

在脉冲星的观测证据中寻找夸克解禁态^{*}

文德华¹, 刘良钢²

(1 中山大学数学与计算科学学院, 广东 广州 510275)

(2 澳门科技大学信息技术学院, 澳门)

摘 要: 简述了中子星结构、组成、演化的理论研究以及相关的观测进展, 对演化后期孤立毫秒脉冲星和处于双星系统中的脉冲星可能存在夸克解禁和夸克重囚禁的现象进行了理论上和观测证据上的探讨。认为双星系统中的脉冲星可能会由于条件不同, 会分别出现夸克解禁和夸克重囚禁的现象。

关键词: 脉冲星; 孤立中子星; 双星系统; 夸克相变

中图分类号: O412.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2006) 05-0026-05

1 中子星的理论研究和脉冲星的观测

现在所说的中子星 (在观测上称为脉冲星), 通常是指那些质量在 $1 \sim 3 M_{\odot}$ (太阳质量)、半径在 10 km 左右、脉冲周期分布在 $1.6 \text{ ms} \sim 8 \text{ s}$ 之间以及中心密度数倍于饱和核密度的致密星体。质量大而体积小的中子星会产生很强的引力场, 中子星内部达到引力平衡时必然存在一个超高压环境, 在这种环境中的致密物质只能是以较基本的粒子态而存在, 因此中子星是一个天然的基本粒子实验室, 研究中子星的一个重要目标就是研究致密物质的物态, 即研究超高密度下的物质组成及其相互作用机制等规律。现在我们已经知道, 中子星物质并不是象当初认为的那样, 单纯只由中子组成, 其内部具有复杂的物质组成。不同质量的中子星其内核的密度是不同的, 当然其物态也可能是不同的。现在流行的观点认为中子星中可能存在的物态有: 中子化物质 (n, p, e, μ)、奇异粒子 ($\Sigma, \Lambda, \Xi, \Delta$ 等)、Boson 凝聚态 (π, K 等) 和夸克解禁态 (u, d, s) 等。中子星超强的引力场还提醒我们, 在研究中子星结构时采用的动力学不能再是牛顿的引力理论, 而必须使用广义相对论。因此研究中子星的另一个目标就是验证更普适的引力理论——广义相对论, 特别是验证其关于引力波的预言。中子星演化是研究中子星的又一个重要课题。中子星诞生是中子星演化的开始。一般认为中子星是诞生于大质量恒星 (大于 $8 M_{\odot}$) 在燃料耗尽后的引力坍缩 (超新星爆发)。尽管现在可观测的宇宙范围内

也许中子星的诞生事件很少, 但我们还是有机会观测到很多中子星的诞生, 因为有的中子星尽管已经诞生了一百万年, 但如果它离我们的距离有一百万光年那么远, 则它诞生时的信号到现在才传到我们地球上, 只不过距离越远, 观测越困难。有的中子星的演化已经经历了数亿年甚至更长的时间, 我们不可能通过跟踪某一颗或几颗星体来研究其演化过程, 在宇宙中分布有众多的中子星, 这些中子星的集合就是一部中子星的演化史。这就象认识人的一生, 只需要看看我们周围各种不同年龄的人就知道人一生要经历那些阶段, 每一阶段会有什么特征。但对于中子星我们会遇到一个困难——怎么去判断众多的中子星中哪一颗是刚诞生的、哪一颗是正值壮年, 哪一颗又已步入晚年呢? 尽管有个别中子星可通过当年大爆发的记录来判断其年龄, 但这种个案不是解决问题的根本出路, 最多只能作为验证演化模型的一个判据。研究中子星的演化需要把中子星的各种可观测因素例如热演化、转动周期的演化、辐射频谱的演化等综合考虑才有可能得出合理的结果。

在观测上, 把周期在 $0.02 \sim 8 \text{ s}$ 的中子星称为典型中子星 (canonical pulsars), 占观测到的中子星的绝大部分; 把周期更短的中子星称为毫秒脉冲星 (millisecond pulsars), 一般认为毫秒脉冲星经历了更长时间的演化——新生的中子星 (一般是典型中子星) 在其漫长的演化过程中自转速度将由于辐射角动量的损失而逐渐变慢, 如果由于偶然的机会俘获了伴星, 则由于吸积作用会使得转动

