

密度依赖口袋常数下奇异物质的热力学自洽处理及其对混合星性质的影响*

包特木尔巴根^{1)†} 杨兴强²⁾ 喻孜³⁾

1) (内蒙古民族大学物理与电子信息学院, 通辽 028043)

2) (南阳师范学院物理与电子工程学院, 南阳 473061)

3) (南京林业大学理学院, 南京 230037)

(2012年6月5日收到; 2012年7月17日收到修改稿)

在 MIT 口袋模型的基础上采用密度依赖口袋常数, 给出了奇异夸克物质的热力学关系, 并用于描述奇异夸克物质及混合星内的夸克相, 研究了奇异星、混合星的性质. 结果表明, 密度依赖口袋常数下, 奇异夸克物质的压强公式中有一个附加项, 而能量密度中则没有, 从而保证了系统的热力学自洽性. 在新的热力学关系下, 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; 混合星的状态方程也变软, 其质量变小, 而对应的半径也变小. 说明经热力学自洽处理后该模型对中子星的状态方程及相应的质量 - 半径关系等都有显著的影响.

关键词: 密度依赖口袋常数, 混合星, 状态方程, 质量 - 半径关系

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

DOI: 10.7498/aps.62.012101

1 引言

自从 Witten^[1] 提出“奇异物质 (SQM) 可能是量子色动力学 (QCD) 的真正基态”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等多方面的关注^[2-4]. 由于 QCD 在非微扰区域的困难, 人们提出许多唯象模型加以描述夸克物质. 比较熟悉且应用比较广泛的是 MIT 口袋模型^[5], 该模型忽略了夸克间的相互作用. 考虑夸克间强作用的唯象模型主要有: 质量密度依赖夸克模型^[6], Peng 等^[7,8] 用热力学方法给出了该模型正确的热力学关系, 并用于研究奇异夸克物质和奇异星; Nambu-Jona-Lasinio (NJL) 模型^[9], 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 和

Oertel^[10] 用该模型研究了奇异物质及奇异星; 有效质量口袋模型^[11] 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. 包特木尔巴根等^[12] 用该模型研究了奇异星. 最近, 人们提出了密度依赖口袋常数^[13-15], 以更好地体现在低密度下色 (夸克) 禁闭、高密度下夸克退禁闭的 QCD 基本精神. Zhu 等采用密度依赖口袋常数研究了通常夸克物质和色超导中的 Color-Flavor-Locked (CFL) 相的热力学关系. Bao 等^[16] 采用密度依赖口袋常数研究了夸克核心的混合星的性质. 由于对致密星高密度核心尚缺乏足够的了解, 提出新的模型或改进已有的夸克模型研究奇异夸克物质及奇异星, 具有重要意义. 本文在口袋模型中采用密度依赖口袋常数, 给出奇异夸克物质正确的压强公式, 并用于研究奇异夸克物质、奇异星及混合星的性质.

* 国家自然科学基金 (批准号: 10275029, 11265009)、河南省教育厅自然科学研究计划项目 (批准号: 2008A140009) 和内蒙古民族大学博士科研启动基金 (批准号: NMDBS275) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: tmurbagen@yahoo.com.cn

2 密度口袋常数下奇异夸克物质的热力学关系

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

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

夸克物质的电中性条件为

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

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

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

其中 g_f 为夸克的自旋、味简并度. 由上式和热力学关系 $d\Omega_f = -S_f dT - p_f dV - N_f d\mu_f$, 可以得到奇异夸克物质的粒子数密度, 能量密度和压强

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

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

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

其中 $B(\rho)$ 为密度依赖口袋常数, 压强公式中最后一项 $\rho \frac{\partial B}{\partial \rho}$, 是由于口袋常数与重子数密度依赖时得到的附加项, 该项能够保证系统的热力学自洽性, 而且对奇异物质及奇异星的性质有重要影响. 本文中选取流夸克质量为 $m_u = m_d = 0, m_s = 150 \text{ MeV}$.

3 密度依赖口袋常数

有关密度依赖口袋常数有很多尝试性模型, 而

且其结果也各不相同^[13-15]. 本文采用以下两个密度依赖袋常数.

