

双中子星的星族合成研究

陈海亮^{1,2,3} 陈雪飞^{1,2,3} 韩占文^{1,2,3,†}

- (1 中国科学院云南天文台 昆明 650011)
(2 中国科学院天体结构与演化重点实验室 昆明 650011)
(3 中国科学院天文大科学研究中心 北京 100012)

2019-06-27 收到

† email: zhanwenhan@ynao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20190903

Population synthesis of double neutron stars

CHEN Hai-Liang^{1,2,3} CHEN Xue-Fei^{1,2,3} HAN Zhan-Wen^{1,2,3,†}

- (1 Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China)
(2 Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China)
(3 Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

摘要 双中子星是天体物理中重要的研究对象, 对于许多研究领域都有重要作用。2017年LIGO/Virgo发现第一个双中子星并合事件GW170817, 开启了用引力波探测发现双中子星的序幕。文章主要介绍了双中子星的双星演化通道, 以及双中子星星族合成的一些性质。此外, 还介绍了双星演化中的一些不确定性以及形成GW170817双中子星的双星演化通道。

关键词 双星, 星族合成, 双中子星, 引力波

Abstract Double neutron stars are important objects in astrophysics and very important for many scientific studies. In 2017, LIGO/Virgo first discovered gravitational waves from the double neutron star merger GW170817, indicating a new method of discovering these stars. In this paper we shall describe the isolated binary formation scenario of double neutron stars and the properties of their populations. In addition, we discuss the binary formation channel for the GW170817 merger and some uncertainties in binary evolution, which are important for the formation of binary neutron stars.

Keywords binary, population synthesis, double neutron stars, gravitational wave

1 双中子星的观测特征

双中子星是现代天文学的重要研究对象。它对天文学的许多分支领域都非常重要, 如射电脉冲星^[1]、引力波^[2, 3]、大质量双星演化^[4]、超新星^[5-7]等。同时, 双中子星在一些物理学研究中也具有重要意义, 如一些双中子星是很好的检验引力理论^[8, 9]的工具, 双中子星可以用来限制高密度条件

下核物质的物态方程^[10]等。

到目前为止, 共有15颗双中子星被发现。在未来几年, 我们可以期待会有越来越多的双中子星被发现。即将在2020年运行的平方千米阵(Square Kilometre Array, SKA)将能发现大量的毫秒脉冲星(5—10倍), 双子星的数目预计为100个以上^[11]。我国500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope,

FAST)预计能发现大量的双中子星^[12]。2017年,美国激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO)和欧洲引力波天文台 Virgo 探测器联合观测首次探测到双中子星并合产生的引力波信号, GW170817, 提供了一种新的探测双中子星的手段^[13]。随着引力波探测器的持续运行, 通过引力波探测发现双中子星系统也将会越来越多。

表1给出了目前观测到的双中子星的性质, 包括两子星各自的性质和轨道参数。从这个表格可以看到, 相对于年轻中子星, 年老中子星的自转周期、自转周期导数和磁场明显偏低, 中子星质量较高。这与双中子星的形成过程密切相关(见第3节)。双中子星的轨道偏心率的范围为0.085—0.83, 这主要由年轻中子星形成时的踢出速度(kick velocity)决定。在双中子星中, 通常情况下, 只有年老的中子星能够被观测到。这是因为年老中子星磁场显著偏低, 转动动能损失速率降低, 它的射电脉冲可以在更长的时标内被观测到。

2 中子星的形成

依据恒星演化理论, 质量在 $\sim 8\text{--}25M_{\odot}$ 的主序星最终可以通过超新星爆炸产生中子星。不同类型超新星爆炸形成的中子星的质量和踢出速度不同。电子俘获型超新星(恒星的初始质量范围为 $\sim 8\text{--}10M_{\odot}$)产生的中子星质量较小($\sim 1.27M_{\odot}$), 踢出速度较小^[15, 16]。铁核塌缩型超新星产生(对应的恒星质量范围为 $\sim 10\text{--}25M_{\odot}$)的中子星质量约为 $1.35M_{\odot}$, 踢出速度通常较大, 但可能依赖于超新星爆炸之前恒星的结构^[17]。值得注意的是, 这里提到的不同类型超新星发生对应的恒星质量范围通常依赖于金属丰度, 以及恒星是否处于双星中。

