

中子星研究的过往今来*

俞云伟[†]

(华中师范大学天体物理研究所 武汉 430079)

2021-05-24收到

[†] email: yuyw@mail.ccnu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210602

The past and present of neutron star research

YU Yun-Wei[†]

(Institute of Astrophysics, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

摘要 中子星概念的形成既是人们对物质基本结构认识的一个自然推论,同时也是理解恒星演化的一个必然环节。自1967年通过发现射电脉冲星证实了中子星的存在以来,基于半个多世纪的多波段、多信使观测,人们已经发现了数以千记的多种类型中子星,了解了单个中子星的电磁辐射机制、中子星双星系统的相互作用以及双中子星系统的引力波辐射等等,并在多个方面为中子星的内部物质组分及其状态这一核心科学问题做出了观测限制。

关键词 中子星, 恒星演化, 脉冲星

Abstract The concept of neutron stars (NSs) comes as a natural inference from our understanding of the fundamental structure of matter, and is an indispensable part of stellar evolution theory. Since the discovery of pulsars in 1967 that confirmed the existence of NSs, people have observed thousands of NSs of various types, and from multi-wavelength and multi-messenger observations have probed their electromagnetic radiation mechanism, the interaction between NSs and their binary companions, the gravitational wave radiation from double NSs, and so forth. The mysterious internal constituents of NSs and their equation of state, the most fundamental problems in NS research, have also been constrained observationally through several different methods.

Keywords neutron star, stellar evolution, pulsar

1 中子星概念的形成背景

对于恒星乃至几乎所有天体而言,它们的一生始终是一部与万有引力相爱相杀的历史。从恒星诞生于星云、维持于主序核燃烧、灭亡于引力坍缩、归寂于致密天体,概莫如此。引力主宰着宇宙中所有亮暗物质的流动,而运动所导致的离心效应则是物质抵抗引力的天然法宝,这种运动既指宏观亦指微观。微观的无规运动在宏观上即表现为气体的压强。当一团足够巨大的星云在引力的作用下开始坍缩、分裂,分裂、坍缩,引力

势能的释放将不断加速气体分子的无规运动,使其内能增加,逐渐导致温度升高、压强变大、坍缩减缓。在温度达到一定临界条件时,坍缩气体的核燃烧将被最终点燃,其导致的巨大压强将使引力坍缩完全停止,恒星得以形成^[1, 2]。此后,通过源源不断的热核聚变,恒星将长久地维持于高温的状态以保证其与引力达到平衡的气体压强。然而,伴随着不可逆的核聚变在亿万年后走向终结,恒星核心的气体压强最终将无以为继,它儿时的引力坍缩噩梦再次降临。随着恒星核心的引力坍缩,其半径将不断缩小,而物质的密度将不断增大。那么,这个过程的终点将在哪里呢?

