

文章编号: 1007-4627(2014) 03-0359-07

软物态方程支持大质量中子星机制概述

文德华, 荆珍珍

(华南理工大学物理系, 广州 510641)

摘要: 重离子碰撞实验分析及相关理论研究认为高密度非对称核物质可能具有较软的物态方程; 在约 2~3 倍饱和核密度下超子等奇异物质的出现也可能会使物态方程变软。然而, 软物态方程却无法支持大质量中子星。脉冲星 PSR J1614-2230 具有大质量 $(1.97 \pm 0.04)M_{\odot}$ 的观测发现使这一矛盾变得尤为突出。为了解决该矛盾, 人们提出了各种可能的物理机制: 包括考虑修正的引力理论、修改描述高密度物质物态的理论模型等。在概述和讨论这些能使软物态方程支持大质量中子星的可能物理机制的基础上, 还计算和讨论了强电场、强磁场对中子星最大质量的影响, 发现强电磁场可以有效地增大中子星的最大质量。

关键词: 中子星; 物态方程; 非牛顿引力

中图分类号: O571.6; P142.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.03.359

1 引言

2010 年 Nature 上发表了一篇关于利用 Shapiro 延迟效应观测到大质量中子星的论文, 观测发现了脉冲星 PSR J1614-2230 具有 $(1.97 \pm 0.04) M_{\odot}$ 的大质量^[1]。该文作者根据这一观测结果, 在文章的结尾宣判了几乎所有含有奇异粒子的物态方程 (例如 GS1, GM3 等) 以及其它一些软物态方程的“死刑”。因为这些软物态方程在经典理论的框架下所能支持的最大中子星质量偏小, 因此无法支持观测发现的大质量中子星。该发现立即在核天体物理领域引起了强烈反响(两年多来引用已超过 400 余次)。那么, 这一宣判是否就定案了呢? 答案并不那么肯定。因为在此后引用了该篇文献的众多论文中, 有相当一部分是“拯救”软物态方程的。当然, 出发点各不相同。具体办法可以分为以下 4 类: (1) 采用修改的引力理论。因为对引力的认识还远不是终极理论, 不能完全解释观测到与引力有关的很多现象; 暗物质、暗能量的提出与引力息息相关, 但这两者今天也还远没有定论; 欲囊括引力在内的大统一理论也远没实现^[2-15]。而利用基于广义相对论给出的中子星结构方程, 即 TOV

方程^[16-17]来计算软物态方程得到其无法支持大质量中子星的结论, 有一个基本的前提, 就是广义相对论一定是完全正确的引力理论或者说一定是适合中子星的引力理论。另一方面, 对重离子碰撞实验的分析又支持中子星物质可能具有较软的物态方程, 甚至是超软物态方程的结论^[18], 为了解释地面实验室与天文观测结论的不一致, 人们想到了修正的引力理论, 包括考虑非牛顿引力^[19-23]、可变的万有引力常数^[24-25]、以及其它的修正引力理论^[26-27]等。(2) 针对物态方程的模型进行修改, 使软物态方程变硬。传统理论认为, 含有奇异物质 (exotic matter), 例如超子 (hyperons) 的高密度物质具有较软的物态方程^[28-30]。这些物态方程所能支持的中子星最大质量大多在 $1.4 \sim 1.8 M_{\odot}$ 之间, 显然无法支持质量约为 $2 M_{\odot}$ 的 PSR J1614-2230 的观测事实。为了解决上述矛盾, 人们提出了不同的解决方案, 包括考虑夸克核、强子-夸克混合相、考虑介质效应等^[31-38]。(3) 考虑强电磁场。观测表明, 中子星内部可能具有超强的磁场, 超强的磁场会影响致密物质的物态^[39-44]。一般地, 强磁场的存在可以使物态方程变硬 (相当于提供了一种额外的排斥力), 因而能够支持较大质