双星中还存在另外一种中子星形成通道, 即在一颗氧氦白矮星从伴星吸积物质, 达到钱德拉塞卡质量极限, 塌缩形成一个中子星^[18]。通常人们认为, 通过这种途径形成的中子星的踢出速度也比较小^[19]。

表1 目前观测到的双中子星的性质^[14]

年老中子星:	
自转周期	23—185 ms
自转周期导数	$(0.027\text{—}18)\times 10^{-18} \text{ s s}^{-1}$
偶极磁场的强度	$(0.29\text{—}18)\times 10^9 \text{ G}$
中子星的质量	$1.32\text{—}1.56M_{\odot}$
年轻中子星:	
自转周期	144—2773 ms
自转周期导数	$(0.89\text{—}20)\times 10^{-15} \text{ s s}^{-1}$
偶极磁场的强度	$(2.7\text{—}5.3)\times 10^{11} \text{ G}$
中子星的质量	$1.17\text{—}1.39M_{\odot}$
轨道参数:	
轨道周期	0.10—45 days
偏心率	0.085—0.83
并合时标	86 Myr $\rightarrow \infty$
双星系统的速度	25—240 km/s

3 双中子星的形成

在第2节, 我们介绍了单个中子星的形成途径。对于双中子星的形成, 通常需要经历两次超新星爆发, 双星有可能在超新星爆发过程中瓦解。因此, 双中子星的形成条件比较苛刻, 诞生率很低。

目前, 天文学上双中子星的形成途径主要有两种: ①通过大质量双星演化形成^[20, 21]; ②在球状星团(中心恒星比较密集)中, 通过动力学相互作用形成^[22]。通常, 第一种形成途径产生的双中子星的并合率相对于第二种形成途径要高2—3个量级。因而, 在这里我们主要介绍第一种形成途径。

图1展示一个大质量双星演化形成双中子星的例子。该双星最初由两颗O、B型主序星组成。演化过程大致分为两步:

(1)质量较大的恒星(主星)演化较快, 膨胀并充满临界等势面, 发生稳定的物质转移。当这颗星丢失几乎所有的氢壳层后, 物质转移结束, 它演化成一个氦星。氦星继续演化, 最终发生超新星爆炸, 留下一个中子星。超新星爆炸过程中有

大量的物质抛射，中子星产生时通常会有一个踢出速度。这些因素有可能导致双星系统瓦解。如果双星没有被瓦解，该双星系统随后会演化成为一个高质量X射线双星，但在此之前，该双星有可能以一个射电脉冲星围绕OB型星绕转的形式被探测到。

(2)原来质量较小的恒星(伴星)演化膨胀，充满临界等势面，发生物质转移。由于此时双星质量比(伴星/主星)通常比较大，物质转移是动力学不稳定的，双星进入公共包层演化阶段。在此阶段，中子星迅速旋入伴星内部，与伴星包层之间的摩擦会使得双星的轨道间距迅速变小，时标约为1000年。如果双星的轨道能足够大，公共包层最终将会被抛掉，形成一个中子星+氦星的双星。氦星继续演化，充满临界等势面，发生物质转移；中子星从伴星吸积物质，磁场变小，自转变快(再循环)。最终，伴星在发生超新星爆炸时，原来的氦壳层可能已经被大量剥离。因此被称为极度剥离超新星(ultra-stripped supernova)。如果双星在这次超新星爆发时没有被瓦解(取决于双星的周期和中子星诞生时的踢出速度)，就会留下一个双中子星。如果双中子星的周期比较小，两子星会因为引力波辐射而并合，产生高频的引力波信号，对应的电磁对应体可能是短时标伽马暴。双中子星并合后的天体可能是黑洞，也可能是中子星，由中子星的物态方程决定。