* 收稿日期: 2006-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10275099); 中国博士后科学基金资助项目 (2005037175)

作者简介: 文德华 (1972年生), 男, 在站博士后; E-mail: wendehua@scut.edu.cn

加速，从而变成毫秒脉冲星。而孤立的毫秒脉冲星则认为与伴星分离后的老年脉冲星，其转动速度将随时间逐渐变慢（如果没有夸克等相变过程产生）。刚诞生的脉冲星具有很强的磁场（ $10^{12} \sim 10^{13}$ G），把新生的脉冲星看成是一个旋转的磁偶极子，其转动动能能维持辐射大约 10^7 年，此后如果没有转动加速机制，将由于转动太慢而停止辐射。但如果这些脉冲星在自行的过程中俘获了伴星，由于中子星的强引力场，大多会对伴星有吸积作用，从而进入转动加速期，但磁场将进一步减弱（ $10^8 \sim 10^9$ G）。现在已经积累了丰富的脉冲星观测资料。图 1 显示了已观测到的脉冲星的周期分布情况^[1]。从图 1 可以看出，在已观测到的脉冲星中，周期为数百毫秒的脉冲星最多，这些脉冲星多是处在演化初期的年轻中子星，辐射活动较强，容易被观测到。对于短脉冲周期区域，也存在一个较低的分布峰值，它们对应的是毫秒脉冲星，一般认为它们已经历了双星系统的吸积加速阶段。

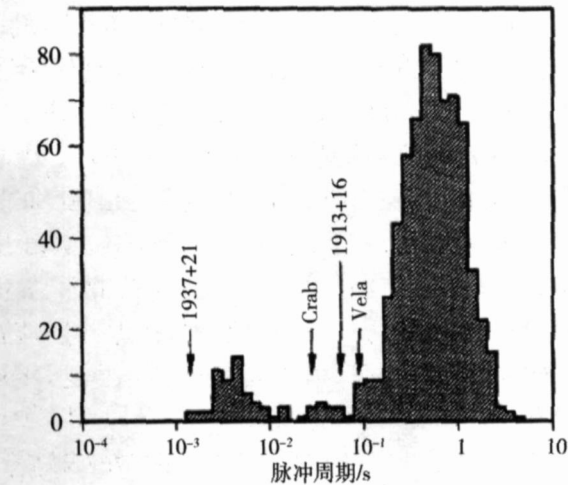


图 1 已观测到的脉冲星的周期分布
Fig 1 Distribution of the observed pulsars' periods

在中子星的理论研究方面，一般是从广义相对论出发，结合量子场论和粒子物理来探索中子星的结构、物质组成及其相互作用机制。在图 2 中我们给出了确定中心密度条件下中子星质量、半径随周期的变化规律，其中物态方程采用了相对论模型，传统中子星（Traditional neutron star）主要由中子化物质（ n, p, e, μ ）、组成，超子星（Hyperon star）主要由中子星化物质和奇异粒子（ $\Sigma, \Lambda, \Xi, \Delta$ 等）组成^[2-3]。从图 2 中容易看出，对于中心密度一定的中子星，转动效应将增大中子星的质量和半径。相应地，对于质量一定的孤立中子星，由于离心力的作用，自转速度越快，中心密度

就越小，星体半径就越大。对于快速旋转的中子星例如毫秒脉冲星，其中心具有较小的密度，对应的物态可能是中子化物质（ n, p, e, μ ），但由于辐射将减小中子星的转动动能，将使得中子星的转速越来越慢，旋转效应将越来越弱，中心密度将越来越大，当转速低于某一临界值时中心密度将变得足够大，以至出现新的物态，即发生了通常所说的相变，相变将导致物质的重新分布从而影响中子星的整体结构，反映在观测上就是脉冲周期将出现异常变化。根据量子色动力学（QCD）理论，当密度大于某一临界值时，将出现夸克解禁。反之，在双星系统中的中子星由于吸积将使转速加快，从而导致中心密度变小，这就有可能使得原本处于解禁态的夸克物质重囚禁。本文将就中子星的演化过程中可能存在的夸克解禁和重囚禁以及相对应的观测效应进行阐述。