收稿日期: 2013-09-20; 修改日期: 2013-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10947023, 11275073, 11205061); 中央高校基本科研业务费专项资金(2013ZG0036); 教育部留学回国人员科研启动基金第 42 批资助

作者简介: 文德华(1972-), 男, 四川南充人, 教授, 博士, 从事核天体物理研究; E-mail: wendehua@scut.edu.cn。

<http://www.npr.ac.cn>

量的中子星^[27, 45], 如果中子星内存在一定的净电荷, 也会影响中子星的结构, 会增大中子星的最大质量^[46-48]。(4) 其他可能的物理机制, 例如高速自转效应、压强的自引力效应等。

本文将对关于软物态方程如何支持大质量中子星的研究进行简要概述。第 2 部分简要介绍理论和实验分析支持的软物态方程; 第 3 部分对各种软物态方程支持大质量中子星的可能物理机制进行概述。最后一部分是相关讨论和总结。

2 软物态方程概述

重离子碰撞实验支持高密度非对称核物质可能具有较软或超软的物态方程。近年来, 重离子碰撞实验使我们有机会进一步认识高密度非对称核物质的性质^[18, 49-56], 但是对于决定非对称高密度物质物态方程至关重要的对称能认识还很不一致, 特别是高密度端的对称能^[18, 56-57]。采用动量相互作用 (MDI) 模型^[18, 51-54]分析 FOPI/GSI 关于 π^-/π^+ 比率的实验数据^[49]时, 发现高密度非对称核物质具有超软对称能^[18]。根据 MDI 模型, 考虑最简单的由中子、质子、电子组成的中子星物质模型, 中子星内部压强可表示为^[19, 58]

$$P(\rho, \delta) = \rho^2 \left[\frac{dE_0(\rho)}{d\rho} + \frac{dE_{\text{sym}}(\rho)}{d\rho} \delta^2 \right] + \frac{1}{2} \delta(1-\delta) \rho E_{\text{sym}}(\rho) \quad (1)$$

其中: 重子数密度 $\rho = \rho_n + \rho_p$, 同位旋非对称度 $\delta = (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p)$ 由处于 β 平衡时的化学平衡条件 $\mu_e = \mu_n - \mu_p = 4\delta E_{\text{sym}}(\rho)$ 及电中性要求 $\rho_e = 1/2(1-\delta)\rho$ 共同决定。对称核物质中单核子的能量 $E_0(\rho)$ 、对称能 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 及相关参数可参考文献^[19]和^[59]。调整对称能表达式中的 x 参数的值, 可以得到不同的对称能与密度的相关性。研究表明, 当 $x = 1$ 时能很好地解释重离子碰撞实验中关于 π^-/π^+ 比率的实验数据^[18], 该参数对应超软的对称能 (对应的物态方程记为 MDI_{x1})。

含有奇异粒子或夸克解禁态的高密度物态可能具有较软的物态方程。在传统理论中, 含有奇异物质 (例如超子) 的高密度非对称核物质具有较软的物态方程^[28-30]。其使物态方程变软的大致机理: 当核子的费米能级超过超子质量时, 部分核子将通过弱相互

作用转变成超子。这一转变过程将释放费米压从而使物态方程变软^[28]。另外, 观测上的脉冲星理论上通常认为是中子星, 但也有理论认为可能是由纯解禁态的夸克物质组成的裸奇异夸克星 (strange quark matter (SQM) stars), 其中, 只含上、下和奇夸克, 不含顶、底和粲夸克。这种纯夸克解禁态物态也可能具有较软的物态方程^[60-62]。