4 双中子星形成中的不确定性

在上一节中，我们详细介绍了大质量双星演化形成双中子星的过程。在这一过程中，实际上还存在着很多不确定性。这些不确定性一方面来自双星演化，如物质转移的稳定性、公共包层演化、星风、物质转移效率等；另一方面来自超新星爆发，如中子星形成时的踢出速度。在这一节，我们主要就双星的公共包层演化和中子星的踢出速度方面的不确定性做一个十分简要的概述。

(1)公共包层演化

公共包层演化是双星演化中最不确定的演化

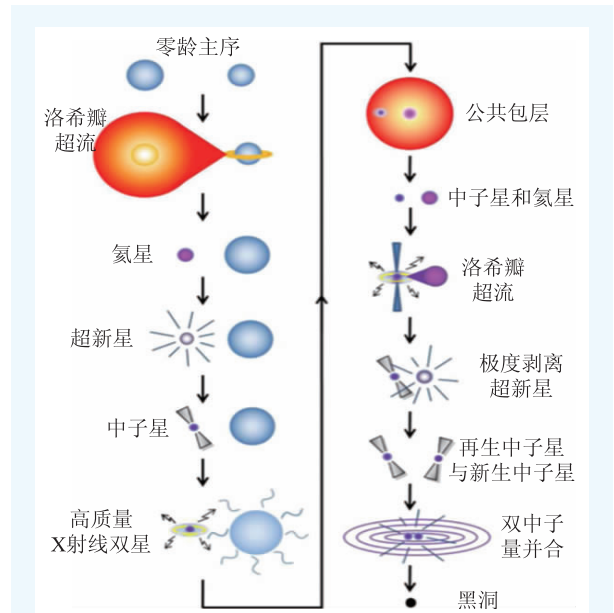


图1 双中子星系统的形成通道^[14]

过程之一，它对双星演化有着十分重要的影响。这个阶段的演化的不确定性主要表现在两个方面：①双星进入公共包层的判据(动力学不稳定性物质转移的判据)；②双星在公共包层中的演化。

通常认为，如果双星的质量比(物质损失星/吸积星)大于一个临界的质量比时，双星的物质转移是动力学不稳定的，双星将进入公共包层演化阶段。更准确地说，如果损失物质的恒星的绝热质量半径指数小于洛希瓣的质量半径指数，物质转移是动力学不稳定的。但是绝热质量半径指数的计算通常是比较复杂的，目前仍然不能给出很好的结果。值得一提的是，Ge等(2010, 2015)^[23, 24]建立了绝热物质损失模型，给出了恒星的绝热质量半径指数和双星发生不稳定物质交换的临界质量比。

在公共包层演化阶段，系统的轨道能被用来抛射包层。依据能量守恒，我们可以得到^[25, 26]：

$$\alpha_{ce} \left(\frac{Gm_{d,f}m_a}{2a_f} - \frac{Gm_{d,i}m_a}{2a_i} \right) = \frac{Gm_{d,i}m_{d,e}}{\lambda R_{d,r}}$$

其中， $m_{d,i}$ ， $m_{d,f}$ 分别是伴星进入公共包层之前和之后的质量； m_a 是吸积星的质量； $m_{d,e}$ 是伴星包层的质量； $R_{d,r}$ 是伴星的半径； a_i ， a_f 分别是双星在公共包层之前和公共包层之后的间距； λ 是表征伴

星包层结合能的参数； α_{cc} 表征的是用于抛射公共包层的轨道能的比例。 λ 是可以依据恒星的结构计算得到，然而 α_{cc} 通常是非常不确定的，现在的理论和观测都不能给出很好的取值和计算。从物理上讲， α_{cc} 应该是依赖双星参数的，但这种依赖关系非常不清晰。更多的关于公共包层演化的讨论可以参考综述文章^[27]。

