

# 热力学自治的质量密度依赖夸克模型与混合星<sup>\*</sup>

包特木尔巴根<sup>1,2;1)</sup> 刘广洲<sup>1;2)</sup> 朱明枫<sup>1)</sup>

1(吉林大学物理学院理论物理中心 长春 130021)

2(南阳师范学院物理与电子工程学院 南阳 473061)

**摘要** 用热力学自治的质量密度依赖夸克模型描述夸克物质研究了混合星的基本性质, 计算了混合星内粒子分布、状态方程和对应的质量-半径关系. 结果表明, 质量密度依赖夸克模型中由热力学自治处理所引起的压强附加项使整个混合星的状态方程变软, 相变始末点推迟, 从而使混合星的最大质量由无附加项时的大于  $2.4M_{\odot}$ , 变到小于  $1.8M_{\odot}$ , 相应的半径  $R$  由大于  $15\text{km}$  变到小于  $12.0\text{km}$ . 与 NJL 模型类似, 该模型更适合描述大质量的混合星.

**关键词** 强子相 夸克相 状态方程 质量-半径关系

## 1 引言

自从观测到第一个脉冲星并确认为中子星以来, 在中子星这样的极端条件下的核物质性质一直是重离子物理乃至核天体物理研究的重要课题之一<sup>[1, 2]</sup>, 因为中子星内的高密度足以形成相互竞争的多种新物质形式. 中子星物质在二倍核物质密度处开始出现超子, 当密度进一步增大时, 重子内夸克可能退禁闭出来, 即出现强子-夸克的相变<sup>[3]</sup>, 形成混合星. 但是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. 通常采用的口袋模型中把夸克物质看成自由气体. 然而, 格点计算结果表明<sup>[4]</sup>, 夸克物质相变之后不是迅速变成渐近自由的, 而是缓慢趋于自由气体, 因此夸克之间相互作用对描述奇异夸克物质的性质是很重要的. 考虑夸克间相互作用的几个模型中, 我们最近用有效质量口袋模型和 Nambu-Jona-Lasinio(NJL) 模型<sup>[5-8]</sup> 研究了混合星<sup>[9, 10]</sup>. 由于模型 QCD 在高密度区域的不确定, 人们对中子星内核心尚缺乏足够的了解. 因此采用不同的夸克模型研究中子星内状态方程及相应中子星的基本性质, 具有重要意义. 另一考虑夸克间相互作用的模型是质量密度依赖夸克模型<sup>[11]</sup>. 近几年, 彭等用热力学方法自治地给出了该模型的正确热

力学关系<sup>[12, 13]</sup>. 本文采用质量密度依赖夸克模型描述中子星内强子-夸克相变的夸克相; 在相对论平均场理论框架下采用 GL85 参数组的状态方程描述强子相<sup>[14, 15]</sup>; 由强子和夸克共存的两守恒量混合相中, 考虑了 Gibbs 相平衡条件和整体电中性等约束条件. 研究了混合星的粒子分布, 状态方程及相应的混合星质量-半径关系.

## 2 热力学自治的质量密度依赖夸克模型

为了描述夸克物质, 采用质量密度相关夸克模型<sup>[8]</sup>. 该模型中通过密度依赖夸克质量,  $m_i = m_{i0} + \frac{D}{n_b^Z}$ , 包含了夸克间的有效相互作用. 经彭等改进后, 夸克物质的压强中有一个附加项而在能量密度中则没有. 夸克物质的零温热力学势为

$$\Omega = - \sum_i \frac{1}{8\pi^2} \left[ \mu_i (\mu_i^2 - m_i^2)^{\frac{1}{2}} (2\mu_i^2 - 5m_i^2) + 3m_i^4 \ln \frac{\mu_i + (\mu_i^2 - m_i^2)^{\frac{1}{2}}}{m_i} \right]. \quad (1)$$

由零温热力学势可以得到夸克数密度、夸克物质的能

\* 国家自然科学基金(10275029)资助

1) E-mail: tmurbagen@yahoo.com.cn

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

量密度和压强:

$$n_i = \frac{g_i}{6\pi^2} [\mu_i^2 - m_i^2]^{3/2}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \sum_i m_i n_i F(x_i), \quad (3)$$

$$p = \sum_i m_i n_i x_i^2 G(x_i) - \sum_i m_i n_i f(x_i), \quad (4)$$

其中  $x_i \equiv \frac{p_{f,i}}{m_i} = \frac{\sqrt{\mu_i^2 - m_i^2}}{m_i}$  为  $i$  种夸克费米动量与质量之比. 定义一个超正弦函数  $\sinh^{-1} \equiv \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$