* 国家SKA专项(批准号:2020SKA0120300),国家自然科学基金(批准号:11822302,11833003)资助项目

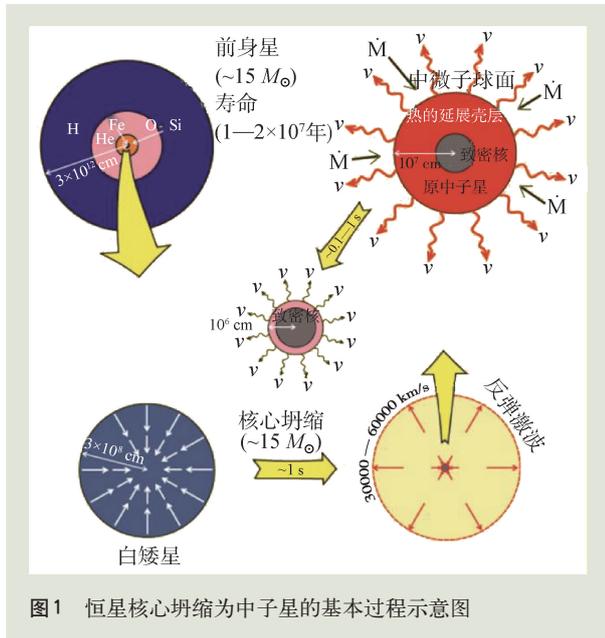


图1 恒星核心坍缩为中子星的基本过程示意图

1844年, F. Bessel发现天狼星的伴星是一颗具有太阳质量但很难被观测到的奇特天体^[3]。数十年后,人们发现这个被称作“小狼”的天体具有天狼星千分之一的光度和大概两万开尔文的温度,据此它被定性为一颗白矮星。基于“小狼”的质量、光度和温度,我们容易发现白矮星的半径大概与地球相当,但其密度高达 $\sim 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,是一种前所未有的物质状态。1926年,基于E. Fermi和P. Dirac所发现的费米子量子统计规律, R. Fowler提出在白矮星密度下,从原子中电离出来的大量自由电子将能够形成非常强大的简并压,远高于白矮星温度下的热压强^[4]。这个理论可以很好地解释具有强大引力场的白矮星为什么能够稳定存在。同时也使人们认识到,恒星核心的坍缩必将经历电子简并压的快速增长,从而可能阻碍坍缩过程的进一步发生,使其止步于一颗稳定白矮星的形成。换言之,观测到的白矮星正是恒星核心坍缩的一种自然产物。不同于普通的恒星,白矮星的支撑压取决于它的密度而非温度,因而其存在不再依赖于额外的能源供给。这个结局无疑使得恒星演化理论变得完整而美妙。然而, S. Chandrasekhar却意识到,随着密度的增大,电子气的费米能将很容易达到甚至超过它的静能量从而成为相对论性气体。在此情况下,电子简并压随密度增长的趋势将变得十分疲软,将

无力支撑相应密度下的引力,其结果是白矮星的质量将存在上限,即钱德拉塞卡(Chandrasekhar)极限($1.44 M_{\odot}$)^[5, 6]。这一推论使得那些具有较大质量的恒星死后无所归处,引发了恒星演化理论的一次危机。

1932年, J. Chadwick用阿尔法粒子(氦原子核)轰击铍,再用铍所产生的射线轰击氢、氮,首次发现了中子,进而使人们认识到原子核由中子和质子所组成^[7, 8]。恰在这一重大发现之前, L. Landau提出过一个设想,他认为比白矮星更致密的天体可能就像是一个巨大的原子核,其基本组成单元就是这种亚于原子核的未知粒子^[9]。这一设想被认为是中子星概念原型的最早出处。随着中子的发现, W. Baade和F. Zwicky在1934年研究超新星现象的论文中首次明确提出了中子星这个名词,并正确地指出超新星现象应起源于大质量恒星向中子星转化的过程(图1),该过程中释放出来的巨大引力势能正是超新星爆发的能量来源^[10]。1939年, R. C. Tolman、J. R. Oppenheimer和G. M. Volkoff在广义相对论框架下,基于理想中子气简并压和引力的平衡建立了第一个定量的中子星模型(TOV方程)^[11, 12],得到了中子星内部的物质分布情况以及它的质量和半径大小。此外,从观测角度考虑,人们也非常关心中子星表面的热辐射性质。通过研究它们的冷却机制和过程,人们发现中子星表面的温度将在百万年内主要维持在数十万到百万开尔文的量级^[13],因而其热辐射将出现在X射线能段。然而,由于中子星的半径只有十几公里,以当时的技术是完全不可观测的,因此人们也就很快对这种奇特天体失去了研究的兴趣。

2 中子星的多波段多信使发现

第二次世界大战后,受益于成熟的雷达技术,国际射电天文学迅速发展并在1960年代迎来了高潮。1967年, A. Hewish和他的研究生J. Bell发现了一种具有准确周期性的射电脉冲信号^[14]。经过分析,人们认为这种周期性信号很可能来自于一种旋转天体的辐射(类似于灯塔的效应),并