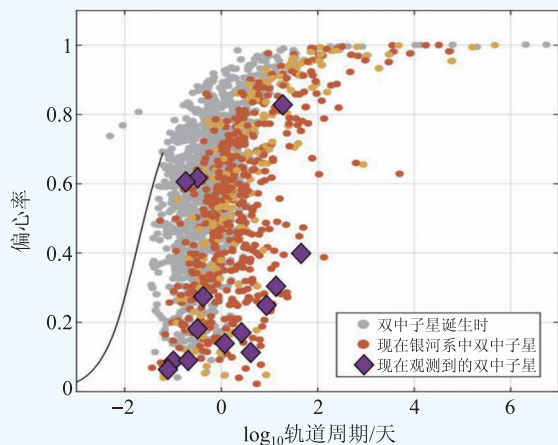


图2 银河系中双中子星的周期—轨道偏心率的分布。灰色的点代表的是银河系中双中子星诞生时的分布；有颜色的圆点代表的是现在银河系中双中子星的分布；紫色代表的是现在观测到的双中子星的数据。其中的实线代表的是一个典型的双中子星系统(两个中子星的质量都为 $1.2M_{\odot}$ ，轨道周期1.5小时，偏心率0.69)从诞生到并合的演化轨迹^[32]

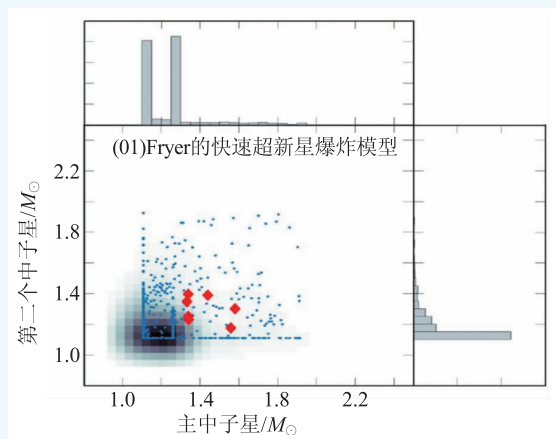


图3 双中子星的质量分布。图中蓝色的点代表的是双中子星诞生时的质量分布；红色的点代表的是观测中质量相对较好确定的双中子星；图中的灰度图代表的是现在银河系中双中子星的质量概率分布；两个直方图分别代表的是两个中子星的质量分布^[32]

(2)中子星的踢出速度

通过对一些年轻的、孤立毫秒脉冲星观测发现，它们的平均踢出速度为400—500 km/s^[17]。另一方面，双中子星的观测发现，一些双中子星的轨道偏心率很小，表明一些中子星诞生时的踢出速度很小^[28]。中子星诞生时的踢出速度的产生机制目前研究还不是很清楚。通常认为有两种可能的机制：①前身星结构中的一些不稳定性导致超新星爆炸是非球对称的，进一步导致物质抛射是非对称的。依据角动量守恒，中子星在产生的时候会有一个速度^[29, 30]。②在核塌缩过程中，原型中子星有很强的磁场，磁场可以改变中微子的不透明度，从而使得中微子辐射是非球对称的，进而导致中子星踢出速度的产生^[31]。

5 双中子星的星族合成

理论上，为了研究某类天体(如双中子星)在银河系或其他星系环境下的一些统计性质，如它们的形成和并合概率、空间分布、质量分布、轨道周期分布等，我们一般需要通过双星星族合成。它是研究双星群体演化的一种方法，一般分为三步：①通过双星的初始参数分布，包括恒星形成历史、初始质量函数、质量比分布、初始轨道间距分布，得到初始双星族；②根据双星演化的一般规律对双星族中的样本同时演化，在这一过程中，需要根据所关注的某类天体的形成图像(如第3节所述的双中子星形成图像)在相应的演化阶段记录这类天体的关键参数；③通过观测定标或归一化得到银河系或其他环境下某类天体的形成率和一些物理量的特征分布，并通过与观测对比，解释和预言观测。

