

探究双脉冲星候选体 PSR J1906+0746的物理性质*

杨佚沿^{1,2} 李 茜^{2,3} 陈 黎^{4†}

(1 贵州师范学院物理与电子科学学院 贵阳 550018)

(2 中国科学院FAST重点实验室 北京 100101)

(3 中国科学院国家天文台 北京 100101)

(4 北京师范大学天文系 北京 100875)

摘要 PSR J1906+0746是2006年发现的一颗自旋周期为144 ms的射电脉冲星, 由于探测到的是第2颗形成的非自转加速伴星, 主星和伴星组成的系统极有可能成为另一对双脉冲星. 从PSR J1906+0746的基本物理量出发, 针对性地对比研究双中子星和脉冲双星(包括中子星-白矮星)的磁场-周期关系, 大致得出他们的演化路径; 其次通过双中子星的形成机制以及双星形成过程中的物质损失, 假定非自转加速的伴星形成于电子俘获, 得出伴星前身星的质量约为 $1.57 M_{\odot}$, 在形成双中子星系统过程中损失了约 $0.23 M_{\odot}$. 这可能是由于电子俘获能量较低, 不能抗衡伴星的引力束缚能, 最终抛出物质没有逃逸, 形成了一个椭圆环, 成功解释了在X射线波段观测到的围绕着PSR J1906+0746的环结构.

关键词 恒星: 中子, 脉冲星: 个别: PSR J1906+0746, 星际介质: 普通

中图分类号: P153; **文献标识码:** A

1 引言

自1974年Hulse和Taylor发现第1颗双中子星PSR B1913+16以来^[1], 双中子星(DNS)系统在天体物理学和基础物理学方面都具有广泛应用, 目前主要用于检验广义相对论(GR)和其他引力理论^[2-4]. 此外, 研究脉冲双星(至少包含一个脉冲星的双星系统)中脉冲形态变化和偏振测定有利于掌握相对论的自旋-轨道耦合^[5]. 相对论性的脉冲双星是双星系统演化较为罕见的结果, 其演化过程揭示双星形成的独特性质, 并有力约束致密星体形成的物理机制. 探测到的DNS系统对于估算银河系乃至宇宙中DNS的合并率做出重要贡献^[6]. 伴随引力波的发射, 这颗脉冲星(PSR J1906+0746)在哈勃时间内将合并, 这也使其成为引力波探测的潜在对象之一. 许多X射线源的X射线辐射都源于双星系统中主星对其伴星物质的吸积过程^[7]. 研究DNS的超新星爆炸过程和其中的中子

2018-06-01收到原稿, 2018-08-07收到修改稿

*中国科学院FAST重点实验室开放项目, 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1134和黔科合基础[2018]1119), 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2017]204)资助

†chenli@bnu.edu.cn

星(NS)形成机制以及在双星作用过程中NS的演化,能够进一步了解致密星体的内部核物质成分、结构及其物态方程^[8-9],同时,双星系统中的脉冲星可以探测引力波效应,例如引力辐射所引起的轨道收缩,引力红移及多普勒延迟,从而可以通过双星系统的近星点及其他精确测量来推断NS的质量^[10].

2006年, Lorimer等人利用阿雷西博望远镜发现了PSR J1906+0746,通过测定轨道参数,认定其为一颗特征年龄约为113 kyr的年轻脉冲星^[11]. 然而,在射电波段没有观测到其“伴星”,导致目前不能判断其“伴星”的本质. 通过与双脉冲星PSR J0737-3039的物理性质比较,分析之后认为在PSR J1906+0746系统中,未探测到的自转加速的主星最有可能是另外一颗类似于PSR J0737-3039A的脉冲星^[12]. Kargaltsev和Pavlov于2009年通过钱德拉X射线探测器同样观测到了这颗X波段的相对论脉冲星,这为理解高能射线的产生和发射机制提供了一个样本^[13]. 但令他们惊讶的是:尽管在射电位置处探测到了PSR J1906+0746,但中心位置向外3"范围内没有发现任何光子,在射电位置向外1.6'的周围探测到一个倾斜环结构使人疑惑. 最为合理的解释是,其“伴星”可能是一颗X射线光度较低的脉冲星,被一个环结构的脉冲星风星云或者是星际介质(ISM)包围起来.

