

可以得到奇异夸克物质的粒子数密度 ρ 、能量密度 ε 和压强 p , 可分别表示为

$$\rho = \sum_{f=u,d,s} \frac{(\mu_f^2 - m_f^2)^{3/2}}{\pi^2} \frac{g_f}{6\pi^2}, \quad (5)$$

$$\varepsilon = B + \sum_{f=u,d,s} \frac{3}{4\pi^2} \left[\mu_f (\mu_f^2 - m_f^2)^{1/2} \left(\mu_f^2 - \frac{1}{2}m_f^2 \right) - \frac{1}{2}m_f^4 \ln \left(\frac{\mu_f (\mu_f^2 - m_f^2)^{1/2}}{m_f} \right) \right], \quad (6)$$

$$p = -B + \sum_{f=u,d,s} \frac{1}{4\pi^2} \left[\mu_f (\mu_f^2 - m_f^2)^{1/2} \left(\mu_f^2 - \frac{5}{2}m_f^2 \right) + \frac{3}{2}m_f^4 \ln \left(\frac{\mu_f (\mu_f^2 - m_f^2)^{1/2}}{m_f} \right) \right], \quad (7)$$

其中 g_f 为 f 味夸克的自旋、味简并度; B 为口袋常数, 其取值在一定范围内是可以调节的.

为了描述奇异夸克物质, 我们采用了 Schertler 等^[11] 提出的有效质量口袋模型. 该模型在口袋模型的基础上把夸克等效地看成准粒子, 而准粒子通过与高密系统的相互作用获得密度相关的有效质量, 即

$$m_f^*(\mu_f) = \frac{m_f}{2} + \sqrt{\frac{m_f^2}{2} + \frac{g^2 \mu_f^2}{6\pi^2}}, \quad (8)$$

其中 m_f 和 μ_f 分别为 f 味流夸克质量和化学势, g 为强耦合常数, 其取值一般在 0—2 范围内. 本文中选取流夸克质量为 $m_u = m_d = 0$, $m_s = 150$ MeV. 在 (5)—(7) 式中, 将 m_f 替换成 m_f^* 即可得到有效质量口袋模型的相应公式.

3. 计算结果及分析

首先, 调节夸克模型中的强耦合常数 g , 得到了奇异物质的状态方程, 结果如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 随着耦合常数 g 的增大, 奇异物质的状态方程

明显变软(相同能量密度对应的压强变小).

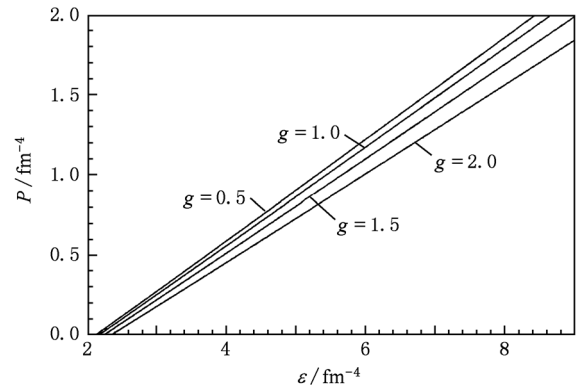


图 1 不同耦合常数下奇异物质的状态方程 $B^{1/4} = 165$ MeV

其次, 在确定的耦合常数下选取不同的口袋常数, 计算了奇异物质的状态方程, 结果如图 2 所示. 由图 2 可见, 随着口袋常数 B 的增加, 奇异物质的状态方程也变软, 而且各条曲线均是平行直线, 这是由于奇异物质的能量密度与压强不仅成正比, 而且均与口袋常数呈线性关系.

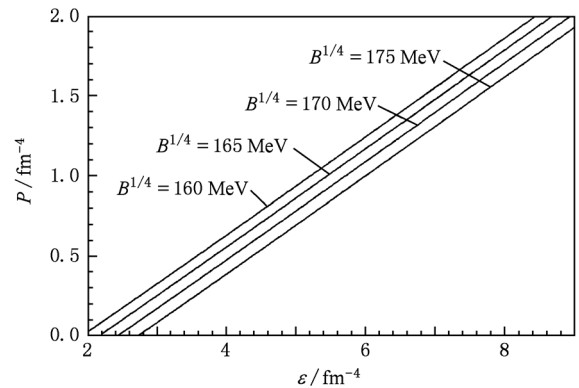


图 2 不同口袋常数下奇异物质的状态方程 $g = 1.0$

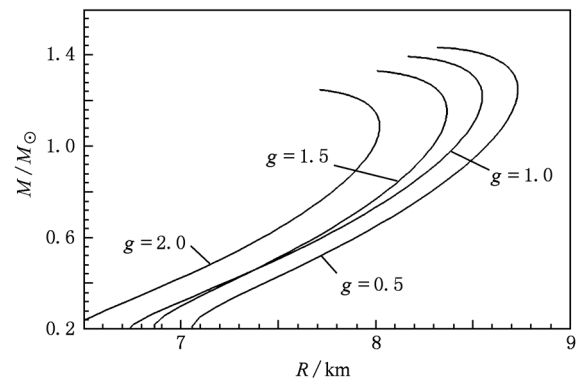


图 3 不同耦合常数下奇异星的质量-半径关系 $B^{1/4} = 165$ MeV

最后,以图 1 和图 2 中的状态方程为输入,对子星结构的 Tolman-Oppenheimer-Volkoff 方程^[13,14]进行数值积分,得到了奇异星的质量-半径关系,如图 3 和图 4 所示.由图 3 和图 4 可以看出,随着耦合常数或口袋常数的增加,奇异星的质量 M 和半径 R 均变小.当耦合常数 g 从 0.5 增大到 2.0 时,奇异星