Burgio 等^[13] 为了得到与 CERN 实验中夸克胶子等离子体相同的相变点, 提出了密度依赖口袋常数, 将其可参数化为

$$B(\rho) = B_{as} + (B(0) - B_{as}) \exp(-\beta x^2), \quad (8)$$

其中 $x = \rho/\rho_0$, 而 $\rho_0 = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ 为正常核物质的密度, 而 $B_{as} = 38 \text{ MeV/fm}^3, B(0) = 200 \text{ MeV/fm}^3, \beta = 0.14$.

Aguirre^[14] 为了描述 CFL 夸克星相关的 uds 对称夸克物质, 计算了密度依赖口袋常数, 以 MeV/fm^3 为单位可以给出

$$B(\rho) = \begin{cases} a + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3 + b_4 x^4 + b_5 x^5, & x \leq 9, \\ \beta \exp[-\alpha(x-9)], & x > 9, \end{cases} \quad (9)$$

其中, $a = 291.59096, b_1 = -142.25581, b_2 = 39.299997, b_3 = -6.04592, b_4 = 0.46817, b_5 = -0.01421, \alpha = 0.253470705, \beta = 19.68764$.

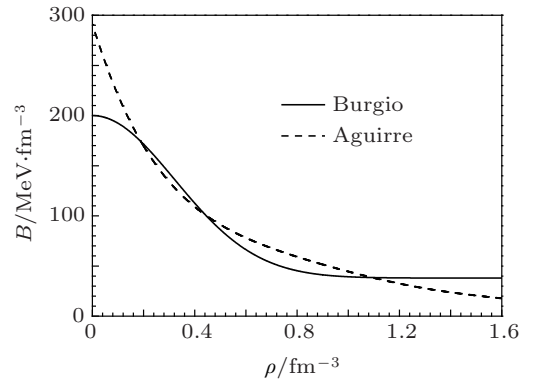


图 1 口袋常数随重子数密度的变化

图 1 给出了 (8), (9) 式中口袋常数随重子数密度的变化. 可以看出, 在低密度处密度依赖袋常数较大, 随着重子数密度的增加, 袋常数有明显减小. 这说明了密度依赖口袋常数很好地体现低密度下色禁闭、高密度下夸克退禁闭的 QCD 基本精神.

4 计算结果及分析

在 MIT 口袋模型下采用密度依赖口袋常数, 计算了奇异夸克物质的每重子能量随压强的变化, 如图 2 所示. 图中 “with” 表示有压强附加项的情形, “without” 表示无压强附加项的情形 (下同). 可见, 在有压强附加项的情况下, 奇异夸克物质的每重子

能量的最低点正好落在零压强处, 无附加项时则不同, 说明我们的热力学关系是正确的, 是热力学自洽的.

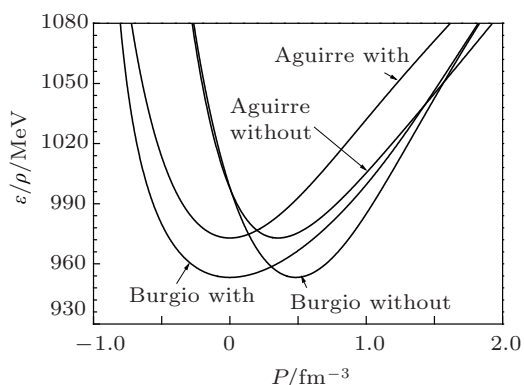


图2 奇异夸克物质每重子能量随压强的变化

我们利用热力学自洽的密度依赖口袋模型, 计算了奇异夸克物质的状态方程, 结果如图3所示. 由图3可以看出, 在正确的热力学关系下, 奇异物质的状态方程与不自洽情形相比有明显变软 (相同能量密度对应的压强变小). Burgio 等的袋常数下, 能量密度较小时, 有、无附加项的两条曲线有较大不同, 当能量密度较大时 ($\epsilon > 6 \text{ fm}^{-3}$), 两条曲线基本重合. 说明, 在较大能量下附加项的贡献可以忽略. Aguirre 的袋常数下, 两条曲线明显有差距, 说明不管是密度小还是密度大, 附加项仍然起作用.