3 软物态方程支持大质量中子星的可能物理机制

(1) 非牛顿引力机制

近年来, 实验和理论均表明, 在小尺度下, 物质间的引力相互作用并不严格遵守牛顿的引力平方反比关系, 在极微小的尺度下可能会严重偏离牛顿引力^[12, 20]。根据 Fujii 理论, 考虑非牛顿引力效应的引力势可写为^[63-64]

$$V(r) = -\frac{Gm_1m_2}{r} \left(1 + \alpha e^{-r/\lambda} \right) \quad (2)$$

其中: G 是引力常数; α 是无量纲的强度参数; λ 是作用特征长度。采用矢量玻色子交换模型, 可以得到 $\alpha = \pm g^2/(4\pi Gm_b^2)$ 和 $\lambda = 1/\mu$ 。其中, g , m_b 和 μ 分别是耦合常数, 重子质量和玻色子质量。采用平均场近似, 可得到非牛顿引力对物态方程的贡献分别为^[64-66]

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{UB}} &= \frac{1}{2V} \int \rho(\mathbf{x}_1) \frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-\mu r}}{r} \rho(\mathbf{x}_2) d\mathbf{x}_1 d\mathbf{x}_2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{g^2}{\mu^2} \rho^2 \end{aligned} \quad (3)$$

和

$$P_{\text{UB}} = \frac{g^2 \rho^2}{2\mu^2} \quad (4)$$

其中: V 是归一化常数; ρ 是重子数密度; $r = |\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|$, 另外还假定了玻色子质量与介质密度无关^[19]。

采用矢量玻色子交换模型描述的非牛顿引力相对于经典的牛顿引力来讲, 相当于等效地提供了一种额外的排斥力。非牛顿引力的强度尽管远远小于强相互作用, 但由于其力程 (由特征作用长度 λ 来表征) 一般会远大于核子之间的强相互作用 (当然, 特征作用长度 λ 又远小于中子星的尺度), 因此, 在中子星内核具有较高核子数密度的环境下, 非牛顿引力的整体效应

比较明显。即使是超软的物态方程(能支持的最大中子星质量非常小),如果考虑非牛顿引力效应,也可以等效地使物态方程变硬,从而支持大质量中子星^[19]。图 1 给出了超软物态方程考虑非牛顿引力后所能支持中子星的质量-半径关系^[19]。容易看出,在非牛顿引力参数 $g^2/\mu^2 \approx 100 \text{ GeV}^{-2}$ 时,超软物态方程可以支持 $2.0 M_\odot$ 的中子星。另外,在平均场模型^[22]及含超子物质模型^[65]下考虑非牛顿引力(轻矢量玻色子),也可以使软物态方程支持大质量中子星。研究还发现,非牛顿引力对具有固体壳中子星的核壳边界的转换密度和压强都具有明显的影响^[21]。

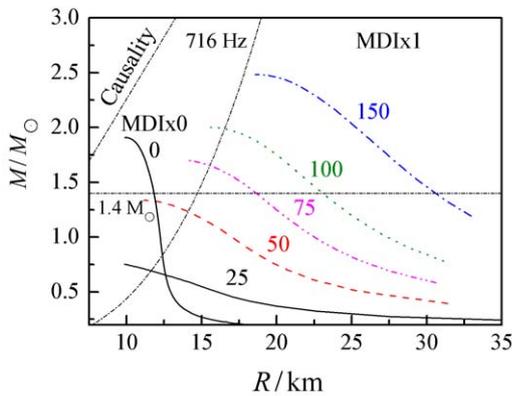


图 1 (在线彩图) 考虑非牛顿引力下中子星的质量-半径关系^[19]

(2) 修改描述中子星物质物态的模型

在经典理论中,含超子等奇异粒子的高密度物质的物态方程一般都偏软,这些物态方程所能支持的中子星最大质量大多在 $1.4 \sim 1.8 M_\odot$ 之间,显然无法支持大质量中子星的观测事实。为了解决上述矛盾,人们提出了多种解决方案。包括:(1)在含奇异物质(包括超子)的中子星内核存在一个具有较硬物态方程的夸克核或是存在夸克-强子混合相(即混杂星 Hybrid Star)^[31-35, 67]; (2)考虑增大超子与矢量介子(ω 和 ϕ)的耦合强度^[33],或是考虑介质参数的密度依赖^[38],均可使含有超子物质的高密度物质物态方程变硬,从而增大其所能支持的中子星最大质量。当然,用传统的 MIT 模型^[68-69]描述的裸夸克星也不能支持大质量中子星^[62],但采用改进的模型(QMDD)来描述夸克物质,可以支持大质量中子星的观测^[36]。