当前,已经探测到约2800颗中子星,273颗双星系统,其中DNS仅18对^[14]. 其在中子星中的占比不足1%,平均探测100颗中子星才能相应地发现一对DNS,如此小的探测率主要是因为中子星独特的形成机制. 加之,至今仅有PSR J0737-3039系统被确认为双脉冲星(组成系统的两颗中子星分别被探测到). 如果PSR J1906+0746有幸被观测证认为双脉冲星,那么双脉冲星在DNS中的探测率将提高到约10%. DNS形成过程中可能会涉及到多种因素的影响和制约,如双星之间的潮汐力,强烈的恒星风,超新星爆发,多阶段的质量转移以及由于引力波辐射引起的轨道衰减等等^[15],上述皆可能是打断DNS形成的重要因素,由于DNS的形成率原本就小,致使其探测率相应较低.

本工作主要针对PSR J1906+0746的周期(自旋周期和轨道周期)、磁场、质量等物理量的研究,探讨这对双脉冲星候选体的形成机制,再根据其演化机制来解释PSR J1906+0746的环结构的形成原因. 文章结构安排如下:第2部分是对PSR J1906+0746的相关参数进行简单分析;第3部分主要探讨PSR J1906+0746形成机制,即电子俘获模型;第4部分讨论环结构形成的原因;最后是本工作的总结和展望.

2 PSR J1906+0746的相关参数及分析

PSR J1906+0746自2006年发现以来备受天文学家的青睐和关注,主要由于以下多方面的原因:其较小的自旋周期($P_s = 144$ ms)以及周期导数($\dot{P}_s = 2.027 \times 10^{-14}$ s/s),致使这颗双中子星的特征年龄非常小,这暗示它目前的轨道参数和诞生时相比变化不大. 中子星的辐射一般为磁偶极辐射,辐射时损失自身能量,导致自旋变慢,周期变长. 磁偶极特征年龄表述为:

$$\tau = \frac{3Ic^3}{B^2 R^6 \Omega_0^2} = P_s / 2\dot{P}_s \simeq 113 \text{ kyr}. \quad (1)$$

其中, c 是光速, $I = \frac{2}{5}MR^2$ 是转动惯量, B 和 R 分别是中子星的表面磁场强度和半径, Ω_0 是 P_s 对应的角速度. PSR J1906+0746的轨道周期 $P_{\text{orb}} = 3.98$ h, 由于引力辐射导

致其角动量损失, 最终轨道会随时间较慢衰减, 其结果就是双中子星合并产生引力波. van Leeuwen等人通过脉冲到达时间(TOA)测得PSR J1906+0746的轨道周期衰减约为 $\dot{P}_{\text{orb}} = 10^{-12} \text{ s/s}^{[16]}$, 简单估算: 其合并时间约为 $t = P_{\text{orb}}/2\dot{P}_{\text{orb}} \simeq 300 \text{ Myr}$. 在所有18对双中子星中, PSR J1906+0746具有最小的轨道偏心率($e = 0.085$), 同时也是目前探测到的最年轻的相对论脉冲双星.