双星星族合成方法得到的双中子星形成和并合的概率对双星初始参数、双星演化过程中基本问题的处理方式、中子星的形成条件、中子星诞生时的踢出速度等都会有所依赖。通过对比双中子星观测和双星星族合成研究结果，可以对一些不确定性给出一定的限制。

目前，该研究领域有大量双星星族合成研究

的工作。根据这些研究结果，银河系中的双中子星的形成率大约为5—30个/Myr。图2—4分别展示了Vigna-Gómez等人2018年双星星族合成研究给出的银河系双中子星周期—偏心率分布和中子星质量分布，以及和观测的对比结果。我们可以看到，双中子星的周期范围为0.01—100天，中子星的质量主要分布在1.1—1.4 M_{\odot} 。

如前所述，双中子星并合会产生高频引力波信号。这已经被LIGO/Virgo观测到，并有望在未来的引力波探测中被大量观测到。双星星族合成研究显示，银河系中双中子星的并合率大约为7.0—21.0/Myr。双中子星典型的形成时标为20—30 Myr；并合时间(从双中子星诞生到并合所经历的时间)的时间范围为1000 yr—13.7 Gyr。延迟时间(从零龄主序双星到双中子星并合的时间)范围也较广，从10 Myr—13.7 Gyr。这些并合双中子星的质量比大约为0.9—1.0(图5)。

6 GW170817的形成

除了得到双中子星的统计性质，通过双星星族合成方法，我们还可以追踪每一个双中子星的形成过程。因此，如果知道了某一颗双中子星的一些基本参数，我们就可以知道它的形成过程。GW170817是人们通过引力波探测到的第一例双中子星并合的事件，它的两颗中子星的质量范围分别为1.36—2.26 M_{\odot} 和0.86—1.36 M_{\odot} ^[33]。其寄主星系是一个质量为(0.3—1.20) × 10¹¹ M_{\odot} 的椭圆星系。该星系的平均恒星年龄大于3 Gyr，金属丰度为0.20 Z_{\odot} — Z_{\odot} (Z_{\odot} 为太阳金属丰度)^[34]。

图6中给出了一个类GW170817双中子星并合系统的演化通道。这个初始双星系统的基本参数为主星9.76 M_{\odot} ，伴星8.05 M_{\odot} ，

轨道间距378 R_{\odot} ，偏心率为0.10。①主星演化到赫氏空隙，发生稳定的物质转移，丢失氢壳层后演化成为一个2.2 M_{\odot} 的氦星；伴星由于吸积物质演化成为一个15.5 M_{\odot} 的主序星。氦星继续演化发生电子俘获型超新星爆炸，形成一个1.26 M_{\odot} 的中子星。②伴星(此时为15.5 M_{\odot})演化到热脉动渐近巨星支阶段，发生动力学不稳定的物质转移，双星进入公共包层演化阶段；原来的中子星吸积质量增加到1.31 M_{\odot} 。③双星通过损失轨道能将公共包层抛射，形成一个中子星+5.2 M_{\odot} 氦星的双星。氦星继续演化发生核塌缩超新星爆炸，形成一个1.39 M_{\odot} 的新中子星，双星间距为33 R_{\odot} 。④这个双中子星由于引力波辐射，轨道间距会逐渐变小，最终发生并合产生短伽马暴/千新星。