(3) 考虑强电磁场

1) 强磁场情形

观测发现,中子星内可能具有超强的磁场,其强度可高达 10^{15} T 甚至更高^[39-41]。这样的强磁场势必会影响到高密度物质的物态,包括中子星物质的物态和白矮星物质的物态^[27, 42-45]。我们根据文献^[45]给出的考虑超强磁场并含有超子物质模型下的中子星物质物态方程,计算了中子星的质量-半径关系,如图 2 所示。从图 2 中容易看出,超强的磁场可以极大地提高软物态方程所能支持的中子星最大质量。另外,也有研究同时修正引力(扰动 $f(R)$ 引力)和强磁场(10^{13} T),结果发现,强磁场能有效地使物态方程变硬,从而增大相应中子星的最大质量^[27]。如果中子星内分布着一定量的净电荷,即在中子星内部有静电场的分布,就会提供一种排斥力,从而使物态方程变硬,进而影响中子星的整体结构,增大中子星的最大质量^[46-48]。

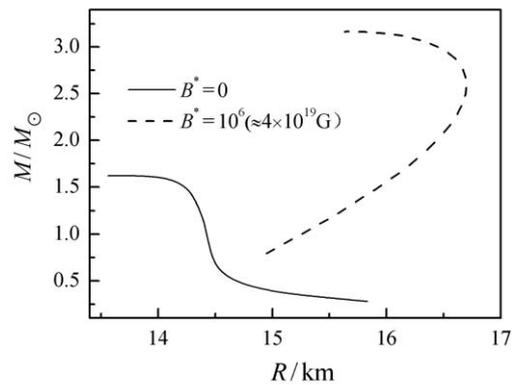


图 2 强磁场对中子星质量-半径关系的影响

2) 强电场情形

如果中子星内分布着一定量的净电荷,原来引力与粒子简并压的平衡将转变为粒子的简并压和库仑斥力与引力平衡,那么经典的 TOV 方程可修正为以下形式:

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{\left(\frac{G}{c^2} m + \frac{4\pi G}{c^4} p r^3 - \frac{G}{4\pi\epsilon_0 c^4} \frac{Q^2}{r} \right)}{r \left(r - \frac{2Gm}{c^2} + \frac{G}{4\pi\epsilon_0 c^4} \frac{Q^2}{r} \right)} \times \left(P + \rho c^2 \right) + \frac{Q}{16\pi\epsilon_0 r^4} \cdot \frac{dQ}{dr}, \quad (5)$$

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho + \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \cdot \frac{dQ}{dr}, \quad (6)$$

$$\frac{dQ(r)}{dr} = 4\pi r^2 e^{\lambda/2} \rho_{ch}, \quad (7)$$

其中： G 为万有引力常数； c 为光速； m 为质量； p 为压强； Q 为电荷量； λ 为度规函数； ρ 是质量密度； ρ_{ch} 为电荷密度； ϵ_0 为介电常数。

假设在中子星内部电荷的分布为

$$\rho_{ch}(r) = k_0 e^{-(r-r_g)^2/a^2} \cdot \frac{\rho_e}{M_p} \quad (8)$$

其中： k_0 是比例系数； a 是描述高斯分布的宽度； r_g 是电荷分布的中心与星体中心的距离； e 为电子电量； M_p 为单位质子的质量。根据修正后的 TOV 方程和假设的电子分布，取 $r_g = 6 \text{ km}$ ， $a = 2 \text{ km}$ ，我们计算了不同 k_0 值下的中子星质量-半径关系，如图 (3) 所示。从图中可以看出，中子星的质量随着 k_0 (所加电荷量) 的增加而增加，当 k_0 取 9×10^{-19} 时，中子星的质量达到 $2 M_\odot$ 。显然，在中子星内部加上一定量的静电荷，是可以提高软物态方程所能支持的最大质量的。

