

DOI:10.19789/j.1004-9398.2022.02.006

文献引用:黄飞龙,潘元月.极亮X射线源NGC 5907 ULX-1的磁场研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2022,43(2):36-41. HUANG F L, PAN Y Y. Study on magnetic field of pulsating ultra luminous X-ray source:NGC 5907 ULX-1[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2022, 43(2):36-41.

极亮X射线源NGC 5907 ULX-1的磁场研究

黄飞龙, 潘元月*

(湘潭大学恒星与星际物质重点实验室, 湖南 湘潭 411105)

摘要:极亮X射线脉冲星的证认表明,极亮X射线源中可能存在一定数量的中子星,其拥有超爱丁顿极限光度和较高的自转周期变化率,这些特性可能与星体的磁场密切相关. NGC 5907 ULX-1是第三颗证认的极亮X射线脉冲星,其峰值光度约为爱丁顿极限的1 000倍.本文计算了NGC 5907 ULX-1目前的偶极磁场强度,并模拟了其随时间的演化规律.结果显示,这颗源目前的偶极磁场约为 10^{13} G,演化初期的磁场约为 10^{15} G,故推断NGC 5907 ULX-1可能为吸积的磁星,其多极强磁场解释了观测的超高光度现象.同时认为,极亮X射线脉冲星极有可能是吸积的磁星,是研究磁星的相关性质及吸积演化规律的重要依据.

关键词:脉冲星双星;超爱丁顿光度;吸积;磁场

中图分类号:P1

Study on magnetic field of pulsating ultra luminous X-ray source:NGC 5907 ULX-1

HUANG Feilong, PAN Yuanyue*

(Key Laboratory of Stars and Interstellar Medium, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105)

Abstract: The confirming of the pulsating ultra luminous X-ray sources (PULXs) illustrates that there should be a certain number of accretion neutron stars in ultra luminous X-ray sources. The super Eddington limits luminosity and high spin-up rates of PULXs might be related to the magnetic field of the source. NGC 5907 ULX-1 is the third confirmed PULX, whose peak luminosity is about 1 000 times the Eddington limit. In this paper, the current dipole magnetic field intensity of NGC 5907 ULX-1 is calculated and the evolution of the magnetic field decayed with the accretion time is simulated. It is found that its present dipole magnetic field and initial magnetic field of evolution are 10^{13} and 10^{15} G, respectively. Thus, it is inferred that NGC 5907 ULX-1 might be an accretion magnetar, whose multiple strong magnetic fields support the observed phenomenon of ultrahigh luminosity. At the same time, it is considered that PULXs might be the accreting magnetars, which might be an important key for studying the relative characteristic and accretion evolution of magnetars.

Keywords: binary pulsar; ultra-Eddington luminosity; accretion; magnetic field

CLC:P1

收稿日期:2021-05-20

*通信作者:panyy@xtu.edu.cn

0 引言

极亮X射线源 (ultraluminous X-ray sources, ULXs) 是位于河外星系, 处于吸积状态的X射线致密星体, 又称超爱丁顿源或超爱丁顿光度源, 其光度一般高于爱丁顿光度^[1]. 假设爱丁顿光度为恒星吸积光度的极限, 则光度高达 10^{41} erg/s 的 ULXs 星体质量约为 $10^3 M_{\odot}$, 此时, 恒星演化理论难以解释其形成过程, 所以推断这些 ULXs 可能是中等质量的黑洞^[2-5]. 同时, 也有观点提出, 由于星体可能存在各向异性辐射, 致使观测的 ULXs 的吸积率仅稍高于爱丁顿吸积率, 从而推断这些 ULXs 可能是恒星量级的黑洞^[6]. 2014年, Bachetti等^[7]在近邻星系 M82 中, 发现了 ULX-NuSTAR J09551+6940.8 (简称 M82 X-2) 的脉冲周期和自转周期变化率, 从而证认其为第一颗极亮X射线脉冲星 (pulsating ultraluminous X-ray sources, PULXs), 其伴星质量约为 $5.2 M_{\odot}$, 轨道周期约为 2.5 d. 这项工作打破了人们以往对 ULXs 是黑洞或黑洞候选体的认知. 随着 PULXs 的相继证认, 推测在 ULXs 中可能存在相当数量的脉冲星^[8].