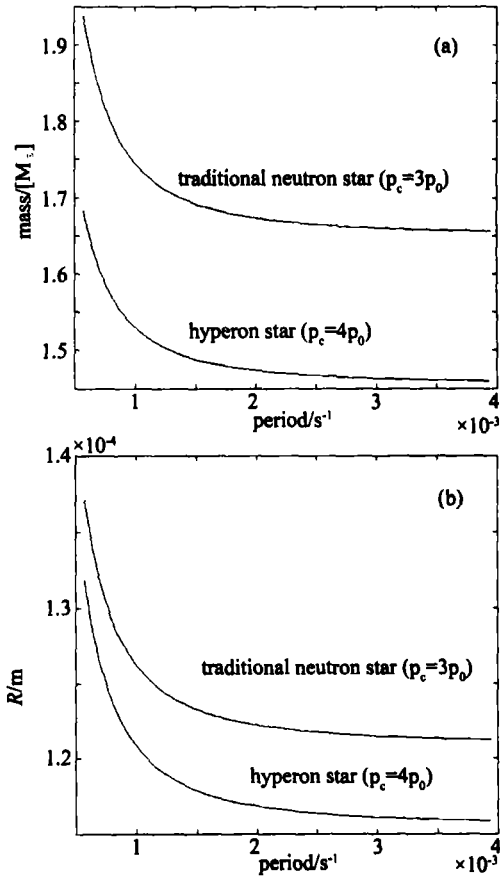


图 2 在一定的中心密度下，中子星的 (a) 质量和 (b) 半径随周期的变化关系。其中， ρ_0 是饱和核密度

Fig.2 Masses (fig a) and radii (fig b) of neutron stars as a function of the periods at a given central density where ρ_0 is the saturated nuclear density

2 解禁的奇异夸克态物质

根据量子色动力学我们知道，强子（hadron）

由夸克组成, 夸克与夸克通过色相互作用结合在一起, 色相互作用通过玻色子 (boson) ——胶子 (gluon) 来传递。胶子没有静质量, 但带有色荷。夸克吸收一个或放出一个胶子时会改变颜色。色相互作用具有禁闭的特性, 即只有夸克和胶子组成的无色系统才能独立存在, 有色的粒子只能禁闭在系统内部。虽然夸克和胶子被禁闭在强子内部, 但在极端条件下, 它们在强子中可近似看成无相互作用, 即达到所谓的色相互作用的“渐近自由”。在中子星内核, 物质极端致密, 有机会出现色相互作用的渐近自由, 中子、质子以及其它强子等将“溶解”为更基本的粒子, 即出现夸克解禁态。理论证明^[4], 如果中子星中心的致密区存在夸克解禁态, 则一定是只含 (*u d s*) 三味夸克的奇异夸克物质, 因为这种物态是可以稳定存在的最低能态。图 3 给出了含夸克物质和强子的混合星 (Hybrid star) 的物质组成随重子密度的变化关系^[5]。从图中可以看出, 在重子密度较大的区域 (大于 3.5 倍饱和核密度), 将出现解禁的奇异夸克态物质。如果重子密度大于 10 倍饱和核密度, 则所有强子将被“溶解”, 成为完全解禁的纯奇异夸克态物质。

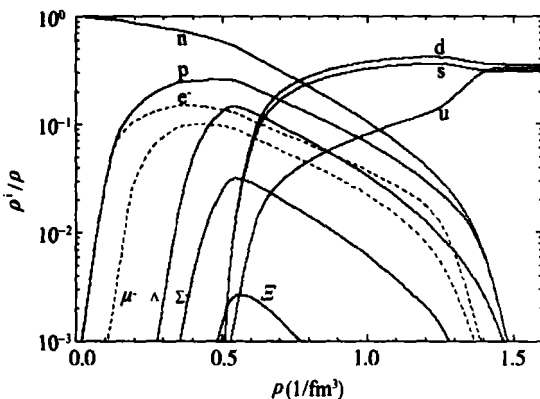


图 3 含夸克态物质和强子的混合星 (Hybrid star) 的物质组成随重子密度的变化关系

Fig. 3 Composition of hybrid star (quark hadron matters) as a function of baryon density

3 演化后期的中子星可能存在夸克解禁或重囚禁

3.1 孤立毫秒脉冲星

对于一颗质量适当的孤立毫秒脉冲星, 由于磁场较弱, 因此辐射相对较弱, 由其引起的转速减慢也会减小 ($\Omega \propto B^2$), 但经过较长时间的积累后, 转速会减到很慢, 如前文所述, 当转速减慢时, 中心密度会逐渐变大。例如对于一种较软的物态方程

