

文章编号: 1007-4627(2018)04-0561-06

包含暗物质的强子夸克混合星

立立¹, 特木尔巴根^{1,†}, 白嘎啦¹, 刘广洲²

(1. 内蒙古民族大学物理与电子信息学院, 内蒙古 通辽 028000;

2. 吉林大学理论物理研究所, 长春 130012)

摘要: 研究了含有暗物质的夸克核心混合星的观测属性。用相对论平均场理论和有效质量口袋模型分别描述夸克核心的混合星物质内强子相和夸克相, 用Gibbs相平衡条件描述强子-夸克混合相, 研究了由于包含强、弱相互作用的费米子暗物质对混合星质量、半径、引力红移、自转频率和转动惯量等整体观测属性的影响。结果表明, 在强、弱相互作用下, 暗物质粒子质量大于等于0.5 GeV时暗物质会使混合星的状态方程比无暗物质时有一定软化, 相应的混合星最大质量减少。当调节暗物质粒子质量研究表明, 随着暗物质粒子质量的增大, 夸克核心的混合星物质的状态方程变软, 混合星的质量、半径变小, 并且引力红移、自转频率和转动惯量等整体观测属性也明显依赖于暗物质粒子的质量。当暗物质粒子质量0.1 GeV时, 包含强、弱作用暗物质的混合星质量达到 $2.0 M_{\odot}$ 和 $2.8 M_{\odot}$ (其中 M_{\odot} 为太阳质量), 说明大质量脉冲星PSR J1859-0131和J1931-01可能是包含小质量暗粒子暗物质的强子夸克的混合星。整体观测属性的计算结果均在中子星的天文观察数据范围内, 也说明强子夸克的混合星内可能包含暗物质。

关键词: 暗物质; 中子星; 观测属性

中图分类号: P145.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.04.561

1 引言

中子星(Neutron Star)是大质量恒星在进化晚期(核燃料基本烧完)超新星爆发之后, 在其中心形成的致密星体, 是目前所能观测到的高温高密星体之一^[1]。中子星是半径约为10 km的小星体, 而其质量大约是 $1.4 M_{\odot} \sim 2.1 M_{\odot}$ (M_{\odot} 表示太阳的质量), 密度高达 $1.0 \times 10^8 \text{ t/cm}^3$, 这一特点使它们成为研究致密物质特性的理想实验室^[2-4]。中子星的性质由其状态方程(EOS)确定, 而状态方程与中子星内复杂的相结构以及采用的理论模型有关。研究中子星的主要目的有两个方面。第一, 通过研究中子星来检验研究高密物质的理论是否正确合理。第二, 中子星内可能找到尚未发现的新的物质形态, 如, 夸克物质、介子凝聚态、色超导相, 也可能有备受关注的暗物质。国内外对于中子星内含有的暗物质的研究工作有以下三个方面。第一, 传统中子星^[5]。传统中子星主要由中子构成。为了 β 平衡, 有少量质子。与质子保持电中性的需要, 也有电子和 μ 子。第二, 超子星^[5]。在质子与中子的基础上引入超子自由度, 能量最低的重子八重态, 即中子, 质子, Σ , Ξ , Λ , 还有少量电子、 μ 子等轻子。包含介子凝聚和 Δ 共

振态的中子星也属于该类。第三, 奇异星^[5]。奇异夸克星(简称奇异星)由三味夸克及少量电子构成。然而在夸克核心的混合星中含有暗物质的研究工作尚未开展。由于有关暗物质的性质, 包括质量、相互作用等至今没有同一共识, 因此用直接或间接方法研究暗物质的性质, 即研究包含暗物质的中子星, 研究暗物质粒子质量的不同或暗粒子强、弱自相互作用对中子星整体观测属性的影响, 通过计算结果与天文观测数据比对来限制暗物质的某些性质, 为暗物质的探测提供理论帮助, 具有深刻的意义。本工作拟用相对论平均场理论和有效质量口袋模型分别描述包含暗物质的强子夸克混合星物质的强子相和夸克相, 用Gibbs相平衡条件描述强子-夸克混合相, 研究包含强、弱相互作用的费米子暗物质对混合星质量、半径、引力红移、自转频率和转动惯量等整体观测属性的影响。