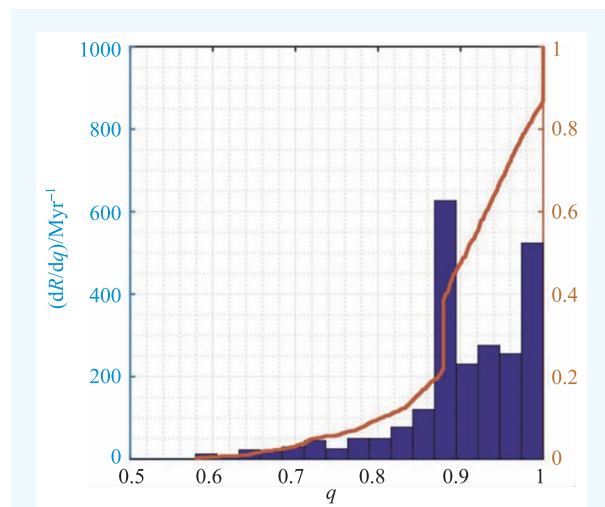


图4 银河系中并合的双中子星的质量比分布以及累计分布函数^[32]

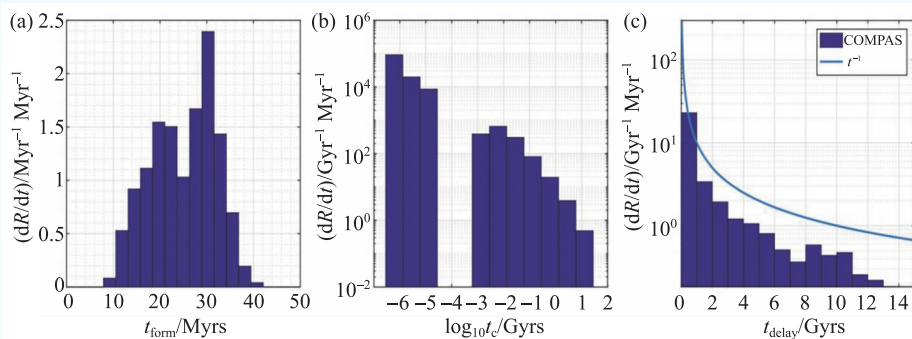
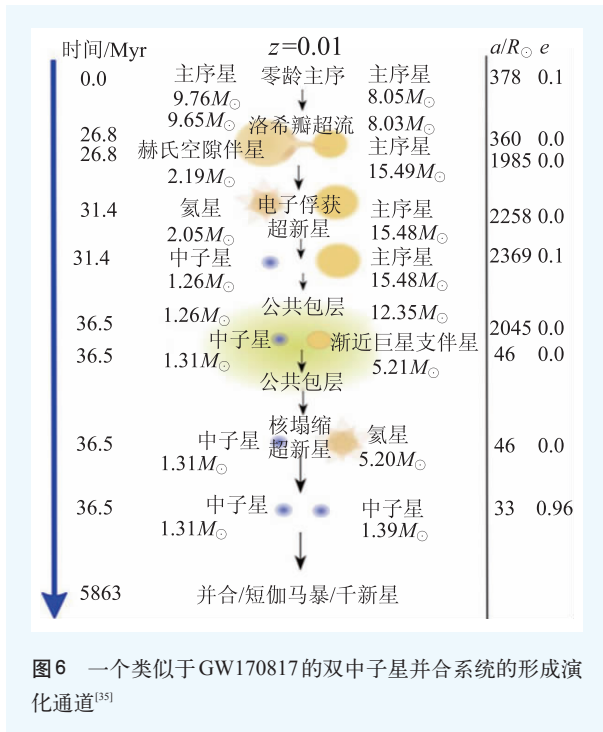


图5 双中子星系统的形成时间分布(a)、并合时间(从双中子星诞生到并合的时间)分布(b)，以及总的延迟时间(从零龄主序双星到双中子星并合的时间)分布(c)。(c)中的实线表示的是 $dR/dt \propto t_{\text{delay}}^{-1}$ 的曲线^[32]