将这种天体命名为脉冲星。更具体来看，只有当脉冲星具有像中子星那样的质量、体积和密度时，才能够成功解释观测到的射电脉冲辐射强度和发生频率。同年，在不知道发现脉冲星的情况下，F. Pacini 指出，如果中子星具有很强的磁场并能够快速旋转的话，那么它们就可能发出低频的电磁波辐射，从而造成某种观测效应^[15]。因此，人们认为射电脉冲星辐射的能量应主要来自于中子星的旋转能。其实在发现脉冲星之前两年，A. Hewish 和 S. Okoye 还曾在蟹状星云中发现过一个具有高亮温度的奇特射电源^[16]，后来便知道该射电源正是位于该星云中间的一颗中子星。蟹状星云和它中心的这颗中子星一起，是我国宋史中所记载的发生于 1054 年(宋至和元年)的壮观超新星爆发事件的遗物。无论如何，脉冲星的发现终于使中子星从一个理论猜想变成了一个可被实际观测的真实天体，无疑称得上是天文学史上的一个里程碑。脉冲星的发现者 A. Hewish 也因此被授予了 1974 年的诺贝尔物理学奖。这一重大发现重新激发了人们对于中子星的研究热情。在观测方面，脉冲漂移、脉冲缺失、周期跃变等越来越多的辐射特征被不断地揭示，其中还包括一些脉冲极度缺失的旋转射电暂现源。人们甚至认为，当前炙手可热的快速射电暴现象也很可能和中子星的射电辐射存在密切联系。在理论方面，天体物理学家们在上个世纪就已迅速建立起一整套描述射电脉冲星辐射机制的电动力学理论体系^[17-19]。一般认为，中子星应具有以偶极为主的强磁场结构，如图 2 所示。在星体周围充斥着与星体共转的高度电离的等离子体，称为磁层，这里是各种脉冲辐射的产生之所。不过，当前的一些观测也表明，多极场结构有时候会变得非常显著，可以使其辐射性质更为丰富。

1960 年代同样也是 X 射线天文学的开启年代，以 1962 年 R. Giacconi 发现第一个宇宙 X 射线源 Scorpius X-1 为标志^[20]。当时，便有人试图将此 X 射线源和中子星的热辐射相联系，这在一定程度上为理解 1967 年发现的射电脉冲星创造了理论预热的机会。而在 1967 年之后，中子星研究也就

顺理成章地在 X 射线波段发展起来，使射电波段的孤立星研究扩展到 X 射线波段的双星系统。首先，通过检查 Scorpius X-1 的 X 射线和光学观测结果，I. Shklovsky 提出这些辐射应来自于处于吸积状态的中子星^[21]。其后，R. Giacconi 等人成功从 X 射线源 Centaurus X-3 中发现了一个周期为 4.8 s 的脉冲信号^[22]，并指出这种 X 射线脉冲辐射是由于中子星从伴星或星际介质中吸积物质到星体表面上所导致的(图 3)。在这种情况下，脉冲辐射的能量来源是吸积物质的引力势能而非中子星的旋转能。1975 年，J. Grindlay 和 J. Heise 更是从中子星 X 射线源中发现了两次短暂的 X 射线爆发(流量