2 理论模型

2.1 强子相

在相对论平均场理论(RMFT)中, 通过交换三种介

收稿日期: 2018-09-14; 修改日期: 2018-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11265009, 11075063); 内蒙古民族大学博士科研启动基金(NMDBS275)

作者简介: 立立(1994-), 女, 内蒙古通辽人, 在读硕士, 从事核天体物理研究; E-mail: lili_lu2018@163.com

† 通信作者: 特木尔巴根, E-mail: tmurbagen@163.com。

子来传递重子之间的相互作用，相互作用的强、弱由耦合常数的大小决定。在RMFT框架下，强子物质的拉氏量一般表示为

$$L_B = \sum_B \bar{\psi}_B (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_B) \psi_B + \sum_B g_{\sigma B} \psi_B \sigma \psi_B + \frac{1}{2} \partial^\mu \sigma \partial_\mu \sigma - U(\sigma) - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \frac{1}{4} \omega^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu - \sum_B g_{\omega B} \psi_B \gamma_\mu \omega^\mu \psi_B - \frac{1}{4} \rho_{\mu\nu} \cdot \rho^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho_\mu \cdot \rho^\mu - \frac{1}{2} \sum_B g_{\omega B} \gamma_\mu \tau_B \cdot \rho^\mu \psi_B, \quad (1)$$

其中 ψ_B 为重子 B 的Dirac旋量。 $U(\sigma)$ σ 场的非线性自相互作用项

$$U(\sigma) = \frac{1}{3} b m_N (g_{\sigma N})^3 + \frac{1}{4} c (g_{\sigma N})^3. \quad (2)$$

在式(1)的拉氏密度中，第一行第一项为重子的拉氏量，第一行其余四项为 σ 介子的拉氏量，其中包括 σ 介子与重子 B 的相互作用项和 σ 介子自相互作用项(2)。第二行的四项为 ω 介子的拉氏量，第三行为 ρ 介子的拉氏量。

2.2 夸克相

为了描绘夸克之间的强相互作用，Schertler等^[6]提出有效质量口袋模型。该模型在口袋模型的基础上，把夸克等效地看成准粒子，而准粒子与高密度系统中其余夸克的相互作用而获得密度相关的有效质量。

$$m_f^*(\mu_f) = \frac{m_f}{2} + \sqrt{\left(\frac{m_f}{2}\right)^2 + \frac{g^2 \mu_f^2}{6\pi^2}}, \quad (3)$$

该模型中的夸克有效质量是密度依赖的，考虑到模型的热力学自洽性，夸克物质的压强有一个附加项，而能量密度中则没有，改进后模型成为热力学自洽有效质量夸克模型^[7]。本文侧重考虑引入费米暗物质后对强子夸克混合星整体观测属性的影响，由于两个在本文计算结果区别甚微，夸克模型采用了有效质量口袋模型。

处于 β 平衡的 u , d , s 三味夸克和电子构成的奇异夸克物质满足弱反应

$$\begin{aligned} d &\rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_{e^-}, \\ s &\rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_{e^-}, \\ s + u &\rightarrow d + u. \end{aligned} \quad (4)$$

三味夸克及电子的化学式满足

$$\mu_s = \mu_d = \mu_u + \mu_e. \quad (5)$$

夸克物质的电中性条件为

$$\rho_c^{\text{QP}} = \frac{2}{3} \rho_u - \frac{1}{3} \rho_d - \frac{1}{3} \rho_s - \rho_e = 0, \quad (6)$$

其中 ρ_u , ρ_d , ρ_s 为夸克数密度，即单位体积内的夸克数。零温热力学势密度为

$$\Omega = \frac{1}{48\pi^2} \sum_i g_i \left[\mu_i (\mu_i^2 - m_i^2)^{\frac{1}{2}} \right] (2\mu_i^2 - 5m_i^2) + 3m_i^4 \ln \frac{(\mu_i^2 - m_i^2)^{\frac{1}{2}}}{m_i}, \quad (7)$$