脉冲星的磁场强度一般通过间接方法估计. 首先假定是偶极磁场并且在其旋转过程中磁通量守恒; 在其旋转过程中会辐射出部分能量(也有可能通过辐射中微子的形式释放), 由于能量流失, 将导致脉冲星自旋周期变慢, 其周期变化率表示为 $\dot{P}_s = dP_s/dt$. 假设在转动过程中损失的能量为 \dot{E}_{rot} , 表达式如下:

$$\dot{E}_{\text{rot}} = -\frac{dE_{\text{rot}}}{dt} = -\frac{d(I\Omega^2/2)}{dt} = -I\Omega\dot{\Omega} = 4\pi^2 I \dot{P}_s P_s^{-3}, \quad (2)$$

式中转动能 $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2}I\Omega^2$, 角速度 Ω 与自旋周期 P_s 的关系为 $\Omega = 2\pi/P_s$. 需要注意的是: 因为向外辐射带走的能量损失不大, 所以中子星的自旋变化非常小, 几乎可以忽略. 辐射能 \dot{E}_{em} 与磁偶极矩 $|\vec{m}|$ 的关系可以表述为^[17]:

$$\dot{E}_{\text{em}} = \frac{2}{3c^3} |\vec{m}|^2 \Omega^4 \sin^2 \alpha, \quad (3)$$

(3)式中的 α 为中子星磁偶极矩与旋转轴之间的夹角, 脉冲星能量损失基本都向外辐射出去, 联合(2)式和(3)式, 解得脉冲星的自旋频率变化率 $\dot{\Omega}$ 表达式为:

$$\dot{\Omega} = -\left(\frac{2|\vec{m}|^2 \sin^2 \alpha}{3Ic^3}\right) \Omega^3. \quad (4)$$

根据磁场强度和磁矩之间的关系 $B \approx |\vec{m}|/r^3$, 由(4)式可以推导出脉冲星的表面磁场强度 B_s (文章所提到的脉冲星磁场强度均为表面磁场强度),

$$B_s = \left(\frac{3c^3 I}{8\pi^2 R^6} P_s \dot{P}_s\right)^{1/2} \simeq 3.2 \times 10^{19} (P_s \dot{P}_s)^{1/2} \text{ Gs}. \quad (5)$$

在推导过程中作了相应的简化: 中子星的质量 $M = 1.4 M_\odot$, 半径 $R = 10 \text{ km}$, 转动惯量 $I = 10^{45} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$, 偶极磁矩与旋转轴的夹角 $\alpha = 90^\circ$. 代入相应数据之后, 得到PSR J1906+0746的磁场强度高达 $1.73 \times 10^{12} \text{ Gs}$, 这和双脉冲星(PSR J0737-3039)中伴星的磁场强度相当, 表明在形成DNS的过程中, 其伴星没有经历吸积和自转加速过程.

PSR J1906+0746系统的主星和伴星质量分别为 $1.322 M_\odot$ 和 $1.291 M_\odot$, 系统总质量为 $2.613 M_\odot$, 这和目前所统计的双中子星的质量非常吻合^[18-20], 其主星质量略高于伴星质量, 根据上文所述, 主星没有吸积非自转加速伴星的质量, 导致主星质量较高的可能解释是由于其前身星的质量较大. 然而, 较低的伴星质量、较高的磁场强度以及极小的偏心率, 这些物理量都支持其形成于电子俘获过程.

3 PSR J1906+0746的形成机制

双星伴星的类型主要有主序星、中子星、白矮星和行星. 不同的双星系统的性质差异较大, 主要与主星的磁场强度、伴星质量以及轨道周期等参数有关. 根据Australia

Telescope National Facility (ATNF)脉冲星表的数据^[14], 目前共发现了269对已经测定轨道周期和自旋周期的脉冲星双星系统(系统中至少包含一个中子星). 其伴星为中子星的系统18对, 伴星为主序星的系统19对, 伴星为He白矮星的系统119对, 伴星为CO或ONeMg白矮星的系统36对, 伴星为超轻星体或行星(质量低于 $0.08 M_{\odot}$)的系统46对, 双星系统中伴星类型不确定的超过30对.