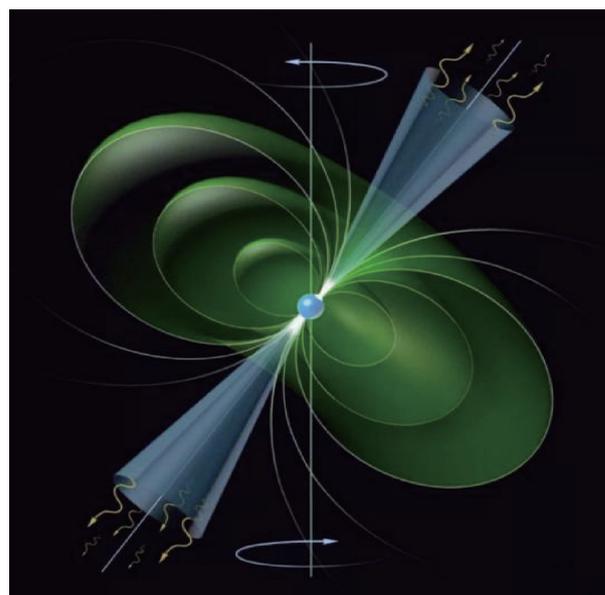


图 2 脉冲星磁场结构和射电脉冲辐射示意图

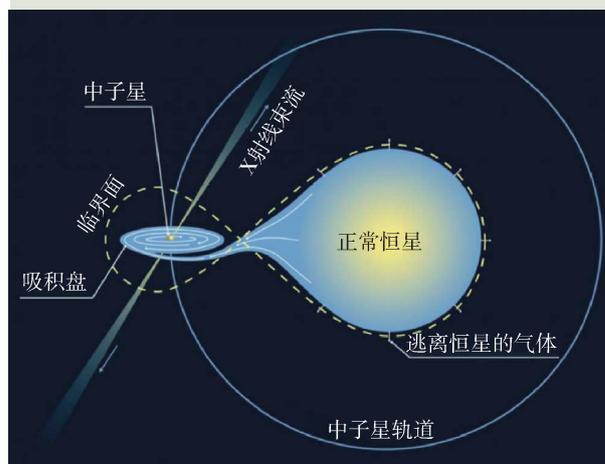


图 3 中子星吸积伴星物质产生 X 射线辐射的示意图

增加10左右)^[23]。这些发现使人们对中子星双星系统产生了浓厚的兴趣。1982年, D. Backer等人发现了第一颗毫秒脉冲星^[24], 每秒钟可转642次, 被认为正是在双星系统中吸积加速的结果。与此同时, 这种极快的旋转状态对脉冲星的质量和半径给出了极为严格的限制, 进一步强化了脉冲星的中子星属性。值得注意的是, X射线脉冲星并不总是处于双星系统中, 有时候也可以是孤立的, 并具有旋转驱动和吸积驱动所不能解释的辐射光度。1992年, R. Duncan和C. Thompson最早在理论上研究了一类具有超朗道临界磁场的特殊中子星(称为磁陀星)^[25, 26], 可以为这些反常的X射线脉冲星以及其他一些软伽马射线重复暴现象提供很好的解释。在这些现象中, 星体的辐射主要由磁能耗散驱动, 而高度扭曲的强磁场所引发的一些不稳定性也将自然导致X射线暴等剧烈活动的频繁发生。

针对中子星的X射线观测还进一步揭示, 中



图4 蟹状星云脉冲星的星风云辐射(X射线波段)

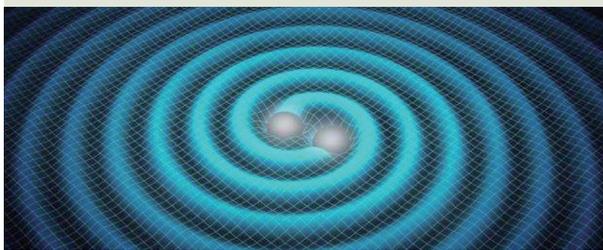


图5 双中子星绕转产生引力波辐射的示意图

子星对外的能量输出实际上不仅仅只通过磁层的脉冲辐射, 实际上这可能只占中子星全部能量输出的一小部分。从整体上看, 中子星的旋转能将主要通过以低频电磁波和等离子体(常以正负电子对为主)相耦合的坡印亭外流形式输出, 并将在远大于中子星半径的尺度上逐渐转化为相对论性的中子星星风。在该星风的演变和最终击打到外围超新星抛射物的过程中, 将可能产生明亮的脉冲星风云辐射。不妨让我们再次凝视蟹状星云, 可以看到, 在它的中间脉冲星风云的辐射正在X射线望远镜的镜头下熠熠生辉、璀璨夺目(图4)。不过, 要在理论上精确重现坡印亭能流转化为相对论性星风的具体过程并不是一件容易的事情。一般相信, 大尺度磁场的重联一定在其中扮演了重要的角色^[27]。