由上式和热力学关系 $d\Omega = -S_f dT - P_f d\nu - N_f d\mu_f$ 可以得到夸克气体的能量密度和压强

$$\sigma = B + \sum_{f=u,d,s} \frac{3}{4\pi^2} \left[\mu_f (\mu_f^2 - m_f^2)^{\frac{3}{2}} (\mu_f^2 - \frac{1}{2} m_f^2) - \frac{1}{2} m_f^4 \ln \frac{\mu_f (\mu_f^2 - m_f^2)^{\frac{1}{2}}}{m_f} \right], \quad (8)$$

$$P = -B + \sum_{f=u,d,s} \frac{1}{4\pi^2} \left[\mu_f (\mu_f^2 - m_f^2)^{\frac{1}{2}} (\mu_f^2 - \frac{5}{2} m_f^2) + \frac{3}{2} m_f^4 \ln \frac{\mu_f (\mu_f^2 - m_f^2)^{\frac{1}{2}}}{m_f} \right], \quad (9)$$

上述公式是在口袋模型的基础上给出的。其中 B 为口袋常数，表示袋内微扰真空和袋外物理真空间的压强差，其数值在一定范围内是可以调解的。把上述公式中的夸克质量 m_f 用夸克有效质量 m_f^* 代替，即可得到有效质量口袋模型相应的公式。

2.3 强子-夸克相的混合星

多分量理论可以应用于由强子物质和夸克物质构成的二分量的混合相^[1]。由Gibbs相平衡条件有

$$P_{\text{HP}}(\mu_n, \mu_e) = P_{\text{QP}}(\mu_n, \mu_e), \quad (10)$$

其中 μ_n , μ_e 分别为中子和电子的化学式。在混合相中强子与夸克保持化学平衡

$$\begin{aligned} \mu_s &= \mu_d = \mu_u + \mu_e, \\ \mu_n &= \mu_d + 2\mu_u. \end{aligned} \quad (11)$$

这也是强子相、夸克相及混合相间的连接条件。分别选用 μ_n , μ_e 为两个独立变量。该二分量体系满足整体电中性限制

$$q_{\text{MP}} = (1 - \beta) q_{\text{HP}} + \beta q_{\text{QP}} = 0 \quad (12)$$

和总重子数守恒

$$\rho_{MP} = (1 - \beta)\rho_{HP} + \beta\rho_{QP} \quad (13)$$

其中: β 为夸克相在混合相中的体积比。而混合相的总能量密度为

$$\varepsilon_{MP} = (1 - \beta)\varepsilon_{HP} + \beta\varepsilon_{QP} \quad (14)$$

在确定的粒子数密度下, 通过自洽求解强子相、混合相的非线性超越方程组既可得到强子相、混合相及夸克相的状态方程。

2.4 费米子暗物质对 neutron star 物态方程的贡献

暗物质 (DM) 作为中子星 (NS) 内部的另一种可能成分已被考虑在内, 即暗物质混合中子星^[8-10]。暗物质^[11-13]就是在宇宙中还没被看到的物质, 也是宇宙中的主导物质。研究表明宇宙包含 68.3% 的暗能量, 26.8% 的 DM 和 4.9% 的普通物质。为研究引入费米子暗物质后对中子星状态方程的影响, 我们采用了 Li 等^[14]提出的费米子暗物质模型, 假定暗物质是有自由参数的费米子 (能够解释粒子之间的强、相互作用), 并将暗物质的能量密度和压强看作自相互作用费米气体的能量密度和压强^[15]

$$\varepsilon_D = \frac{M_D^4}{\pi^2} \int_0^{K_F} x^2 \sqrt{1+x^2} dx + \left(\frac{1}{3\pi^2}\right)^2 \frac{K_F^6}{m_I^2} \quad (15)$$

$$P_D = \frac{M_D^4}{3\pi^2} \int_0^{K_F} \frac{x^4}{\sqrt{1+x^2}} dx + \left(\frac{1}{3\pi^2}\right)^2 \frac{K_F^6}{m_I^2} \quad (16)$$