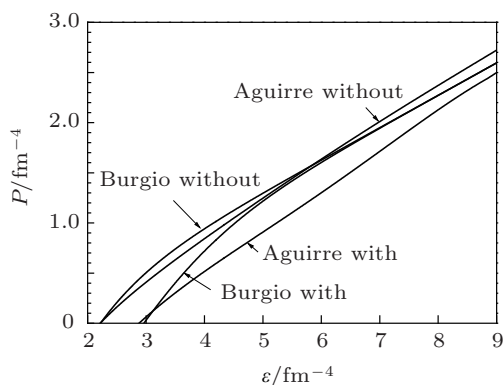


图3 奇异夸克物质的状态方程

以图3中的状态方程为输入, 对 neutron star 结构的 Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) 方程 [17,18] 进行数值积分, 得到了奇异星的质量 - 半径关系, 如图4所示. 由图4可见, 有压强附加项情形下奇异星的引力质量 (图中曲线的最高点) 与对应的半径均比无附加项情形要小得多. Burgio 等的袋常数下, 有、无附加项时奇异星的质量分别为 $1.6 M_{\odot}$

($1 M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ 为太阳质量) 和 $1.78 M_{\odot}$, 相应的半径分别为 8.3 km 和 9.4 km . 在 Aguirre 的袋常数下, 有、无附加项时奇异星的质量分别为 $1.43 M_{\odot}$ 和 $1.72 M_{\odot}$, 相应的半径分别为 7.9 km 和 9.0 km . 可见, 热力学自洽情形下奇异星的质量和半径均比较小.

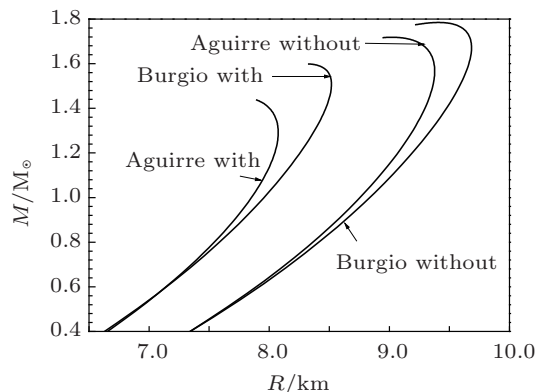


图4 奇异星的质量 - 半径关系

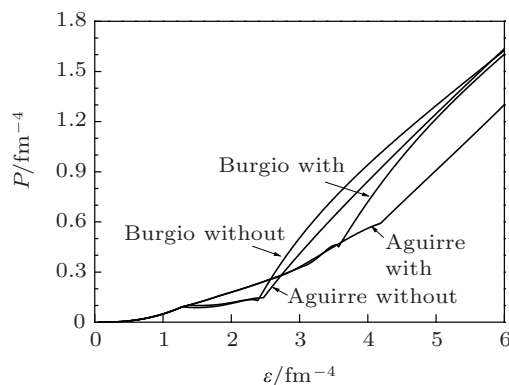


图5 混合星的状态方程

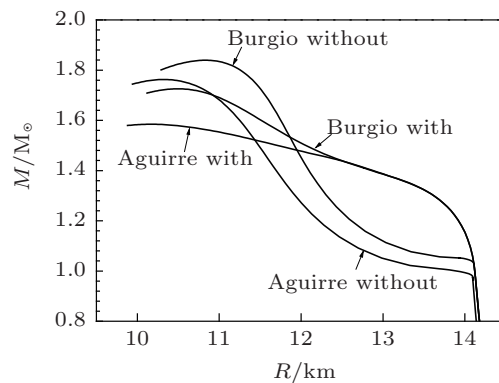


图6 混合星的质量 - 半径关系

最后, 在口袋模型框架下采用密度依赖口袋常

数描述混合星内的夸克相,用相对论平均场框架下的 GL85 参数组描述强子相,用 Gibbs 相平衡条件和整体电中性约束条件描述强子 - 夸克混合相,研究了混合星的状态方程及对应的混合星质量 - 半径关系,如图 5 和图 6 所示. 由图 5 可见,有压强附加项时,相变推迟开始,也推迟结束. 其结果是混合星的状态方程比无附加项情形要变软,但不明显. 这必定影响混合星的质量 - 半径关系. 由图 6 可以看出,有附加项时,混合星的质量变小,相应的半径也变小. 但是有、无附加项时质量的差距变小,半径的差距更小. 而且,相同模型下混合星的质量和对应的半径明显比奇异星的要大. 在正确的热力学关系下,用 Burgio 等的袋常数时混合星的质量 ($1.73 M_{\odot}$) 比脉冲星 J1903-0327^[19] 的要大些,比 J1614-2230^[20] 的约小 $0.3 M_{\odot}$. 这说明,较大质量脉冲可能是混合星.