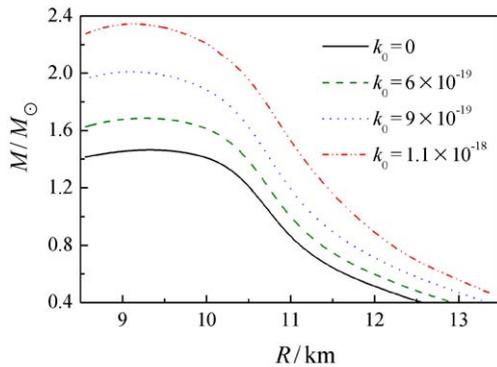


图 3 (在线彩图) 带电荷中子星的质量-半径关系

(4) 增大软物态方程所支持的中子星最大质量的其它可能机制

还有一些可能的机制能增大软物态方程所能支持的最大中子星质量，例如高速自转、可变的万有引力常数、压强的自引力效应等^[70]。但由于这些机制要么贡献有限(例如高速自转)，要么未被广泛接受，因此未受到足够重视。作为对可能增大软物态方程所能支持中子星的最大质量的概述，在此对其中一些机制也作一个简要介绍。

1) 高速自转对星体质量上限的贡献

中子星具有高速自转，观测到的最快自转达到 716 Hz ^[71]。具有快速自转的中子星，由于其离心力的作用(等效于一个向外的排斥力)，也可增大某一确定物态方程所能支持的中子星最大质量。在开普

勒转速下，可使中子星的最大质量增加将近 20% 左右^[72-75]。图 4 给出了两种物态方程下的静态和开普勒转速下中子星的质量-半径关系^[75]。容易看出，在开普勒转速下，自转效应对中子星最大质量的影响还是很明显的。

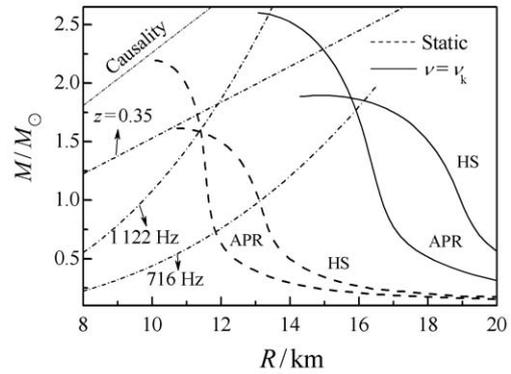


图 4 高速自转对中子星质量-半径关系的影响^[75]

2) 变化的万有引力常数也可影响中子星的质量-半径关系

很早就有理论提出，万有引力常数可能不是一个真正的常数，它有可能随着时间或空间演化^[76-80]。在国际标准单位制下，TOV 方程中含有万有引力常数。显然，如果万有引力常数发生了变化，中子星的结构将产生相应的变化^[24-25]。计算表明，如果在强引力场环境下万有引力常数如果稍稍变小(例如减小 10%)，软物态方程所能支持的最大中子星质量将显著增大，如图 5 所示。

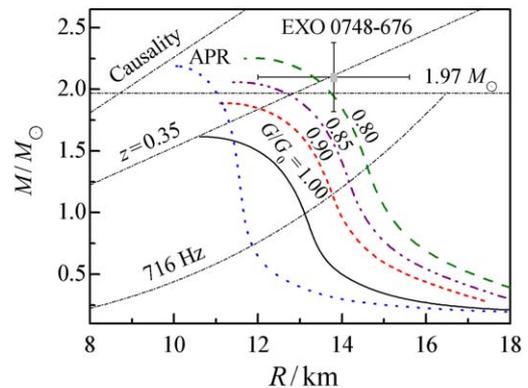


图 5 (在线彩图) 变化的引力常数对中子星质量-半径关系的影响^[24]