通常来说, 在DNS系统中, 第1颗诞生的中子星通常是质量大于 $8 M_{\odot}$ 的大质量恒星经历超新星爆发产生的, 紧接着吸积同一轨道上运动的伴星质量, 最终自转加速到毫秒量级的脉冲星; 第2颗诞生的中子星通常为普通脉冲星, 不会经历物质吸积和自转加速, 其自旋周期一般大于 100 ms ^[4]. 研究表明^[21]: 在DNS系统中, 自转加速的脉冲星一般形成于大质量超新星爆发过程中的铁核坍缩, 非自转加速的第2颗形成的中子星, 视其轨道参数和质量不同, 除了存在核坍缩机制, 电子俘获机制也可能发生于部分低质量的DNS系统中.

在DNS形成过程中, 双星系统最初由两个大质量恒星组成, 质量较大的恒星演化更快, 率先充满其洛希瓣, 源源不断地转移物质给第2颗恒星, 在超新星爆发之后, 大质量恒星坍缩为第1颗中子星. 整个系统演变为高质量的X射线双星HMXB^[22]. 在HMXB系统中, 由于双星之间的相互作用, 第2颗大质量恒星(伴星)受到吸积影响, 其物质开始流向洛希瓣, 此时物质转移不稳定, 形成了一个吞没中子星的共同包层. 物质螺旋式地注入到伴星表面, 伴星获得物质之后, 角动量增加, 导致自转加速.

由于共同包层与喷出物质之间的相互作用, HMXB系统进一步演变为中子星和He核, 进一步地质量转移, He核经历超新星爆发, 形成第2颗中子星组成双中子星系统. 第2颗中子星的形成通常经历了两次物质转移. 在核坍缩模型中, 需要注意的是: 对于轨道周期和偏心率较大的双中子星, 双星之间通过共同包层传递质量, 最后多数是通过核坍缩形成伴星; 除此之外, 对于部分轨道周期较小、伴星质量较大($\geq 1.3 M_{\odot}$)的情况, 物质转移同样通过共同包层实现, 也有可能通过核坍缩形成中子星^[23-25].

轨道周期和偏心率较小、低质量($< 1.3 M_{\odot}$)的伴星, 通常经历电子俘获形成中子星^[24,26]. 电子俘获模型简单来说是通过电子俘获导致超新星爆炸. 当ONeMg核白矮星到达一定的临界密度后, 即密度约为 $4.5 \times 10^{19} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 其质量不大于 $1.37 M_{\odot}$ ^[27], 随即发生 ^{24}Mg 电子俘获现象, 这个过程将减少了电子简并压, 导致核质量小于钱德拉塞卡质量($1.4 M_{\odot}$), 最终引起坍缩^[28-29]. 由于这种类型的坍缩过程的时标小, 超新星的踢速度通常较低^[30-31]. PSR J1906+0746的形成过程示意图大致如图1所示.

4 环结构形成原因

脉冲星双星是指其中一颗为中子星的双星系统, DNS是双星系统中的一种. 脉冲星双星与孤立脉冲星的一个重要区别是存在吸积过程: 在一定条件下, 主星会通过吸积盘吸积或星风吸积的方式从伴星吸积物质, 从而会引起偏心率等参数变化.

2009年用X射线探测器在PSR J1906+0746周围看到了一个类似环形的结构, 从光学波段证实了它不可能是超新星遗迹, 原因在于PSR J1906+0746是一颗非常年轻的脉冲星(如图2), 在如此短的诞生时间内(113 kyr), 是极有可能观测到与之成协的超新星遗迹, 但被目前的深度观测予以否定^[13]. 其次, 超新星遗迹的半径较大, 远远大于上述环结

构. Kargaltsev和Pavlov^[13]当时提出了两种可能的猜想, 其一是认为环结构可能是ISM, 其二假设弥散在PSR J1906+0746周围的物质是脉冲星星风云.