其中: m_I 代表相互作用强、弱的参数; m_D 暗物质粒子质量; 费米动量 $K_F = (3\pi^2\rho)^{1/3}$ ^[14]。 m_I 的范围推出 W 或 Z 玻色子形成的希格斯场。在弱相互作用下, m_I 的范围在 100~300 GeV, 强相互作用下, m_I 的范围在 0.1~1 GeV, 用 m_I 的量值来反映暗物质的自相互作用的强、弱。有关暗物质被中子星俘获的可能机制, 因为我们只考虑暗物质与普通物质有引力相互作用, 在中子星强引力作用下, 暗物质是被吸积进入中子星内的^[16-17]。

引入暗物质后的中子星的 TOV 方程变为

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{G}{r} \frac{[\varepsilon(r) + P(r)][M(r) + 4\pi \cdot r^3 P(r)]}{1 - 2GM(r)} \quad (17)$$

$$\frac{dP(r)}{dr} = -4\pi \cdot r^2 \varepsilon(r) \quad (18)$$

其中: 在 r 处的压强为 $P(r) = P_0(r) + P_D(r)$ 。半径为 r 的球体内的物质质量为 $M(r) = \int_0^r dr dr 4\pi r^2 (\varepsilon_0(r) + \varepsilon_D(r))$ 。在 r 处的能量密度为 $\varepsilon(r) = \varepsilon_0(r) + \varepsilon_D(r)$ 。

2.5 费米子暗物质对 neutron star 物态方程的贡献

在文中也考虑了夸克核心的混合星中含有暗物质的其他几个观测属性, 如引力红移, 转动惯量及自转频率。引力红移可表示为

$$Z = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 R}\right)^{-1/2} - 1 \quad (19)$$

自转频率和转动惯量分别为

$$P = 0.96 \left(\frac{M_\odot}{M}\right)^{1/2} \left(\frac{R}{10 \text{ km}}\right)^{3/2} \text{ ms} \quad (20)$$

$$I = 0.237 M R^2 \left[1 + 4.2 \frac{M}{M_\odot} \frac{\text{km}}{R} + 90 \left(\frac{M}{M_\odot} \frac{\text{km}}{R}\right)^4\right] \quad (21)$$

其中: M 和 R 分别为脉冲星的质量和半径。

3 计算结果及分析

首先, 只考虑弱作用费米子暗物质的情况下 (本文选取 m_I 如下: 弱作用时 m_I 取 300 GeV, 强作用时 m_I 取 1 GeV, 下同), 计算了混合星物质的状态方程, 如图 1 所示, 暗物质粒子的质量取为 0.1, 0.5, 1.0 GeV 等 3 个不同的值。为了便于比较, 无暗物质时中子星物质的状态方程也画在同一图上。从图 1 中可以看出, 包含暗物质时混合星的状态方程有明显变化。随着暗物质粒子质量的增加, 状态方程明显变软 (相同能量密度对应的压强变小)。当暗物质粒子质量 0.1 GeV 时, 低密度处, 状态方程比无暗物质的要硬一些, 随着密度增加, 有、无暗物质时的状态方程基本重叠。

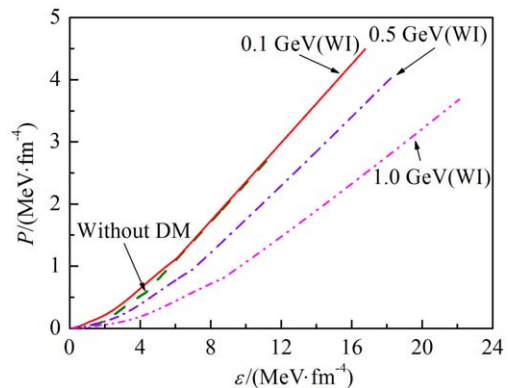


图 1 (在线彩图) 在弱相互作用下, 无暗物质和含暗物质的中子星物质的状态方程 (说明弱相互作用代表 WI, Without DM 代表没有暗物质, 下同)