4 讨论与展望

大质量中子星 PSR J1614-2230 的观测发现并没

有彻底“杀死”软物态方程。其实,大质量中子星的观测发现需要硬物态方程和地面重离子碰撞实验及高密度下奇异物质的出现支持软物态方程,这一“天地之争”并不是不可调和的矛盾。相反,这一矛盾预示着这里面很可能蕴含着我们尚未认识的新物理。这些可能的物理包括:描述中子星的引力理论可能需要修正;描述高密度物质的物态方程可能面临突破;以前在中子星结构中未被充分认识的电磁场可能登上中心舞台;……。本文概述了几种软物态方程可以支持大质量中子星的可能物理机制,包括考虑修改引力理论、修改描述高密度非对称核物质的理论模型使物态方程变硬等。同时,我们还计算和讨论了中子星内存在强电场和强磁场情形下中子星的结构和性质。发现强电场和强磁场可有效地提高中子星的最大质量。当然,也可能真正解决上述矛盾的机制并没在我们所列的可能机制之中,而是正等待着我们去探索和发现。

参考文献:

- [1] DEMOREST P, PENNUCCI T, RANSOM S M, *et al.* Nature, 2010, **467**: 1081.
- [2] ARKANI-HAMED N, DIMOPOULOS S, DVALI G. Phys Lett B, 1998, **429**: 263.
- [3] ARKANI-HAMED N, DIMOPOULOS S, DVALI G. Phys Rev D, 1999, **59**: 086004.
- [4] PEASE R. Nature. 2001, **411**: 986.
- [5] HOYLE C D. Nature, 2003, **42**: 899.
- [6] LONG J C, CHAN H W, CHURNSIDE A B, *et al.* Nature, 2003, **421**: 922.
- [7] JEAN P. A&A, 2003, **407**: L55.
- [8] BOEHM C, FAYET P. Nucl Phys B, 2004, **683**: 29.
- [9] BOEHM C, HOODER D, SILK J, *et al.* Phys Rev Lett. 2004, **92**: 101301.
- [10] DECCA R S, LOPEZ D, CHAN H B, *et al.* Phys Rev Lett. 2005, **94**: 240401.
- [11] FAYET P. Phys Lett B, 2009, **675**: 267.
- [12] ADELBERGER E G, HECKEL B R, NELSON A E. Annu Rev Nucl Part Sci, 2003, **53**: 77.
- [13] PART P. Nucl. Phys, 2009, **62**: 102.
- [14] REYNAUD S, REYNAUD S, JAEKEL M. Int J Mod Phys A, 2005, **20**: 2294.
- [15] NEWMAN R D, BERG E C, BOYNTON P E. Space Sci Rev, 2009, **148**: 175.
- [16] TOLMAN R C. Phys Rev, 1939, **55**: 364.
- [17] OPPENHEIMER J R, VOLKOFF G M. Phys. Rev., 1939, **55**:374.
- [18] XIAO Z G, LI B A, CHEN L W, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **102**: 062502.
- [19] WEN D H, LI B A, CHEN L W. Phys Rev Lett, 2009, **103**: 211102.
- [20] KRIVORUCHENKO M I, SIMKOVIC F, AMAND F. Phys Rev D, 2009, **79**: 125023.
- [21] ZHENG H, CHEN L W. Phys Rev D, 2012, **85**: 043013.
- [22] ZHANG D R, YIN P L, WANG W, *et al.* Phys Rev C, 2011, **83**: 035801.
- [23] WEN D H, LI B A, CHEN L W. arXiv:1101.1504 [astro-ph.SR].
- [24] WEN D H, YAN J, LIU X M. Int J Mod Phys D, 2012, **21**: 1250036.
- [25] DOBADO A, LLANES-ESTRADA F J, OLLER J A. Phys Rev C, 2012, **85**: 012801(R).
- [26] BABICHEV E, LANGLOIS D. Phys Rev D, 2010, **81**: 124051.
- [27] CHEOUN M K, DELIDUMAN C, GÜNGÖR C, *et al.* arXiv, 2013, **1304**: 1871.
- [28] GLENDENNING N K, MOSZKOWSKI S A. Phys Rev Lett, 1991, **67**: 2414.
- [29] XU J, CHEN L W, KO C M, *et al.* Phys Rev C, 2010, **81**: 055803.
- [30] PANDA P K, MENEZES D P, PROVIDÊNCIA C. Phys Rev C, 2004, **69**: 025207.
- [31] BEDNAREK I, HAENSEL P, ZDUNIK J L, *et al.* A&A, 2012, **543**: 157.
- [32] WEISSENBORN S, CHATTERJEE D, SCHAFFNER-BIELICH J. Phys Rev C, 2012, **85**: 5802.
- [33] SULAKSONO A A, AGRAWAL B K. Nucl Phys A, 2012, **895**: 44.
- [34] ORSARIA M, RODRIGUES H, WEBER F, *et al.* Phys Rev D, 2013, **87**: 023001.
- [35] MALLICK R. Phys Rev C, 2013, **87**: 025804.
- [36] TORRES J. R, MENEZES D P. Europhys Lett, 2013, **101**: 42003.
- [37] CHAMEL N, FANTINA A F, PEARSON J M, *et al.* arXiv: 1205.0983v1, 2012.
- [38] JIANG W Z, LI B A, CHEN L W. Astrophys J, 2012, **756**: 56.
- [39] LAI D, SHAPIRO S L. ASTROPHYS J, 1991, **383**: 745.
- [40] BANDYOPADHYAY D, CHAKRABARTY S, PAL S. Phys Rev Lett, 1997, **79**: 2176.
- [41] YUAN Y F, ZHANG J L. A&A, 1998, **335**: 969.
- [42] BRODERICK A E, PRAKASHB M, LATTIMER J M.