PULXs 的观测光度 $>10^{39}$ erg/s, 可以应用吸积的强磁场中子星的几种机制解释这种现象: 如强磁场对吸积流进行准直调整, 物质被吸积到星体的极冠区域, 同时辐射从粒子束的边缘部分逃离出射^[9]; 强磁场压缩了星体的电子散射截面, 导致辐射压强减小, 同时伴随有效观测光度的升高^[10]. 这些效应将导致星体辐射束几何形状的改变, 产生束因子效应, 该理论已成功解释了已知源 SMC X-1 的超爱丁顿现象^[11]. 但当引用束因子解释 PULXs 的超高光度时, 却发现与观测到星体的宽脉冲轮廓现象产生了矛盾. 针对 M82 X-2, 引入超强磁场中子星模型解释其极亮X射线光度问题, 推断这颗源的磁场约为 $10^{12} \sim 10^{13}$ G^[12-15]. Kluźniak 和 Lasota^[16] 基于自转周期变化率与光度关系, 指出 M82 X-2 的磁场可能会比较低, 约为 10^9 G, 低于X射线脉冲星的特征磁场值约 1 个量级, 这种情况要求吸积盘要非常接近星体并伴随超强爱丁顿吸积才可产生极亮的光度, 吸积形式与黑洞的超爱丁顿吸积相似. 结合以上对 PULXs 的磁场相关工作分析, 表明目前尚未有确定的模型用于解释这类中子星的磁场及观测特性, 仍需进一步的相关研究.

NGC 5907 ULX-1 是 2017 年发现的第三颗

PULXs. Israel 等^[17] 在分析 XMM-Newton 卫星对 X 射线源变换特征的观测数据时注意到, 在 2014 年 7 月 9—10 日, 数据中 40 ks 的观测为距离 17.1 Mpc 的 NGC 5907 星系中的一颗 ULXs, 其观测光度为 2×10^{41} erg/s, 约为 1 000 倍爱丁顿光度. 在对数据进行傅立叶能谱及光变曲线分析时, 星体的自转周期 (P) 为 1.137 s, 且自转周期变化率 (\dot{P}) 为 -5×10^{-9} , 从而证认了这颗源为 PULXs. Israel 等^[17] 提出应用多极磁场模型解释 NGC 5907 ULX-1 的超高光度问题, 其多极场强度约为 3×10^{14} G, 偶极磁场强度约为 10^{13} G, 对应的束因子 (b) 范围在 $1/25 \sim 1/7$, 推断这颗源可能是一颗吸积的磁星^[18]. Fürst 等^[19] 结合 Nustar 和 XMM-Neutron 卫星的数据, 指出 NGC 5907 ULX-1 在 2014 年光度为 8.5×10^{40} erg/s. 应用 Diskbb 模型^[20-21], 研究者^[22-25] 计算星体在吸积盘内半径处, 即磁层半径处的磁场约为 6×10^{10} G, 通过吸积过程中扭矩对中子星的影响, 并考虑 b 及吸积效率, 指出这颗源的偶极磁场约为 6×10^{12} G.

本文将对 NGC 5907 ULX-1 的磁场进行相关研究. 根据中子星的吸积扭矩理论, 计算这颗源的偶极磁场强度, 应用吸积所致的中子星偶极磁场衰减模型研究该源磁场随时间演化规律, 讨论演化的可能结果, 解释其高光度产生的原因.

1 NGC 5907 ULX-1 的偶极磁场

在脉冲星双星系统中, 中子星在吸积过程中产生总扭矩 (N), 其中主要扭矩 (N_0) 与吸积盘内边缘的吸积物质压力关系为^[22,26]

$$N_0 = \dot{M} (GM r_0)^{1/2}, \quad (1)$$

式中: \dot{M} 为中子星吸积率, G 为引力常量, M 为中子星在 r_0 处的质量, r_0 为吸积盘内边缘的半径, N_0 与 N 的占比关系为 $n = N/N_0$, 这里 n 称为无量纲扭矩, 与加速因子 (ω_s) 相关, 其表达式为

$$n(\omega_s) = 1.39 \times (1 - \omega_s/\omega_c) / (1 - \omega_s), \quad (2)$$

$$\omega_s = 1.35 \times m^{-2/7} R_6^{15/7} B_{12}^{6/7} P^{-1} L_{37}^{-3/7}, \quad (3)$$