图 2 给出在强、弱相互作用情况下，暗物质粒子质量分别取 0.1, 0.5 GeV 时的中子星物质的状态方程 (EOS)。从图 2 中可以看出，当暗物质粒子质量为 0.1 GeV 时，强相互作用 EOS 比弱作用的明显硬。而当暗物质粒子质量为 0.5 GeV 时，强、弱相互作用的 EOS 基本重叠。暗物质质量大于 0.5 GeV 时强、弱相互作用对 EOS 的贡献基本没有区别。

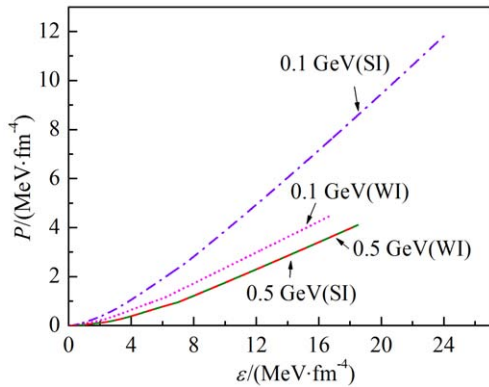


图 2 (在线彩图) 在强、弱相互作用下，含暗物质的中子星物质的状态方程(说明强相互作用代表SI，同下)

以状态方程为输入量，求解 TOV 方程，计算有、无暗物质的中子星质量与半径关系。从图 3 中可以看出，暗物质的引入使得中子星的质量和半径均发生明显变化。暗物质粒子质量在 0.1 GeV 时，强和弱相互作用下，中子星质量-半径关系曲线整体趋势相似，而且中子星质量是最大的。其中，弱作用时混合星引力质量达到 $2.0 M_{\odot}$ ，而强作用时质量更大，达到 $2.8 M_{\odot}$ 。然而在暗物质粒子取 0.5 GeV 时，两条曲线重叠，又与无暗物质的曲线交叉。在强、弱相互作用下，随着暗物质粒子质量的增加，中子星质量变小。如暗物质粒子质量取 1.0 GeV 时，弱相互作用时中子星的质量为 $0.8 M_{\odot}$ 。这些结果说明，大质量脉冲星，PSR J1859-0131 和 J1931-01，可能是所包含的暗物质粒子质

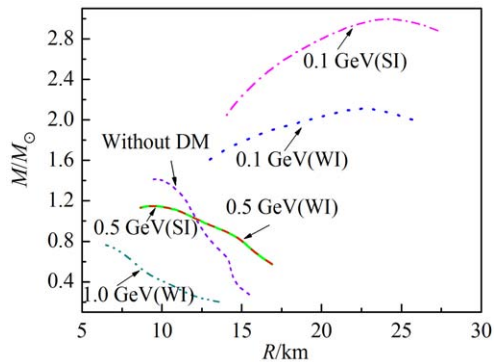


图 3 (在线彩图) 在强、弱相互作用下，无暗物质和含暗物质的中子星质量-半径关系

量较小的强子夸克混合星。

图 4~6 分别给出了引力红移、自传周期、转动惯量与中子星质量的关系。从 3 个图可以看出，暗物质自相互作用为强、弱情况不同或相同相互作用而不同的暗物质粒子质量下，引力红移、自转频率、转动惯量与中子星质量的关系曲线明显不同。可见，引力红移、自转周期及转动惯量明显依赖于暗物质粒子的质量，也跟强、弱相互作用有关。