$G_{B180}^{K300[4]}$, 一个质量为 $1.42M_{\odot}$ 的中子星, 在开普勒 (Kepler) 角速度下的中心密度约为 $450 \text{ MeV}/\text{fm}^3$ (不到 2 倍饱和核密度), 但在无转动情形下中心密度可达 $1500 \text{ MeV}/\text{fm}^3$ (约为 6 倍饱和核密度), 这样大的密度变化必然导致中心区物质组成的变化。根据量子色动理论, 对于某一孤立中子星, 当转速变慢, 内层密度逐渐变大, 当密度增大到某一临界值时, 会出现夸克的解禁现象。这种由于中心密度增大而导致的夸克解禁相变将使物态方程变软, 从而使得中心区的密度更大、引力场更强, 强引力场将改变星体结构和物质分布, 较外层的物质密度也会超过临界相变密度, 因此相变将由内向外逐层进行, 一直到密度小于临界相变密度为止。对于质量一定的中子星, 如果相变使中心区密度变得更大, 则相变后的星体半径将变小, 这种相变就象是对中子星实施了一个压缩过程。计算表明, 夸克相变可以使中子星的半径缩小数百米。出现了夸克相变的中子星一般称为奇异星 (Strange star), 对于奇异星, 在没有外加压力时也可以通过自身约束形成星体, 即没有引力存在也可形成奇异星, 引力的作用只是使奇异星更致密, 因此奇异星具有半径较小的特点。奇异星在质量一定的情况下比通常的中子星的半径要小很多, 一般小 $3 \sim 4 \text{ km}$ ^[7], 因此观测到脉冲星半径小的特征是证认夸克相变存在的重要依据。同时, 由于夸克相变可以有效地减小中子星的转动惯量, 根据角动量守恒可以判断, 发生了夸克解禁相变的中子星必然会观测到一个转动加速的演化期。观测孤立中子星的转动加速也可作为夸克相变存在的又一个证据。

下面我们再探讨一下孤立中子星自转减速导致的夸克相变在观测上的另一个效应。辐射消耗的能量源自于中子星的自转动能, 因此, 中子星的转动速度将随着辐射的进行而缓慢变小。在观测上通常可以测出自转角速度 Ω 随时间的一阶变化率 $\dot{\Omega}$ 和二阶变化率 $\ddot{\Omega}$ 。对于脉冲星, 根据观测有

$$\dot{\Omega} = -K\Omega^n \quad (1)$$

其中, K 为常数, n 称为制动指数。该式两边对时间求导数, 有

$$\ddot{\Omega} = -Kn\Omega^{n-1}\dot{\Omega} = -Kn\Omega^n \quad (2)$$

因此有

$$n = \frac{\ddot{\Omega}}{\dot{\Omega}^2} \quad (3)$$

缓慢减速旋转的中子星演化到某一阶段, 如果忽然出现了转动加速, 则势必导致制动系数的反常变化, 因此测量 n 的反常变化可以提供夸克态存在的证据。对于较慢旋转的中子星, 例如周期大于几百

毫秒的中子星，在演化过程中当转速再变慢时，由于离心力的变化小，中心密度不会出现大的变化，因此也就不会出现夸克相变。所以只有转速很快的毫秒脉冲星在辐射减速过程中才有可能出现夸克相变，从而出现制动系数的反常现象。计算表明^[7]，对于一颗质量为 $1.42 M_{\odot}$ 的中子星，假设在转速为 $\Omega = 1\,370\text{ s}^{-1}$ (周期为 4.59 ms) 时出现了宽度为

$$\Delta\Omega = \Omega_{\text{末}} - \Omega_{\text{初}} = -50\text{ s}^{-1} \tag{4}$$

即

$$\Delta P \approx -2\pi \Delta\Omega \Omega^{-2} \approx 1.5 \times 10^{-4}\text{ s} \tag{5}$$