式中: m 为中子星质量, R_6 为以 10^6 cm 为单位的星体半径, B_{12} 是以 10^{12} G 为单位的偶极磁场强度, P 为自转周期, L_{37} 是单位为 10^{37} erg/s 的吸积光度. ω_s 范围为 $0.2 \sim 1.0$, 当 $n(\omega_s) = 1$ 时, 为经典值 $\omega_c = 0.35$ ^[27]. Ghosh 和 Lamb^[27] 指出: 当 $\omega_s > \omega_c$ 时, $n > 0$, 星体自转加速; 当 $\omega_s < \omega_c$ 时, $n < 0$, 星体自转减速; 当 $\omega_s > 1$ 时, 星体处于不稳定的吸积状态.

Ghosh 和 Lamb^[22]提出,吸积中子星的自转变化率与吸积光度及磁距之间的关系为

$$-\dot{P} = 5.8 \times 10^{-5} \times [m^{-3/7} R_6^{12/7} I_{45}^{-1}] B_{12}^{2/7} (PL_{37}^{3/7})^2 n(\omega_s), \quad (4)$$

式中: I_{45} 是单位为 $10^{45} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ 的星体转动惯量.当吸积率较高甚至超过爱丁顿极限时,星体辐射束的几何形状将发生改变,产生各向异性辐射,导致观测光度(L_{obs})高于实际的吸积光度(L_x),此时引入 b 表示二者之间的关系为

$$L_x = bL_{\text{obs}}, \quad (5)$$

式中: b 的范围为 $0.2 \sim 1.0$ ^[25,28].假设中子星的质量和半径取标准值,分别为 $1.4 M_{\odot}$ 和 10 km .

观测可知,NGC 5907 ULX-1 的 $\dot{P} = -5 \times 10^{-9}$, $P = 1.137 \text{ s}$, $L_{\text{obs}} = 2.1 \times 10^{41} \text{ erg/s}$ 及 $L_{\text{obs}} = 8.5 \times 10^{40} \text{ erg/s}$ ^[17,19].由于该源的脉冲轮廓较宽,可以认为 L_{obs} 即 L_x , 取 $b = 1$.结合以上观测参数及式(4),计算得到 NGC 5907 ULX-1 当前的偶极磁场强度(B)约为 10^{13} G ,与常规中子星的磁场相近^[24,29].表1给出了 B 的具体结果以及 ω_s 的大小.可以看到,2种光度对应的 ω_s 均小于经典取值,即 $\omega_s < \omega_c$,此理论结果说明,NGC 5907 ULX-1 处于吸积加速阶段,与观测到的源的吸积状态相符.

表1 不同吸积光度下 ULXs 的磁场强度和加速因子

吸积光度(L_x)/($\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$)	磁场强度(B)/G	加速因子(ω_s)
8.5×10^{40}	1.67×10^{13}	0.250 9
2.1×10^{41}	3.43×10^{13}	0.315 6

注:ULXs表示极亮X射线源.

2 磁场随时间的演化模拟

双星系统中,中子星通过吸积物质产生磁场衰减及自转加速.Zhang 和 Kojima^[30]提出了吸积所致的中子星磁场衰减模型.模型指出,伴星随时间演化产生膨胀并充满洛希瓣,在第一拉格朗日点伴星物质受到中子星的强引力作用扰动,物质将进入中子星的洛希瓣区域.由于强磁场的作用,伴星物质无法直接落入中子星表面,在其周围形成吸积盘,盘上物质将以螺旋方式靠近中子星并最终沿磁力线落入极冠区域.假设在吸积过程中,中子星的磁场处于磁冻结状态,磁通量守恒,随着物质在星体两级的不断累积,极冠区域的面积扩大,磁通密度减小,偶极磁场强度将产生衰减,同时,吸积物质携带的角动量加快中子星的自转,对应的中子星偶极磁场的解析解为

$$B = B_f / (1 - [C/\exp(y - 1)]^{2/7}), \quad (6)$$

式中: $y = 2\Delta M / 7M_{\text{cr}}$,中子星吸积质量(ΔM)与吸积时间(Δt)及 \dot{M} 相关($\Delta M = \Delta t \times \dot{M}$), M_{cr} 为星体的壳层质量,本文取值为 $0.2 M_{\odot}$.参数 $C = 1 + (1 - X_0^2)^{1/2} \sim 2$,其中 $X_0^2 = (B_f/B_0)^{4/7}$, B_0 为中子星演化的初始磁场, B_f 是中子星的底磁场,则磁球半径被压缩到星体表面时的最小磁场为

$$B_f = 4.5 \times 10^8 \dot{M}_{18}^{1/2} m^{1/4} R^{-5/4} (\phi/0.5)^{-7/4}, \quad (7)$$