再来看处于双星系统中的中子星, 它们实际上也不一定总是会处于吸积的状态, 很多时候也可能只是在做简单的轨道运动, 观测表现为脉冲星的脉冲到达时间具有明显的轨道调制。此时, 如果中子星和主序伴星的星风都很强烈的话, 星风之间的相互作用就有可能造成可被观测的辐射信号。近年来, Fermi伽马射线望远镜所看到的不少伽马射线源便有可能属于这种星风相互作用系统^[28]。在某些情况下, 中子星的星风甚至还可能深度剥离主序伴星的包层物质乃至完全摧毁主序伴星, 使其最终仅剩下一颗加速后的孤立毫秒脉冲星。更使人感兴趣的是, 中子星双星系统进一步演化的结果还有可能导致双中子星系统的形成。1974年, J. Taylor和R. Hulse发现了第一个双中子星系统PSR B1913+16, 其中一颗可以观测到脉冲辐射^[29]。利用它的周期性信号, 可以很好地限制两颗致密星绕质心公转的轨道参数。2003年, M. Burgay还首次发现了第一对双脉冲星系统PSR J0737-3039, 从而可以更加精确地测定双星参数和更好地检验广义相对论效应^[30]。

根据广义相对论, 两个天体的相互绕转可以导致引力波辐射, 辐射的强度高度依赖于系统的致密性。因此, 双中子星系统被认为是宇宙中最理想的引力波辐射源之一(图5)。引力波辐射的能

了下限。更重要的是,基于最新实现的引力波探测,如果能够准确判定双中子星并合产物的属性,那将为我们提供中子星极限质量更严厉的上限或下限。与此同时,通过拟合引力波波形的星体形变量也成为近年限制中子星物态的一种全新的有效方法^[43]。此外,发生在中子星表面的一些热核暴或磁暴现象也是人们限制星体质量和半径的一条重要途径。搭载于国际空间站的中子星内部组成探测器(NICER)正通过观测中子星的X射线热斑辐射试图同时测定它们的质量和半径,并已得到一些很好的结果,如发现PSR J0030拥有约(1.3—1.4) M_{\odot} 的质量和约13 km的半径^[44]。除了它们的结构参数外,中子星的旋转和冷却性质也与其内在的物质组分存在着紧密的联系,因而也是天文观测的重点。2007年,Rossi X射线时变探测器(RXTE)通过观测X射线暂现源XTE J1739-285的热核暴发现了1122 Hz的振荡频率,预示着其中存在着一颗迄今已知转得最快的中子星^[45]。这对星体物质的粘滞性提出了非常高的要求,以能够抑制这种情况下的各种流体力学不稳定性。2010年,通过分析Chandra望远镜过去十年所积累的Cassiopeia A脉冲星的X射线辐射数据,人们发现其冷却速度远远超过了通常中微子辐射主导下的冷却速度。这在一定程度上表明该中子星可能正在经历从中子物质正常态向超流态的相变过程^[46]。可以看到,随着天文观测能力的不断提升,人们总是可以从新的视角来审视中子星,不断地对中子星的物理属性做出更全面的检验。

近二十年来,随着时域天文研究的不断发展,人们对超新星和伽马射线暴等恒星爆发现象也有了越来越丰富的认识。1998年,戴子高和陆埏提出,一部分伽马射线暴的残留中心致密天体可能正是一颗处于极限旋转状态的磁陀星(即毫秒磁陀星)^[47, 48],其理论预言受到了数年后Swift卫星观测结果的强力支持^[49],从而使中子星研究在暂现源现象中大放异彩。近年来发现的一类极为明亮的超亮超新星便是一个重要的例证^[50],它们的光度演化常常可以与毫秒磁陀星的自转能损相