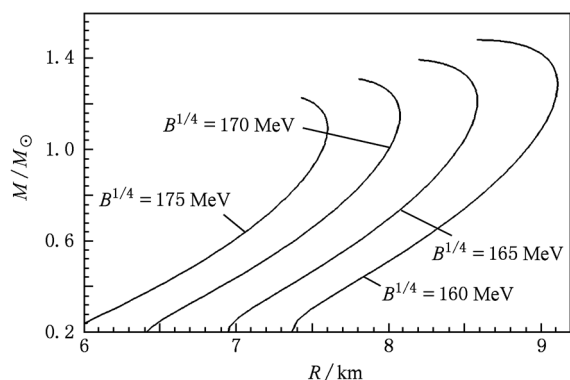


图 4 不同口袋常数下奇异星的质量-径关系 $g = 1.0$

的引力质量 M (图 3 中曲线最高点对应的质量值) 从 $1.43M_{\odot}$ ($M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30}$ kg 为太阳质量) 减小到 $1.25M_{\odot}$, 相应的半径 R 由 8.3 km 减小到 7.7 km (见图 3). 当口袋常数 $B^{1/4}$ 由 160 MeV 增大到 175 MeV 时, 奇异星的质量 M 和半径 R 分别由 $1.47M_{\odot}$ 和 8.6 km 减小到 $1.22M_{\odot}$ 和 7.4 km (见图 4).

4. 结 论

采用有效质量口袋模型描述奇异夸克物质, 研究了模型中的耦合常数和口袋常数的选取对奇异夸克物质的状态方程及奇异星性质的影响. 结果表明, 随着耦合常数或口袋常数的增大, 奇异夸克物质的状态方程变软, 奇异星的引力质量和对应的半径均变小, 表明质量小和半径小的奇异星中奇异夸克物质内夸克间具有强耦合或大口袋常数, 反之也成立. 同时也表明, 奇异夸克物质及奇异星的性质明显依赖于该模型中模型参数的取值.

- [1] Witten E 1984 *Phys. Rev. D* **30** 272
- [2] Dai Z G, Lu T 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 198 (in Chinese) [戴子高、陆 垓 1994 物理学报 **43** 198]
- [3] Dai Z G, Lu T, Peng Q H 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 1210 (in Chinese) [戴子高、陆 垓、彭秋和 1993 物理学报 **42** 1210]
- [4] Lai X J, Luo Z Q, Liu J J, Liu H L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1535 (in Chinese) [赖祥军、罗志全、刘晶晶、刘宏林 2008 物理学报 **57** 1535]
- [5] Chodos A, Jaffe R L, Johnson K 1974 *Phys. Rev. D* **9** 3471
- [6] Fowler G N, Raha S, Weiner R M 1981 *Z. Physics C* **9** 271
- [7] Peng G X, Qiang H C, Zou B S, Ning P Z, Luo S J 2000 *Phys. Rev. C* **62** 025801
- [8] Peng G X, Qiang H C, Yang J J, Li L, Liu B 1999 *Phys. Rev. C* **61** 015201
- [9] Nambu Y, Jona-Lasinio G 1961 *Phys. Rev.* **124** 246
- [10] Buballa M, Oertel M 1999 *Phys. Lett. B* **457** 261
- [11] Schertler K, Greiner C, Thoma M H 1997 *Nucl. Phys. A* **616** 659
- [12] Bao T, Liu G Z, Zhao E G, Zhu M F 2008 *Eur. Phys. J. A* **38** 287
- [13] Oppenheimer J R, Schwinger J S 1939 *Phys. Rev.* **56** 1066
- [14] Tolman R C 1939 *Phys. Rev.* **55** 364

Influence of model parameters on properties of strange stars^{*}

Bao Tmurbagan^{1)†} Song Tai-Ping¹⁾ Cui Jia-Wu¹⁾ Tang Gao-Wa²⁾

1) (College of Physics and Electronic Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

2) (Library of Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

(Received 18 March 2011; revised manuscript received 21 June 2011)

Abstract

In this paper we mainly investigate, in the framework of effective mass bag model, how the coupling constant and the bag constant execute their effects on equations of state of strange quark matter, and on the properties of strange stars. Numerical results indicate that with the increase of strong coupling constant and bag constant, equations of state for strange quark matter turn softened, whereas gravitational mass and corresponding radius of strange stars become decreased. For instance the mass of the star decreases from $1.43M_{\odot}$ ($M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30}$ kg) to $1.25M_{\odot}$ and corresponding radius decreases from 8.3 km to 7.7 km while the coupling constant varies from 0.5 to 2.0. As for strange stars, the corresponding values decrease from $1.47M_{\odot}$ to $1.22M_{\odot}$ and 8.6 km and 7.4 km respectively while the bag constant $B^{1/4}$ increases from 160 MeV to 175 MeV.

Keywords: model parameters, strange star, equations of state, mass-radius relations

PACS: 21.65.Qr, 26.60.Kp, 26.60.-c

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10275029), the Natural Science Foundation of Henan Province, China (Grant No. 112300410187), and the Natural Science Research Program of the Education Bureau of Henan Province, China (Grant No. 2008A140009).

[†] E-mail: tmurbagen@nynu.edu.cn