中子星磁球半径(R_M)与阿尔文半径(R_A)的关系为:

$$R_M = \phi R_A, \quad (8)$$

$$R_A = 3.2 \times 10^8 \mu_{30}^{4/7} m^{-1/7} \dot{M}_{17}^{-2/7}, \quad (9)$$

式中: μ_{30} 是以 10^{30} G 为中子星偶极磁矩, m 是单位为太阳质量的中子星质量, \dot{M}_{17} 是单位为 10^{17} g/s 的中子星吸积率, B_f 是中子星偶极磁场, R 为中子星半径, ϕ 为 R_M 与 R_A 的比值,取值大约为 0.5 ^[22-24].

根据式(6),应用表1中的 L_x ,假定系统拥有稳定的吸积率,则模拟 NGC 5907 ULX-1 的 B 随时间的演化规律如图1所示.水平直线代表该源当前的偶极磁场,曲线代表该源磁场随时间的演化规律.这颗源在 10^3 a 的时间内,由 B_0 为 10^{15} G 演化为当前的 B 为 10^{13} G ,衰减了约2个量级,吸积质量约为 $4.05 \times 10^{-8} M_{\odot}$.模拟结果表明:若经历足够时间的稳定吸积,可演化为再生脉冲星;若吸积率为 $8.5 \times 10^{40} \text{ erg/s}$ 时,其最小磁场约 $3.0 \times 10^{10} \text{ G}$;吸积率为 $2.1 \times 10^{41} \text{ erg/s}$ 时,其最小磁场为 $4.7 \times 10^{10} \text{ G}$.

在常规吸积脉冲星双星系统中,吸积率上限为爱丁顿极限,则根据式(7)可知,对应的中子星演化的最小磁场约为 10^8 G ,且由 ATNF 脉冲星数据网可知,毫秒脉冲星 B 范围为 $10^{7.5} \sim 10^{9.5} \text{ G}$.若 NGC 5907 ULX-1 经历足够时间的稳定吸积,磁场将衰减为吸积率对应的底磁场,约为 $3.16 \times 10^{10} \text{ G}$,高于一般的毫秒脉冲星的磁场.综上可知,NGC 5907 ULX-1 的初始磁场强度与磁星相近,可能是一颗吸积的磁星.

中子星的吸积演化结果与获得的吸积质量相关.在吸积率恒定的情况下,吸积质量仅与吸积时间(t_{ac})相关,而 t_{ac} 与伴星在主序阶段的存活时间的关系为:

$$t_{\text{ac}} = \zeta T_{\text{ms}}, \quad (10)$$

$$T_{\text{ms}} = 1.3 \times 10^{10} m_c^{-2.5}, \quad (11)$$

式中: ζ 为无量纲参数,一般取值为 0.1 ^[23,31], m_c 是单位为太阳质量的伴星质量, T_{ms} 为伴星在主序阶段的存活时间.假设 NGC 5907 ULX-1 所在的双星系统