后, 式(3)和(4)中的3个函数定义为

$$F(x_i) \equiv \frac{3}{8} \frac{[x_i \sqrt{x_i^2 + 1} (2x_i^2 + 1) - \sinh^{-1}(x_i)]}{x_i^3}, \quad (5)$$

$$G(x_i) \equiv \frac{1}{8} \frac{[x_i \sqrt{x_i^2 + 1} (2x_i^2 - 3) + 3 \sinh^{-1}(x_i)]}{x_i^5}, \quad (6)$$

$$f(x_i) \equiv -\frac{2}{3} \frac{n_b}{m_i} \frac{dm_i}{dn_b} \frac{[x_i \sqrt{x_i^2 + 1} (2x_i^2 + 1) - \sinh^{-1}(x_i)]}{x_i^3}. \quad (7)$$

### 3 计算结果及讨论

用质量密度依赖夸克模型描述夸克物质, 用相对论平均场理论框架下的GL85参数组描述强子相, 计算了混合星内粒子分布, 如图1(a), (b)所示. 图1(a)中, 当  $\rho \approx 0.278 \text{fm}^{-3}$  时开始相变, 到  $\rho \approx 0.77 \text{fm}^{-3}$  时相变结束, 只出现一种超子. 图1(b)中,

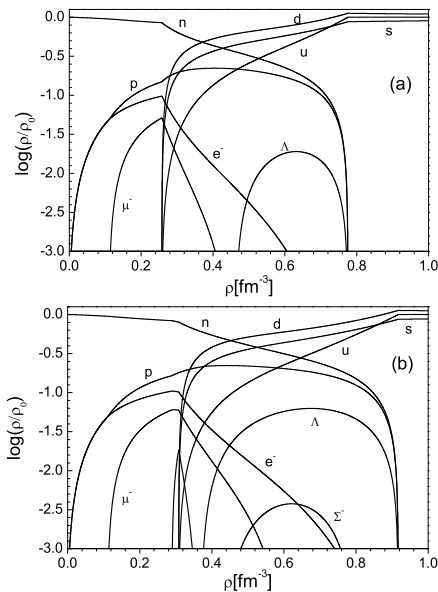


图1 混合星内粒子分布

(a)和(b)对应于  $D^{1/2} = 156 \text{MeV}$ ,  $m_{0s} = 80 \text{MeV}$  和  $D^{1/2} = 160 \text{MeV}$ ,  $m_{0s} = 90 \text{MeV}$ .

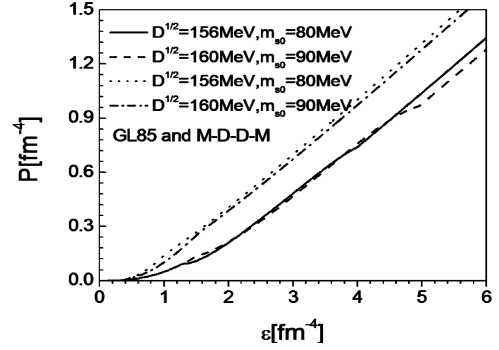


图2 质量密度依赖夸克模型下混合星的状态方程点线和点虚线为无压强附加项情形.

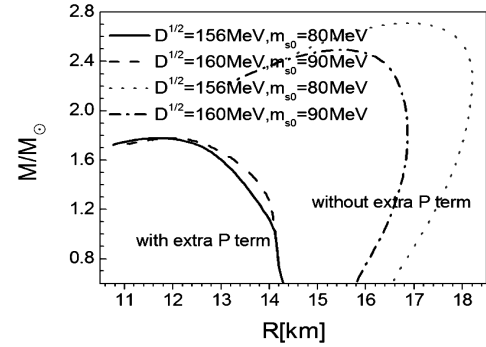


图3 与图2状态方程对应的质量-半径关系

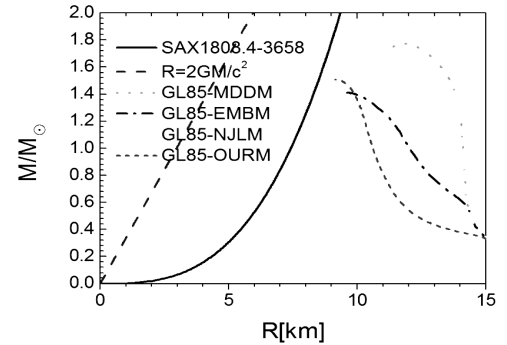


图4 质量密度依赖夸克模型(MDDM)与有效质量口袋模型(EMBM), NJL模型和热力学自洽有效质量口袋模型(OURM)文献[16]等夸克模型下混合星的质量-半径关系的比较

图中也给出了新近发现的毫秒脉冲星(SAX1808.4-3658)的质量-半径范围(实线和虚线之间).