一致,却很难由传统的镍56衰变理论解释。更为重要的是,戴子高等人还在2006年提出,双中子星并合后的产物可能仍然是一颗大质量的中子星^[51],这一观点对于理解短伽马射线暴的诸多观测特征具有重要帮助。尤其是通过分析GW170817引力波事件中的千新星辐射,俞云伟等提出该事件的并合产物很可能是一颗大质量中子星^[52]。如果事实确实如此,那就意味着中子星的极限质量可以高达 $2.5 M_{\odot}$ 以上,这将对中子星的物态和起源提供极为强烈的限制。由此可见,双中子星并合产物的属性无疑将是未来引力波探测和多信使天文学研究有待解决的一个重大问题。双中子星并合产物可能是大质量中子星的设想同时也表明,宇宙中的中子星可能具有多种不同的起源^[53],不单单只来自于超新星爆发。不同起源的中子星甚至可能具有不同的物态(即有些星体可能处于亚稳态)。实际上,早在1976年R. Canal和E. Schatzman就曾指出,吸积白矮星在质量趋近于Chandrasekhar极限的时候,有可能经吸积诱导坍缩为一颗中子星^[54],而不一定如通常认为的总是导致Ia型超新星爆发。目前观测上也的确发现了不少起源未知的暂现源现象,为人们提供了不少遐想的空间。有鉴于此,我们有理由相信当前以及未来的暂现源观测能够为中子星研究打开一扇全新的窗口,对于了解中子星初生时期的状态具有至关重要的价值。

4 结束语

综上所述,中子星的研究既久远悠长,又生机盎然、热点纷呈,在它们的身上仍然存在着一系列的谜团有待探索,并为人们研究极端条件(高密度、强引力场、强电磁场)下的物理规律提供了天然的实验室。同时,现代天文观测技术的快速发展正逐渐使得这种探索达到一种前所未有的广度和深度,而其中我国自主研发的一些大科学装置也正逐渐发挥出特有的效力。2020年4月28日,我国的慧眼HXMT望远镜成功地从磁陀星SGR 1935+2154观测到了与快速射电暴FRB200428

成协的X射线暴^[55],为揭示快速射电暴现象的起源做出了关键贡献,也使人们对磁陀星的性质有了全新的认识。而就在本文完成之际,我国500m口径球面射电望远镜(FAST)也再次传来好消息,它通过开展银道面脉冲星巡天,新发现了212颗脉冲星,其中包括42颗毫秒脉冲星、16颗脉冲双星、一批最暗弱的脉冲星、一批模式变化和消零脉冲星,以及射电暂现源等^[56]。这些重大的发现无疑将为中子星研究带来新的高潮。