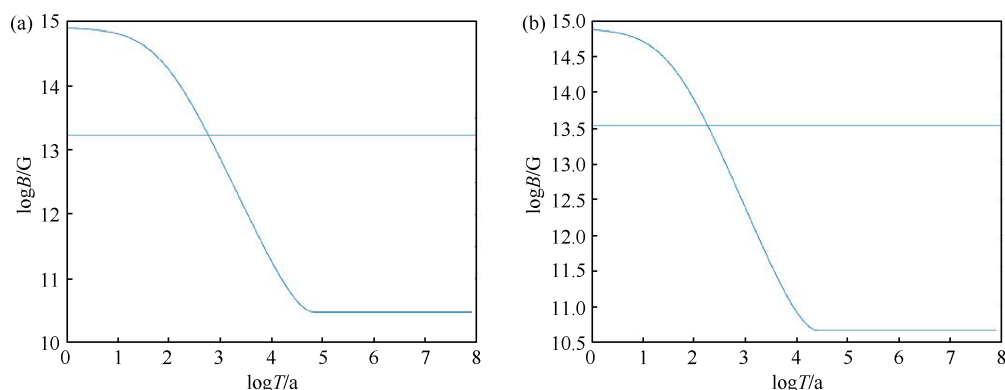


图1 NGC 5907 ULX-1不同吸积光度下磁场强度随时间的演化规律

(a) $L_x=8.5 \times 10^{40}$ erg/s; (b) $L_x=2.1 \times 10^{41}$ erg/s

不受星系内其他星体影响,处于稳定的吸积状态,由于目前的伴星质量尚未确定,可以推测:如果伴星为大质量星体,如 $>10 M_{\odot}$,NGC 5907 ULX-1可在约 10^6 a的时间内,通过持续吸积伴星物质成为再生脉冲星,伴星演化为一颗新的中子星,在吸积结束时可能成为一套双中子星双星系统;如果伴星质量较小,约 $5 \sim 10 M_{\odot}$,则吸积可以持续约 10^7 a,在此时间范围内,该源将获得超过 $0.2 M_{\odot}$ 的有效吸积物质,演化为一颗磁场较高的毫秒脉冲星,在吸积结束后,成为强磁场毫秒脉冲星伴重白矮星的双星系统.

3 讨论

本文应用中子星在吸积态下自转变化与吸积光度及磁场之间的关系,计算了NGC 5907 ULX-1当前状态的偶极磁场强度,约 10^{13} G,该结果与Israel等^[17]、Fürst等^[19]及Tong和Wang^[32]的结果相近.当应用吸积所致的中子星磁场衰减模型模拟该源的磁场随时间演化时,显示其初始磁场可高达 10^{15} G,接近磁星的磁场强度.由此可以推断,NGC 5907 ULX-1可能是一颗吸积的磁星,偶极磁场经过 10^3 a的吸积时间后,衰减了约2个量级,由 10^{15} G演化为 10^{13} G.其多极磁场强度约为 $10^{14} \sim 10^{15}$ G,降低了星体的电子散射截面,使得X射线光度超过爱丁顿光度约2~3个量级.NGC 5907 ULX-1的伴星质量尚不明确,在理想情况下,其吸积演化的结果可能为再生脉冲星或者磁场较强的毫秒脉冲星.

理论上,根据不同模型计算的PULXs的磁场范围为 $10^{12} \sim 10^{14}$ G^[33-34].King和Lasota^[35]计算了已知的11颗PULXs的磁场强度,考虑了 b 对辐射光度的作用,指出这些源的偶极磁场强度来自于常规脉冲星,约 $10^{11} \sim 10^{12}$ G;同时,Erkut等^[33]对已知的

PULXs磁场研究指出,当吸积光度为亚爱丁顿光度时,星体的表面磁场最高值约为 10^{15} G,认为如果 b 产生作用,偶极磁场与常规脉冲星相当,且该磁场可以使吸积盘上的物质沿着磁力线吸积到星体的极冠区域.Tong^[14]以及Tong和Wang^[32]认为PULXs可能为吸积磁星的对应体;Pan等^[15]通过研究M82 X-2的偶极磁场指出其可能是一颗吸积磁星,观测上,仅有一颗PULX:M51 ULX-8确切测到了回旋加速线;Brightman等^[36]认为该回旋吸收线来自于质子,对应较强的星体磁场,约 10^{15} G.结合以上PULXs的磁场工作及本文对NGC 5907 ULX-1的磁场研究结果,可以推断PULXs这类星体很可能为吸积的磁星,其偶极磁场已经衰减为 $10^{12} \sim 10^{13}$ G,多极磁场仍保持较强值,约为 $10^{14} \sim 10^{15}$ G.