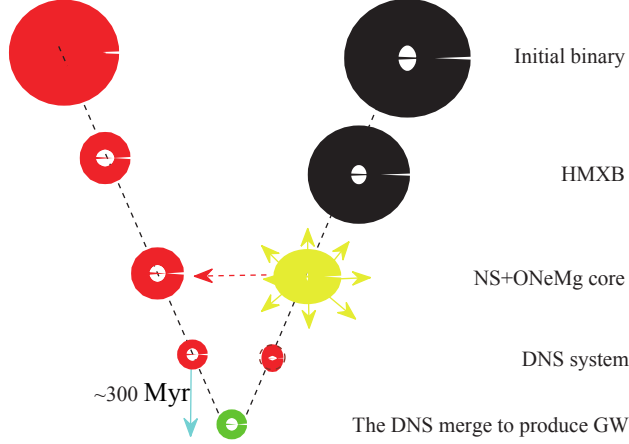


图 1 PSR J1906+0746的形成过程示意图: HMXB的质量均大于 $8 M_{\odot}$, PSR J1906+0746预计合并时间约为300 Myr并产生引力波(GWs).

Fig. 1 The formation process of PSR J1906+0746: the mass of high mass X-ray binaries (HMXB) is larger than $8 M_{\odot}$, and the estimated merging time of PSR J1906+0746 is about 300 Myr. The DNS could produce gravitational waves (GWs).

假设超新星爆发过程中喷出质量是球对称的, 在轨道偏心率 e 和喷出物质 ΔM 之间存在一个简单的关系如下^[27]:

$$e = \Delta M / (M_1 + M_2) = \Delta M / M_t. \quad (6)$$

其中 M_1 和 M_2 分别为DNS中第1颗和第2颗诞生时的中子星质量, M_t 是DNS系统的总质量. 目前的研究表明^[12]: PSR J1906+0746是通过各向同性的电子俘获机制形成. 在表1中收集了PSR J1906+0746的相关参数, 包括主星质量 M_p 、伴星质量 M_c 、总质量 M_t 、 P_{orb} 、 P_s 、 e 、 \dot{P}_s 和 B_s . 在电子俘获形成伴星过程中, 利用(6)式并代入对应数据计算出前身星质量损失约为 $0.23 M_{\odot}$.

表 1 PSR J1906+0746的相关参数
Table 1 The parameters of PSR J1906+0746

Parameter	M_p/M_{\odot}	M_c/M_{\odot}	M_t/M_{\odot}	P_{orb}/d	P_s/ms	e	$\dot{P}_s/\text{s} \cdot \text{s}^{-1}$	B_s/Gs
Value	1.322(11) ^a	1.291(11)	2.613(33)	0.166	144	0.085	2.027×10^{-14}	1.73×10^{12}

^a The figures in the brackets are the errors of relevant parameters

5 总结和展望

2017年11月, Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST)跟踪观测1 h, 遗憾的是仍然没探测到PSR J1906+0746系统的伴星. 所以本工作旨在通过

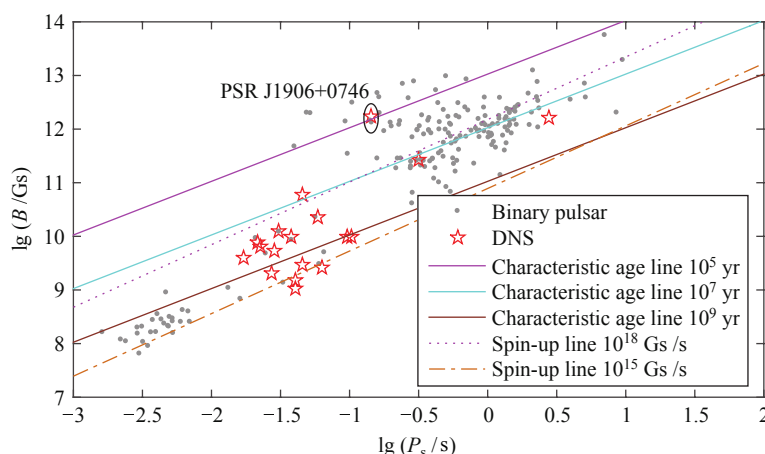


图 2 269对脉冲双星的表面磁场强度和自旋周期分布图, 其中双中子星18对. 数据取自ATNF脉冲星表

Fig. 2 The diagram of surface magnetic field strength versus spin period of binary radio pulsars (269 pairs), including 18 pairs of double neutron stars (DNSs). The data are taken from the ATNF pulsar catalogue

对此系统的参数简单分析后, 建议用低能高频的望远镜来继续跟踪观测, 如Fermi望远镜. 原则上, 也不能排除PSR J1906+0746是一个间隙性脉冲星, 所以下一步将继续申请FAST和Parks射电望远镜继续跟进探测, 有望更进一步了解这个双星系统的本质.