当  $\rho \approx 0.31 \text{fm}^{-3}$  时开始相变, 到  $\rho \approx 0.92 \text{fm}^{-3}$  时相变结束, 出现  $\Lambda$  和  $\Sigma^-$  两种超子. 图2给出了图1对应的混合星状态方程, 并与无压强附加项的情形作了比较(分别对应点线和点虚线). 可见, 有压强附加项时的状态方程比无附加项时的要软. 与图2状态方程对应的混合星质量-半径关系如图3所示. 由图3可以看出, 有压强附加项时的中子星最大质量及对应的半

径(分别对应实线和虚线)均比无压强附加项时的相应量(分别对应点线和点虚线)小得多. 为了对不同夸克模型下的混合星质量-半径进行比较, 图4给出了质量密度依赖夸克模型(MDDM)与有效质量口袋模型(EMBM), NJL模型和我们最近发展的一个夸克模型-热力学自洽有效质量口袋模型(OURM)<sup>[16]</sup>等夸克模型下混合星的质量-半径关系. 可见, 质量密度依赖夸克模型(MDDM)与NJL模型下的质量-半径曲线基本重合, 表明两个模型适合于描述像 Vela X-1

(其质量为  $1.9 \pm 0.2 M_{\odot}$ )<sup>[17]</sup> 和 Cygnus X-2<sup>[18]</sup> (其质量为  $1.8 \pm 0.4 M_{\odot}$ ) 这样的大质量混合星, 而有效质量口袋模型和热力学自洽有效质量口袋模型适合于描述小质量的混合星. 图4中也给出了新近发现的毫秒脉冲星 SAX1808.4—3658 的质量-半径上限(实线)和下限(即 Schwarzschild 黑洞极限, 虚线). 可以看出, 毫秒脉冲星 SAX1808.4—3658 可能不是混合星. 如果是混合星, 则热力学自洽有效质量口袋模型描述的混合星最接近于它.

## 参考文献(References)

- 1 Schaffner J, Mishustin I N. Phys. Rev., 1996, **C53**: 1416
- 2 Burgio G F, Baldo M, Sahu P K et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 025802
- 3 Glendenning N K. Phys. Rev., 1992, **D46**: 1274
- 4 Ukawa A. Nucl. Phys., 1989, **A498**: 227
- 5 Schertler K, Greiner C, Schaffner J et al. Nucl. Phys., 2000, **A677**: 463—490
- 6 Schertler K, Greiner C, Sahu P K et al. ibd, Nucl. Phys., 1998, **A637**: 451—465
- 7 Nambu Y, Jona-Lasinio G. Phys. Rev., 1961, **122**: 345; 1961, **124**: 246
- 8 Buballa M, Oertel M. hep-ph/9810529; Schertler K, Leupold S. Phys. Rev., 1999, **C60**: 025801
- 9 Bao Tmurbagan, LIU Guang-Zhou, ZHU Ming-Feng. Commun. Theor. Phys., 2006, **45**: 505—510
- 10 Bao Tmurbagan et al. HEP & NP, 2006, **30**(10): 961(in Chinese)  
(包特木尔巴根等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(10): 961)
- 11 Fowler G N, Raha S, Weiner R M. Z. Phys., 1981, **C9**: 271
- 12 PENG G X, CHIANG H C, YANG J J et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 015201
- 13 PENG G X, CHIANG H C, YANG J J et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 025801
- 14 Glendenning N K. Compact Stars, Springer-Verlag, 1997. 303—349
- 15 Glendenning N K. Astrophys. J., 1985, **293**: 270—493
- 16 Bao Tmurbagan, LIU Guang-Zhou, ZHAO En-Guang et al. Self-consistent Thermodynamic Treatment in the Effective Mass Bag Model, to be printed
- 17 van Kerkwijk M H, van Paradijs J, Zuiderwijk E J. Astron. Astrophys., 1995, **303**: 497
- 18 Orosz J A, Kuulkers E. Mon. Not. R. Astro. Soc., 1999, **305**: 132

# Mass-Density-Dependent Quark Model with Thermodynamic Self-consistency and Hybrid Stars<sup>\*</sup>

Bao Tmurbagan<sup>1,2;1)</sup> LIU Guang-Zhou<sup>1;2)</sup> ZHU Ming-Feng<sup>1)</sup>

1(Center for Theoretical Physics, Institute of Physics, Jilin University, Changchun 130021, China)

2(Institute of Physics and Electronic, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

**Abstract** Upon application of the mass-density-dependent quark model with thermodynamic self-consistency, we investigate the bulk properties of hybrid stars and calculate the particle fraction and equation of state(EOS) for hybrid star matter. Numerical results indicate that the pressure extra term deriving from self-consistently thermodynamical treatment can soften the EOS, put off the appearance of phase transition and decrease the maximum mass for a hybrid star from  $2.4 M_{\odot}$  (without pressure extra term) to  $1.8 M_{\odot}$  with corresponding radius from 15km to 12km. Similar to the Nambu-Jona-Lasinio(NJL) model, this model is suitable for describing the massive hybrid stars.

**Key words** hadron phase, quark phase, equation of state, mass-radius relation

<sup>\*</sup> Supported by National Natural Science Foundation of China (10275029)

1) E-mail: tmurbagen@yahoo.com.cn

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