5 结论

在口袋模型中采用密度依赖口袋常数,给出了奇异物质正确的热力学关系,并研究了奇异夸克物质、奇异星及混合星的性质. 结果表明,密度依赖口袋常数下,由于热力学自洽而得到的奇异夸克物质压强附加项,使奇异物质的状态方程比原来变软,相应的奇异星的引力质量和对应的半径均变小,更加符合奇异星的观测值,说明,密度依赖口袋常数下的压强附加项对奇异星的性质有重要影响. 当用于描述混合星的夸克相,有、无附加项时混合星的质量、半径差别变小,但混合星的质量和半径明显比奇异性大,说明大质量中子星可能是夸克核心的混合星.

- [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, Chiang H C, Zou B S, Ning P Z, Luo S J 2000 *Phys. Rev. C* **62** 025801
- [8] Peng G X, Chiang H C, Yang J J, Li L, Liu B 1999 *Phys. Rev. C* **61** 015201
- [9] Nambu G, Lasinio J 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, Song T P, Cui J W, Tang G W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 122101 (in Chinese) [包特木尔巴根, 宋太平, 崔甲午, 唐高娃 2011 物理学报 **60** 122101]
- [13] Burgio G F, Baldo M, Sahu P K 2002 *Phys. Lett. B* **526** 19
- [14] Aguirre R 2003 *Phys. Lett. B* **559** 207
- [15] Liu Y X, Gao D F, Guo H 2001 *Nucl. Phys. A* **695** 353
- [16] Bao T, Liu G Z, Zhu M F 2009 *Chin. Phys. C* **33** 340
- [17] Oppenheimer J R, Schwinger J S 1939 *Phys. Rev.* **56** 1066
- [18] Tolman R C 1939 *Phys. Rev.* **55** 364
- [19] Bejger M, Fortin M, Haensel P, Zdunik J L 2011 astro-ph>arXiv 1106.2432v1
- [20] Demorest P B, Pennucci T, Ransom S M 2010 *Nature* **467** 1081

Self-consistent thermodynamical treatment to strange quark matter with density-dependent bag constant and properties of hybrid stars ^{*}

Bao Tmurbagan^{1)†} Yang Xing-Qiang²⁾ Yu Zi³⁾

1) (College of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028043, China)

2) (Department of Physics, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

3) (College of Science, Nanjing Forestry University, Nanjing 230037, China)

(Received 5 June 2012; revised manuscript received 17 July 2012)

Abstract

Thermodynamics of strange quark matter with density-dependent bag parameter is given by making use of MIT bag model, and properties of strange and hybrid stars are investigated by using them. Our results indicate that an extra term should be appended to the pressure expression of strange quark matter but not to the energy density when the bag constant is density-dependent, which assures self-consistency of the system. With this extra term, strange quark matter equations of state soften, gravitational mass and corresponding radius of strange star decrease compared with the inconsistent case. The hybrid star equations of state soften and corresponding mass and radius for hybrid star decrease when this model is used to describe quark phase in hybrid star. These indicate that new thermodynamics for strange quark matter with density-dependent bag parameter has an important influence on properties of strange star and hybrid star.

Keywords: density-dependent bag constant, hybrid star, equations of state, mass-radius relations

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

DOI: 10.7498/aps.62.012101

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10275029, 11265009), the Natural Science Foundation of Henan Education Department, China (Grant No. 2008A140009) and the Science Foundation of Inner Mongolia University for Nationalities, China (Grant No. NMDBS275).

[†] Corresponding author. E-mail: tmurbagen@yahoo.com.cn