探测到的18对DNS中(包括最新探测的PSR J1757-1854, J1946+2052, J1755-2550, J1411+2551, J1913+1102)^[32-36], 其中16对位于银盘, 2对DNS (PSR J1807-2500B, B2127+11C)位于球状星系团. DNS系统是独特和稀有的中子星类型, 主要表现在: (1)在数量上远远小于其他脉冲双星, 或者是单独的脉冲星; (2)其质量分布较为集中, 包括DNS系统的总质量(约在 $2.7 M_{\odot}$ 附近)和单个中子星的质量(约在 $1.38 M_{\odot}$ 附近). (3)系统中脉冲星的自旋周期一般小于常规脉冲星的, 即 $P_s \leq 200$ ms. (4) DNS的自行速度较慢. (5)更为重要的是, 在所有脉冲双星中, DNS是验证引力波的最有力的候选体. Lorimer等人于2006年探测到这个脉冲星, 并指出没有探测到主星的原因是因为PSR J1906+0746的主星所发射的射电光束并没有指向当时的观测视野^[11]. 除此之外, 对于另外的可能性: 它可能与某些脉冲双星(如PSR J1141-6545)类似, 共同点在于伴有一颗大质量($\sim 1 M_{\odot}$)的白矮星, 并且其特征年龄较大, 脉冲双星PSR J1141-6545的特征年龄大约1.45 Myr. 如前面所述, 对于年轻的PSR J1906+0746系统, 由于目前并没有发现其附近伴有成协的超新星遗迹, 这为PSR J1906+0746的研究增添了迷雾.

本工作的结论如下: (1)从PSR J1906+0746的基本物理量出发, 由于通过电子俘获形成伴星的DNS的轨道周期和自旋周期通常都较小, 轨道周期小于1 d, 主星自旋周期一般不大于30 ms; 对于特征年龄小(113 kyr), 磁场大(1.73×10^{12} Gs), 伴星质量为 $1.291 M_{\odot}$, PSR J1906+0746被认为是DNS系统中的伴星, 并且形成于电子俘获过程. (2) PSR J1906+0746的伴星形成于电子俘获, 根据其形成机制的特性, 电子俘获的能量低于铁核坍缩所释放的, 所发生的是各向同性超新星爆炸, 爆炸过程中损失了 $0.23 M_{\odot}$, 这很好地解释了PSR J1906+0746周围的结构.