- Phys Lett B, 2002, **531**: 167.
- [43] LATTIMER J M, PRAKASH M. Phys Rep, 2007, **442**: 109.
- [44] DAS U, MUKHOPADHYAY B. Phys Rev Lett, 2013, **110**: 071102.
- [45] YUE C P, YANG F, SHEN H. Phys Rev C, 2009, **79**: 025803.
- [46] RAY S, ESPINDOLA A L, MALHEIRO M. Phys Rev D, 2003, **68**: 084004.
- [47] GHEZZI C R. Phys Rev D, 2005, **72**: 104017.
- [48] PICANC R, NEGREIROS O, WEBER F. Phys Rev D, 2009, **80**: 083006.
- [49] REISDORFC W, CSTOCKMEIER M, ANDRONIC A, *et al.* Nucl Phys A, 2007, **781**: 459.
- [50] LI B A, DAS C B, GUPTA S Das, *et al.* Nucl Phys A, 2004, **735**: 563.
- [51] DAS C B, DAS G S, GALE C, *et al.* Phys Rev C, 2003, **67**: 034611.
- [52] DANIELEWICZ P, LACEY R, LYNCH W G. Science, 2002, **298**: 1592.
- [53] LI B A, KO C M, BAUER W. Int J Mod Phys E, 1998, **7**: 147.
- [54] LI B A, CHEN L W, KO C M. Phys Rep, 2008, **464**: 113.
- [55] SZMAGLINSKI A, WOJCIK W, KUTSCHERA M. Acta Phys Polon B, 2006, **37**: 277.
- [56] FENG Z Q, JIN G M. Phys. Lett. B, 2010, **683**:140.
- [57] XIE W J, SU J, ZHU L, *et al.* Phys Lett B, 2013, **718**: 1510.
- [58] WEN D H, LI B A, KRASTEV P G. Phys Rev C, 2009, **80**: 025801.
- [59] XU J, CHEN L W, LI B A, *et al.* Astrophys J, 2009, **697**: 1549.
- [60] PRAKASH M, COOKE J R, LATTIMER J M. Phys Rev D, 1995, **52**:661.
- [61] LATTIMER J M, PRAKASH M. ASTROPHYS J, 2001, **550**: 426.
- [62] LATTIMER J M, PRAKASH M. Science, 2004, **304**: 536.
- [63] FUJII Y. Nature (London), 1971, **234**: 5.
- [64] LONG J C, CHAN H W, CHURNSIDE A B, *et al.* Nature (London), 2003, **421**: 922.
- [65] KRIVORUCHENKO M I, ŠIMKOVIC F, GUESSER A. Phys Rev D, 2009, **79**: 125023.
- [66] YAN J, WEN D H. Commun Theor Phys, 2013, **59**: 47.
- [67] ZDUNIK J L, HAENSEL P. A&A, 2013, **551**: 61.
- [68] CHODOS A, JAFFE R L, JOHNSON K, *et al.* Phys Rev D, 1974, **9**: 3471.
- [69] FARHI E, JAFFE R L. Phys Rev D, 1984, **30**: 2379.
- [70] SCHWAB J, HUGHES S A, RAPPAPORT S. arXiv: 0806.0798v1.
- [71] HESSELS J W T, RANSOM S M, STAIRS I H, *et al.* Science, 2006, **311**: 1901.
- [72] COOK G B, SHAPIRO S L, Teukolsky S A. Astrophys J, 1994, **422**: 273.
- [73] STERGIOULAS N, FRIEDMAN J L. Astrophys J, 1995, **444**: 306.
- [74] KRASTEV P G, LI B A, WORLEY A. Astrophys J, 2008, **676**: 1170.
- [75] WEN D H, CHEN W. Chin Phys B, 2011, **20**: 029701.
- [76] DIRAC P A M. Nature, 1937, **139**: 323.
- [77] UZAN J P. Rev Mod Phys. 2003, **75**: 403.
- [78] PEEBLES P J E , RATRA B. Rev Mod Phys, 2003, **75**: 599.
- [79] MOSS A, NARIMANI A, SCOTT D. Int J Mod Phys D, 2010, **19**: 2289.
- [80] BRANS C, DICKE R H. Phys Rev, 1961, **124**: 925.