7 总结和展望

双中子星对于大质量双星演化是十分重要的，能给大质量恒星演化和双星演化中的不确定性提供重要限制，从而加深我们对双星演化和大质量恒星演化的理解和认识。在未来几年，随着越来越多的引力波探测器以及射电望远镜投入使用，可以期待会有越来越多的双中子星被发现，这将推动相关领域的发展。在本文中，我们首先总结了目前已经观测到的双中子星的特征。然后讨论了双中子星系统形成的双星演化通道，以及双星星族合成给出的一些双中子星星族的性质；还讨论了影响双中子星形成过程的一些不确定性。最后给出了形成双中子星并合系统GW170817的详细的双星演化通道。

参考文献

- [1] Bhattacharya D, van den Heuvel E P J. *PhR*, 1991, 203: 1
- [2] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D *et al.* *PhRvL*, 2016, 116: 241103
- [3] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D *et al.* *PhRvL*, 2016, 116: 061102
- [4] Langer N. *ARA&A*, 2012, 50: 107
- [5] Whelan J, Iben I Jr. *ApJ*, 1973, 186: 1007
- [6] Iben I Jr, Tutukov A V. *ApJS*, 1984, 54: 335
- [7] Yoon S, Woosley S E, Langer N. *ApJ*, 2010, 725: 940
- [8] Damour T, Taylor J H. *PhRvD*, 1992, 45: 1840
- [9] Stairs I H. *LRR*, 2003, 6: 5
- [10] Lattimer J M, Prakash M. *PhR*, 2007, 442: 109
- [11] Keane E, Bhattacharyya B, Kramer M *et al.* A cosmic census of radio pulsars with the SKA. in *Proc. of Advancing Astrophysics with Square Kilometre Array (AASKA14)* (Trieste: SISSA), 2015, 40
- [12] Smits R, Lorimer D R, Kramer M *et al.* *A&A*, 2009, 505: 919
- [13] Abadie J, Abbott B P, Abbott R *et al.* *CQGra*, 2010, 27: 173001
- [14] Tauris T M, Kramer M, Freire P C C *et al.* *ApJ*, 2017, 846: 170
- [15] Podsiadlowski P, Langer N, Poelarends A J T *et al.* *ApJ*, 2004, 612: 1044
- [16] Gessner A, Janka H T. *ApJ*, 2018, 865: 61
- [17] Hobbs G, Lorimer D R, Lyne A G *et al.* *MNRAS*, 2005, 360: 974
- [18] Miyaji S, Nomoto K, Yokoi K *et al.* *PASJ*, 1980, 32: 303
- [19] Freire P C C, Tauris T M. *MNRAS*, 2014, 438: L86
- [20] Tutukov A V, Yungelson L R. *MNRAS*, 1993, 260: 675
- [21] Lipunov V M, Postnov K A, Prokhorov M E. *Astron. Lett.*, 1997, 23: 492
- [22] Portegies Zwart S F, Baumgardt H, Hut P *et al.* *Nature*, 2004, 428: 724
- [23] Ge H, Hjellming M S, Webbink R F *et al.* *ApJ*, 2010, 717: 724
- [24] Ge H, Webbink R F, Chen X *et al.* *ApJ*, 2015, 812: 40
- [25] Webbink R F. *ApJ*, 1984, 277: 355
- [26] de Kool M. *ApJ*, 1990, 358: 189
- [27] Ivanova N, Justham S, Chen X *et al.* *A&ARv*, 2013, 21: 59
- [28] Dewi J D M, Podsiadlowski P, Pols O R. *MNRAS*, 2005, 363: L71
- [29] Herant M *et al.* *ApJ*, 1994, 435: 339
- [30] Burrows A, Hayes J, Fryxell B A. *ApJ*, 1995, 450: 830
- [31] Chugai N N. *Sov. Astron. Lett.*, 1984, 10: 87
- [32] Vigna-Gómez A, Neijssel C J, Stevenson S *et al.* *MNRAS*, 2018, 481: 4009
- [33] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D *et al.* *PhRvL*, 2017, 119: 161101
- [34] Im M, Yoon Y, Lee S K J *et al.* *ApJL*, 2017, 849: L16
- [35] Belczynski K *et al.* *A&A*, 2018, 615: 91