参考文献

- [1] Hulse R A, Taylor J H. *ApJ*, 1975, 195: 51
- [2] Lyne A G, Smith F G. *Pulsar Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 241
- [3] Lyne A G, Burgay M, Kramer M, et al. *Science*, 2004, 303: 1153
- [4] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. *ApJL*, 2017, 848: 12
- [5] Stairs I H. *Science*, 2004, 304: 547
- [6] O'Shaughnessy R, Kim C. *ApJ*, 2010, 715: 230
- [7] Li X D, Bombaci I, Dey M, et al. *PhRvL*, 1999, 83: 3776
- [8] Antoniadis J, Freire P C C, Wex N, et al. *Science*, 2013, 340: 448
- [9] Yang Y Y, Chen L, Linghu R F, et al. *ChPhL*, 2017, 34: 129701
- [10] Kramer M, Stairs I H, Manchester R N, et al. *Science*, 2006, 314: 97
- [11] Lorimer D R, Stairs I H, Freire P C, et al. *ApJ*, 2006, 640: 428
- [12] Yang Y Y, Zhang C M, Li D, et al. *ApJ*, 2017, 835: 185
- [13] Kargaltsev O, Pavlov G G. *ApJ*, 2009, 702: 433
- [14] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. *AJ*, 2005, 129: 1993
- [15] Bhattacharya D, van den Heuvel E P J. *PhR*, 1991, 203: 1
- [16] van Leeuwen J, Kasian L, Stairs I H, et al. *ApJ*, 2015, 798: 118
- [17] Jackson J D. *Classical Electrodynamics*. 3rd ed. New York: Wiley, 1999: 24
- [18] 杨佚沿, 张承民, 王德华, 等. *天文学报*, 2016, 57: 514
- [19] Yang Y Y, Zhang C M, Wang D H, et al. *ChA&A*, 2017, 41: 505
- [20] Zhang C M, Wang J, Zhao Y H, et al. *A&A*, 2011, 527: A83
- [21] Ferdman R D, Stairs I H, Kramer M, et al. *ApJ*, 2013, 767: 85
- [22] Phinney E S, Kulkarni S R. *ARA&A*, 1994, 32: 591
- [23] Dewi J D M, Podsiadlowski P, Sena A. *MNRAS*, 2006, 368: 1742
- [24] Wong T W, Willems B, Kalogera V. *ApJ*, 2010, 721: 1689
- [25] Ferdman R D, Stairs I H, Kramer M, et al. *ApJ*, 2010, 711: 764
- [26] van den Heuvel E P J. *NewAR*, 2010, 54: 140
- [27] Podsiadlowski P, Dewi J D M, Lesaffre P, et al. *MNRAS*, 2005, 361: 1243
- [28] Nomoto K. *ApJ*, 1984, 277: 791
- [29] Suzuki T, Toki H, Nomoto K. *ApJ*, 2016, 817: 163
- [30] Podsiadlowski P, Langer N, Poelarends A J T, et al. *ApJ*, 2004, 612: 1044
- [31] van den Heuvel E P J. *AIPC*, 2007, 924: 598
- [32] Cameron A D, Champion D J, Kramer M, et al. *MNRAS*, 2018, 475: 57
- [33] Stovall K, Freire P C C, Chatterjee S, et al. *ApJ*, 2018, 854: 22
- [34] Ng C, Kruckow M U, Tauris T M, et al. *MNRAS*, 2018, 476: 4315
- [35] Martinez J G, Stovall K, Freire P C C, et al. *ApJ*, 2017, 851: 29
- [36] Lazarus P, Freire P C C, Allen B, et al. *ApJ*, 2016, 831: 150

Study on Physical Properties of the Double Pulsar Candidate J1906+0746

YANG Yi-yan^{1,2} LI Di^{2,3} CHEN Li⁴

(1 School of Physics and Electronic Sciences, Guizhou Education University, Guiyang 550018)

(2 Key Laboratory of FAST, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100101)

(3 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(4 Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

ABSTRACT PSR J1906+0746 is a newly discovered double neutron star (DNS) with a spin period of 144 ms. It is a candidate of binary pulsars. In this work, based on the measured binary parameters of PSR J1906+0746, the relation between surface magnetic field strength and spin period of binary radio pulsar is studied. This makes us understand a rough evolutionary path of PSR J1906+0746. Then, we assumed a non-recycle companion formed by electron capture according to the formation mechanism of DNS and the loss of matter during the formation of binary stars. Further calculation shows that the progenitor mass of the companion is about $1.57 M_{\odot}$, and it has lost $0.23 M_{\odot}$ during the formation of the DNS system. This may be caused by that the electron capture energy is so low that it can not compete with the gravitational binding energy of the progenitor, and eventually the ejecta is bound to form a ring. The ring surrounding the PSR J1906+0746 observed in the X-ray band is explained successfully.

Key words stars: neutron, pulsars: individual: PSR J1906+0746, ISM: general