Mechanics for Soft EOSs Supporting Massive Neutron Stars

WEN Dehua, JING Zhenzhen

(*Department of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*)

Abstract: The analysis of the laboratory data from the heavy-ion collisions and the correlated theoretical research prefer a soft equation of state (EOS) for the unsymmetric dense matters; and the presence of hyperons at density exceeding 2~3 times of normal nuclear density ρ_0 also may soften the EOS of the dense matters. But a soft EOS cannot support a massive neutron star. After the observation of pulsar PSR J1614-2230 with a mass of $(1.97 \pm 0.04) M_{\odot}$, we have to face this intractable contradiction. In order to solve this contradiction, people have proposed several possible mechanisms, including the modified gravity theory, the modified models for the description of the dense matters and so on. This paper has reviewed these mechanisms. In addition, we also calculated and discussed the effect of the strong electromagnetic field on the maximum mass of the neutron stars. It is found that the strong electromagnetic field can increase the maximum mass of the neutron stars efficaciously.

Key words: neutron star; equation of state; non-newtonian gravity

Received date: 20 Sep. 2013; **Revised date:** 16 Oct. 2013

Foundation item: Natural Science Foundation of China(10947023, 11275073, 11205061); Fundamental Research Funds for Central Universities(2013ZG0036), Scientific Research Foundation for Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry(42th)

Corresponding author: WEN Dehua, E-mail: wendehua@scut.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>