参考文献

- [1] Henyey L G, Lelevier R, Levée R D. *PASP*, 1955, 67: 154
- [2] Hayashi C. *PASJ*, 1961, 13: 450
- [3] Bessel F W. *MNRAS*, 1844, 6: 136
- [4] Fowler R H. *MNRAS*, 1926, 87: 114
- [5] Chandrasekhar S. *MNRAS*, 1931, 91: 456
- [6] Chandrasekhar S. *MNRAS*, 1935, 95: 207
- [7] Chadwick J. *Nature*, 1932, 129: 312
- [8] Chadwick J. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1932, 136: 692
- [9] Landau L. *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1932, 1: 285
- [10] Baade W, Zwicky F. *Proceedings of the National Academy of Science*, 1934, 20: 254
- [11] Tolman R C. *Physical Review*, 1939, 55: 364
- [12] Oppenheimer J R, Volkoff G M. *Physical Review*, 1939, 55: 374
- [13] Zwicky F. *Physical Review*, 1939, 55: 726
- [14] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H *et al.* *Nature*, 1968, 217: 709
- [15] Pacini F. *Nature*, 1968, 219: 145
- [16] Hewish A, Okoye S E. *Nature*, 1965, 207: 59
- [17] Goldreich P, Julian W H. *ApJ*, 1969, 157: 869
- [18] Ostriker J P, Gunn J E. *ApJ*, 1969, 157: 1395
- [19] Ruderman M. *ARA&A*, 1972, 10: 427
- [20] Giacconi R, Gursky H, Paolini F R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1962, 9: 439
- [21] Shklovsky I S. *ApJ*, 1967, 148: L1
- [22] Giacconi R, Gursky H, Kellogg E *et al.* *ApJ*, 1971, 167: L67
- [23] Grindlay J, Heise J. *IAU Circ.*, 1975, 2879
- [24] Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C *et al.* *Nature*, 1982, 300: 615
- [25] Duncan R C, Thompson C. *ApJ*, 1992, 392: L9
- [26] Thompson C, Duncan R C. *ApJ*, 1993, 408: 194
- [27] Drenkhahn G. *A&A*, 2002, 387: 714
- [28] Chen A M, Takata J, Yi S X *et al.* *A&A*, 2019, 627: A87
- [29] Taylor J H, Hulse R A, Margon B *et al.* *IAU Circ.*, 1974, 2704
- [30] Burgay M, D'Amico N, Possenti A *et al.* *Nature*, 2003, 426: 531
- [31] Taylor J H, Weisberg J M. *ApJ*, 1982, 253: 908
- [32] Taylor J H, Weisberg J M. *ApJ*, 1989, 345: 434
- [33] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 119: 161101
- [34] Gell-Mann M. *Physics Letters*, 1964, 8: 214
- [35] Zweig G. *An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and its Breaking*. 1964. CERN-TH-401
- [36] Witten E. *Phys. Rev. D*, 1984, 30: 272
- [37] Farhi E, Jaffe R L. *Phys. Rev. D*, 1984, 30: 2379
- [38] Alcock C, Farhi E, Olinto A. *ApJ*, 1986, 310: 261
- [39] Lai X Y, Xu R X. in *Journal of Physics Conference Series*, 2017, 861: 012027
- [40] Huang Y F, Yu Y B. *ApJ*, 2017, 848: 115
- [41] Haensel P, Potekhin A Y, Yakovlev D G. *Neutron Stars 1: Equation of State and Structure (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 326)*. New York: Springer, 2007
- [42] Cromartie H T, Fonseca E, Ransom S M *et al.* *Nature Astronomy*, 2020, 4: 72
- [43] Guerra Chaves A, Hinderer T. *Journal of Physics G Nuclear Physics*, 2019, 46: 123002
- [44] Miller M C, Lamb F K, Dittmann A J *et al.* *ApJ*, 2019, 887: L24
- [45] Kaaret P, Prieskorn Z, in't Zand J J M *et al.* *ApJ*, 2007, 657: L97
- [46] Shternin P S, Yakovlev D G, Heinke C O *et al.* *MNRAS*, 2011, 412: L108
- [47] Dai Z G, Lu T. *A&A*, 1998, 333: L87
- [48] Dai Z G, Lu T. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81: 4301
- [49] Zhang B. *Chinese J. Astron. Astrophys.*, 2007, 7: 1
- [50] Gal-Yam A. *Science*, 2012, 337: 927
- [51] Dai Z G, Wang X Y, Wu X F *et al.* *Science*, 2006, 311: 1127
- [52] Yu Y W, Liu L D, Dai Z G. *ApJ*, 2018, 861: 114
- [53] Yu Y W, Chen A, Dai Z G *et al.* *AIP Conference Proceeding*, 2019, 2017: 020024
- [54] Canal R, Schatzman E. *A&A*, 1976, 46: 229
- [55] Li C K, Lin L, Xiong S L *et al.* *Nature*, in preprint, 2020, arXiv: 2005.11071
- [56] Han J L, Wang C, Wang P F *et al.* 2021, arXiv: 2105.08460