的转速变化 (或周期变化)，根据观测，对于转速为 $\Omega = 1\,370\text{ s}^{-1}$ 的毫秒脉冲星其年龄一般在 10^9 年，周期变化率通常为 $\dot{P} \approx 10^{-19}$ ，根据 $\Delta T \approx -\Delta\Omega \Omega^{-2} = \Delta P / P$ 可以算出其转动加速的时间约为 0.5×10^8 年，也就是说如果存在夸克相变，由相变产生的转动加速可以持续 1 亿年之久。从这个意义上讲，夸克相变引起的转动加速不能用于解释周期突变 (Glitch)。对于周期突变，只有较小的相对转速变化或相对转动惯量变化： $\Delta\Omega / \Omega = \Delta I / I \approx 10^{-6}$ 或更小，而且周期突变的产生时间、周期恢复时间都比较短。粗略的估计表明，对于已观测到的近 30 颗孤立毫秒脉冲星，应该有 10% 左右处在夸克相变引起的转动加速阶段^[7]。

3.2 双星系统中转动加速的中子星

在双星系统中，吸积作用将使中子星的转动加速，由于离心力的作用，转动加速会导致中心密度变小，当转动加速积累到一定程度 (至少已变成毫秒脉冲星)，对于一定质量、原本处于夸克解禁态的中子星，有可能又出现夸克的重囚禁，也就是说，会出现与孤立中子星完全相反的演化过程。

3.3 中子星存在夸克相变的观测证据

在观测上，根据已有的观测资料，下面几颗星被认为很有可能是奇异星：① SAX J1808.4 - 3658^[8]：1996 年由 BeppoSAX 卫星发现，位于双星系统，为 X-射线爆，距离约为 4 kpc，爆发时的发光度为 $6 \times 10^6\text{ erg/s}$ ，同时也探测到周期为 2.49 ms 脉冲辐射，轨道周期为 2 h。根据对该双星系统的观测和理论计算，该星的半径不超过 10 km，这种小半径是奇异星所具有的特征，也就是说该中子星中可能存在夸克解禁态。当然，位于双星系统的 SAX J1808.4 - 3658 如果是奇异星，则表明它的中心密度足够大，其物质还处于夸克解禁态；② RX J1856.5 - 3754^[9]：到地球的距离约为 120 pc，年龄约为 10^6 年。可以通过热辐射来探测质量和半径的孤立中子星，通过热辐射计算表明星体半径在 4

~8 km 之间，这样小半径的中子星很有可能是一颗裸奇异星。RX J1856.5 - 3754 是最亮的一颗 X-射线孤立中子星，其 X-射线被认为是黑体辐射。没有观测到脉冲辐射，也许是磁场太弱或转速太慢，脉冲辐射已经停止了；也有可能是它的辐射束由于方位的原因永远都照不到地球上，因此我们无法从该孤立中子星中寻找转动加速的证据。③ PSR 0205 + 6449^[10]：位于仙后座的超新星爆发残余 3C 58 中，周期 65 ms，该残余与 1811 年观测到的超新星爆发成协。根据观测，该脉冲星的温度小于 $1.08 \times 10^6\text{ K}$ ，这比标准的中子星冷却模型温度低很多，也就是说它的冷却速度太快。只有用奇异夸克星模型才可以给出一个合理的解释。

虽然从理论上我们可以从孤立中子星的转动加速、制动系数的反常变化等去寻找夸克相变存在的证据，但从上面的几个典型的观测证据我们可以看到，目前我们的观测证据还主要局限在半径小以及冷却快的间接证据上。如果能观测到一颗同时具有转动加速、制动系数反常以及半径小等特征的孤立中子星，则能很有说服力地证明夸克解禁态的存在。

4 讨 论

从前面的阐述我们知道，中子星中的夸克相变可以出现在孤立中子星和双星系统中的吸积加速中子星两种情形，前者为夸克解禁，后者是夸克的重囚禁。在观测上，如果中子星中存在夸克解禁态，则会导致中子星的半径变小。而一个质量为 $1.4 M_{\odot}$ 的含夸克解禁态的奇异星，如果在两倍饱和核密度下都存在夸克解禁态，则在奇异星的表面都可以存在夸克解禁态，这种奇异星一般称为裸奇异星 (而在普通中子星的表面其密度可减至 $0.1 \sim 1\text{ g/cm}^3$)，它的半径就更小，因此观测到小半径的脉冲星可以作为中子星中存在夸克相变的一个重要证据。同时，这种相变也会有效地减小中子星的转动惯量，由角动量守恒容易判断相变后的中子星将出现转动加速，观测到孤立中子星在缓慢减速的演化过程中如果出现了转动加速的演化期，则有可能在该中子星中存在夸克相变。尽管已经观测到转动加速的孤立中子星，例如 PRS0021 - 72C 和 PRS0021 - 72D^[5]，但由于没有相应的其它证据佐证，还无法直接把它们作为夸克解禁态存在的证据，因为在中子星内部还可能出现其它使物态方程变软的相变，例如超子的出现以及 Boson 凝聚态等相变等都有可能使孤立中子星转动加速。另一方面出现了夸克相变的孤立中子星，将观测到制动系数的反常变