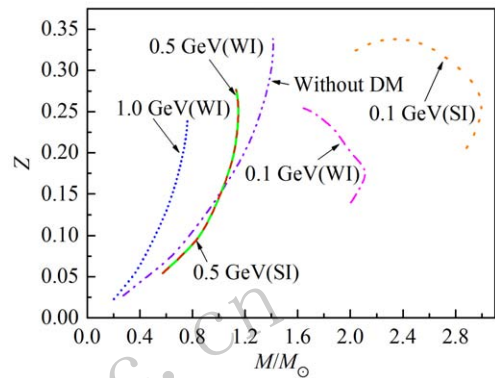


图 4 (在线彩图) 在强、弱相互作用下，无暗物质和含暗物质的中子星引力红移-质量关系

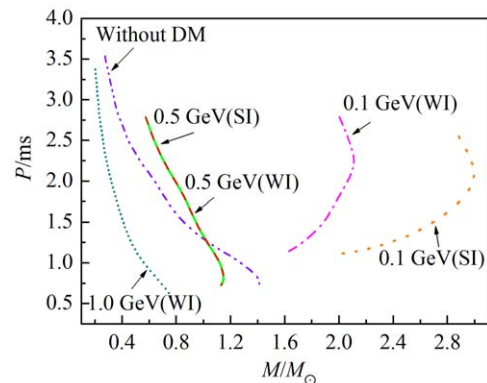


图 5 (在线彩图) 在强、弱相互作用下，无暗物质和含暗物质的中子星周期-质量关系

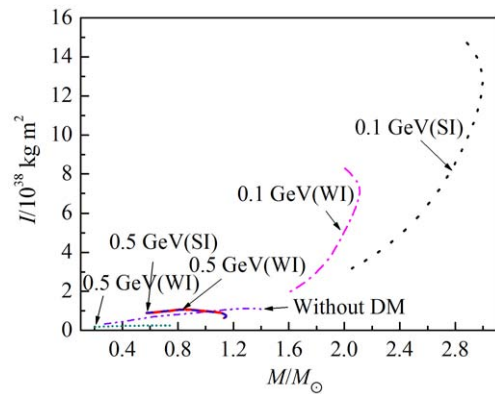


图 6 (在线彩图) 在强、弱相互作用下，无暗物质和含暗物质的中子星转动惯量-质量关系

4 总结

本文研究了引入强、弱相互作用费米子暗物质之后对中子星状态方程的贡献,也研究了不同的暗物质粒子质量对状态方程的影响。以状态方程为输入量,求解TOV方程,计算分析了包含暗物质的夸克核心的混合星的质量半径、引力红移、自转频率和转动惯量等整体观测属性。

在强、弱相互作用下,不同暗物质粒子质量对中子星的EOS的软化不同,随着暗物质粒子质量的增加(0.1, 0.5, 1.0 GeV)中子星的质量越来越小。暗物质粒子质量大于等于0.5 GeV时暗物质会使混合星的物态方程比无暗物质时有一定软化,相应的混合星最大质量减少。暗物质粒子质量越大时,暗物质对软化效果越明显,相应的中子星的最大质量越小。与此相反,暗物质粒子质量越小,包含暗物质的混合星质量越大,说明大质量脉冲星,PSR J1859-0131和J1931-01,可能是包含强、弱费米子暗物质,而且暗粒子质量较小的夸克核心混合星。

数值计算结果也表明,引入强、弱相互作用暗物质,暗粒子质量的不同,对混合星的状态方程有不同程度的软化。导致混合星的质量半径、引力红移、自转周期及转动惯量等整体观测属性明显依赖于暗物质粒子的质量,也跟强、弱相互作用有关。得到的混合星整体观测属性的数值结果均在脉冲星的天文观测数据范围内,说明,包含费米子暗物质的强子夸克的混合星是可能存在的。这对于脉冲星的天文观测以及其结构的判定,具有深刻的意义。

参考文献:

- [1] TMURBAGEN, DING Wenbo. Phase Structure of Neutron Star Equation of State [M]. Chifeng: Inner Mongolia Science and Technology Press, 2013: 1. (in Chinese)
(特木尔巴根, 丁文波. 子星状态方程相结构[M]. 赤峰: 内蒙古科学技术出版社, 2013: 1.)
- [2] BOGUTA J. *Phys Lett B*, 1981, **106**(4): 255.
- [3] GLEDENNING N K, SCHAFFNER J. *Phys Rev C*, 1999, **60**(2): 025803.
- [4] THORSETT S E, CHAKRABARTY D. *The Astrophysical Journal*, 1999, **512**(1): 288.
- [5] BAO Tmurbagen, TANG Gaowa. *Journal of Nanyang Teachers College*, 2009, **8**(3): 36. (in Chinese)
(包特木尔巴根, 唐高娃. *南阳师范学院学报*, 2009, **8**(3): 36.)
- [6] SCHAFFNER J, MISHUSTIN I N. *Phys Rev C*, 1996, **53**(3): 1416.
- [7] BAO Tmurbagen, LIU Guangzhou, ZHU Mingfeng, *et al. Commun Theor Phys*, 2006, **45**: 505.
- [8] PEREZ-GARCIA M A, SILK J, STONE J R. *Phys Rev Lett*, 2010, **105**(14): 141101.
- [9] LEUNG S C, CHU M C, LIN L M. *Phys Rev D*, 2012, **85**(10): 471.
- [10] LI A, PENG G X, LU J F. *RAA*, 2011, **11**(4): 482.
- [11] BI Xiaojun, QIN Bo. *Physical*, 2011, **40**(1): 13. (in Chinese)
(毕效军, 秦波. *物理*, 2011, **40**(1): 13.)
- [12] YUAN Xuecheng, GENG Shufang, JIANG Mei. *Acta geologica Sinica*, 2015, **89**(12): 2213.
(袁学诚, 耿树方, 姜枚. *地质学报*, 2015, **89**(12): 2213.)
- [13] CHANG Jin. *Engineering Research-Interdisciplinary Perspectives*, 2010, **2**(2): 95. (in Chinese)
(常进. *工程研究-跨学科视野中的工程*, 2010, **2**(2): 95.)
- [14] LI A, HUANG F, XU R X. *Astroparticle Physics*, 2012, **37**(3): 70.
- [15] RAIN G N, SCHAFFNER-BIELICH J, MISHUSTIN I N. *Phys Rev D*, 2006, **74**(6): 247.
- [16] GOLDMAN I, NUSSINOV S. *Phys Rev D*, 1989, **40**: 3221.
- [17] KOUVARIS C. *Phys Rev D*, 2008, **77**: 023006.

[1] TMURBAGEN, DING Wenbo. Phase Structure of Neutron

Hadron-Quark Mixed Stars Containing Fermion Dark Matter

LI Li¹, Tmurbagan^{1,†}, Baigala¹, LIU Guangzhou²

(1. *Institute of Physics and Electronics Information, Inner Mongolia University for the Nationalities,
Tong Liao 028043, Inner Mongolia, China;*

2. *Center for Theoretical Physics, Jilin University, Changchun 130023, China*)

Abstract: The observational properties of quark core hybrid star contain dark matter are studied. The influences of containing of strongly or weakly interacting dark matter to global observational features of hybrid stars, mass, radius, gravitational red-shift, rotational period and moment of inertia are studied by using relativistic mean field theory to describe hadron phase, effective mass bag model to quark phase, and Gibbs phase equilibrium conditions to hadron-quark mixed phase respectively. Our results indicate that, both in the strong and weak interacting case, the equation of state for hybrid star matter contain dark matter become softer than that of without dark matter while the mass of dark matter particles larger than 0.5 GeV, which leads to the decrease of the mass and corresponding radius of hybrid star. With the increase of the dark matter particle mass, the equation of state for hybrid star matter become softer, this cause the decrease of the mass and radius of hybrid star obviously. The gravitational red-shift and the rotational period, obviously increase of the moment of inertia of the hybrid stars are influenced by the dark matter particle mass. When the dark matter particle mass is equal to 0.1 GeV, the masses of the star with strong and weak interacting dark matter reach to $2.0 M_{\odot}$ and $2.8 M_{\odot}$ (M_{\odot} is the solar mass), this result indicates that the giant mass PSR, J1859-0131 and J1931-01, can be a hadron-quark hybrid star and containing dark matter with small dark particle mass. The computational results of all above global observational features of hybrid stars are in the range of astronomical observation data, these also indicate that hybrid star with quark core may contains dark matter.

Key words: dark matter; neutron star; observational property

Received date: 14 Sep. 2018; **Revised date:** 11 Nov. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11265009, 11075063); Science Foundation of Inner Mongolia University for Nationalities(NMDBS275)

† **Corresponding author:** Tmurbagan, E-mail: tmurbagen@163.com.