化。如果能在观测上同时找到上述三方面的证据, 则我们就有足够的理由相信夸克解禁态的存在。

对于双星系统中中子星的夸克相变理论, 现有的模型中一般都只考虑了吸积的加速效应而忽略了吸积的质量积累效应。尽管吸积产生的质量积累很慢, 但如果吸积的时间足够长, 而辐射又有效地减慢了中子星的自转, 使其吸积产生的加速还不至于使转速超过开普勒角速度, 则吸积产生的质量积累将使中子星的总质量增加, 如果由于某种原因吸积停止, 则辐射将使转速逐渐变慢, 中心密度就会逐渐增加, 当密度大于临界相变密度, 也会出现夸克解禁态, 也就是说, 在双星系统也有可能发生中子星的夸克解禁相变。在极端情形下, 由于星体转速减慢导致密度增大、半径变小, 则有可能由于物质抵挡不了逐渐增大的引力而坍缩成黑洞。

参考文献:

- [1] GLENDENNING N K. Pulsar Signal of Deconfinement [J]. Nucl Phys A, 1998, 638: 239 – 248
- [2] WEN D H, CHEN W, WANG X J, et al. Structures of Rotating Traditional Neutron Stars and Hyperon Stars in the Relativistic $\sigma - \omega$ Model [J]. Eur Phys J A, 2004, 21: 349 – 354
- [3] CHEN W, WEN D H, LIU L G. The softness of Nuclear

Matter and the Production of Strange Particles in Neutron Stars [J]. Chin Phys Lett, 2003, 20: 436 – 439

- [4] ALFORD M, RAJOPAL K, WILCZEK F. QCD at finite baryon density: nucleon droplets and color superconductivity [J]. Phys Lett, 1998, 422B: 247 – 256
- [5] WEBER F. Pulsars as Astrophysical Laboratories for Nuclear and Particle Physics. High Energy Physics, Cosmology and Gravitation Series (IOP Publishing, Bristol, Great Britain, 1999).
- [6] GLENDENNING N K, PEISWEBER F. Signal of Quark Deconfinement in the Timing Structure of Pulsar Spin-Down [J]. Phys Rev Lett, 1997, 79: 1603 – 1606
- [7] WEBER F. Strange Quark Matter and Compact Stars. <http://xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/0407155>
- [8] LI X D, BOMBACI J, DEY M, et al. Is SAX J1808.4 – 3658 a Strange Star? [J]. Phys Rev Lett, 1999, 83: 3776 – 3779
- [9] Kaplan D L, KERKWIK M H, ANDERSON J. The Parallax and Proper Motion of RX J1856.5 – 3754 Revisited [J]. Astrophys J, 2001, 571: 447 – 457
- [10] MURRAY S S, SLANE P O, SEWARD F D, et al. Discovery of X – Ray Pulsations from the Compact Central Source in the Supernova Remnant 3C 58 [J]. Astrophys J, 2002, 568: 226 – 232

Evidence of Deconfinement of Quark Matters in the Observation of Pulsars

WEN De-hua¹, LIU Liang-gang²

(1. Department of Mathematics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. The Faculty of Information Technology, Macao University of Science and Technology, Macao, China)

Abstract Theoretical research and observational progress on the structure, compositions and the evolution of neutron stars are briefly reviewed, then the theory and observational evidence of the deconfinement and reconfinement of quark matters in the old isolated millisecond pulsars and the pulsars in binaries are discussed. To the pulsars in binaries, as the conditions are different, both of the deconfinement and the reconfinement of quark matters may take place.

Key words pulsar; isolated neutron star; binaries system; phase transition to quark matters