4 结论

本文研究了第三颗证认的PULXs NGC 5907 ULX-1的偶极磁场及其随时间的演化规律.该源当前的偶极磁场强度约为 10^{13} G,对应的 ω_s 是 $0.2 \sim 0.3$,小于经典值 $\omega_c=0.35$,理论计算结果说明其处于吸积加速状态,与观测的结果相符.认为这颗源演化初期的磁场较高,约 10^{15} G,且可能拥有多极磁场,为吸积的磁星,若经历一定时间的稳定吸积,将演化为磁场较强的再生脉冲星.结合其他PULXs的磁场工作,可以推断这类源极有可能为吸积的磁星,是研究磁星的相关性质及吸积演化规律的重要依据.

参考文献

- [1] ROBERTS T. X-ray observations of ultraluminous X-ray sources [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2007, 311 (1): 203-212.
- [2] KONG A K H, STEFANO R D, YUAN F. Evidence of

- an intermediate-mass black hole: Chandra and XMM-Newton observations of the ultraluminous supersoft X-ray source in M101 during its 2004 outburst [J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, 617(1):L49-L52.
- [3] MILLER J M, FABIAN A C, MILLER M C. A comparison of intermediate-mass black hole candidate ultraluminous X-ray sources and stellar-mass black holes [J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, 614(2):L117-L120.
- [4] CHOI C S, BEFROY D E, CODELLA R, et al. Paradoxical effects of increased expression of PGC-1 α on muscle mitochondrial function and insulin-stimulated muscle glucose metabolism [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(50):19926-19931.
- [5] LIU J F, STEFANO R D. An ultraluminous supersoft X-ray source in M81: an intermediate-mass black hole [J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 674:L73-L76.
- [6] GLADSTONE J C, ROBERTS T, DONE C. The ultraluminous state [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, 397(4):1836-1851.
- [7] BACHETTI M, HARRISON F A, WALTON D J, et al. An ultraluminous X-ray source powered by an accreting neutron star [J]. *Nature*, 2014, 514(7521):202-204.
- [8] KING A, LASOTA J P. ULXs: neutron stars versus black holes [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 458(1):L10-L13.
- [9] BASKO M M, SUNYAEV R A. The limiting luminosity of accreting neutron stars with magnetic fields [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1976, 175(2):395-417.
- [10] HEROLD H. Compton and Thomson scattering in strong magnetic fields [J]. *Physical Review D*, 1979, 19(10):2868-2875.
- [11] COE M J, BURNELL S J B, ENGEL A R, et al. The X-ray spectrum of SMC X-1 observed from the Ariel V satellite [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1981, 197(2):247-251.
- [12] CARVALHO A, DALL' OSSO M, DORIGO T, et al. Higgs pair production: choosing benchmarks with cluster analysis [J]. *Journal of High Energy Physics*, 2016, 2016(4):126.
- [13] TOKTAS Z O, EKSI M S, YILMAZ B, et al. Association of collagen I, IX and vitamin D receptor gene polymorphisms with radiological severity of intervertebral disc degeneration in Southern European Ancestor [J]. *European Spine Journal*, 2015, 24(11):2432-2441.
- [14] TONG H. An accreting low magnetic field magnetar for the ultraluminous X-ray source in M82 [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015, 15(4):517-524.
- [15] PAN Y Y, SONG L M, ZHANG C M, et al. The magnetic field evolution of ULX NuSTAR J095551+6940.8 in M82—a legacy of accreting magnetar [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 461(1):2-5.
- [16] KLUŻNIAK W, LASOTA J P. An ultraluminous nascent millisecond pulsar [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 448(1):L43-47.
- [17] ISRAEL G L, BELFIORE A, STELLA L, et al. An accreting pulsar with extreme properties drives an ultraluminous X-ray source in NGC 5907 [J]. *Science*, 2017, 355(6327):817-819.
- [18] THOMPSON C, DUNCAN R C. The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars—I. radiative mechanism for outbursts [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1995, 275(2):255-300.
- [19] FÜRST F, WALTON D J, STERN D, et al. Spectral changes in the hyperluminous pulsar in NGC 5907 as a function of super-orbital phase [J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 834(1):77-85.
- [20] SORIA R, KUNTZ K D, LONG K S, et al. The slim-disk state of the ultraluminous X-ray source in M83 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 799(2):140-149.
- [21] BRIGHTMAN M, HARRISON F A, BARRET D, et al. A broadband X-ray spectral study of the intermediate-mass black hole candidate M82 X-1 with NuSTAR, Chandra and Swift [J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 829(1):28-37.
- [22] GHOSH P, LAMB F K. Accretion by rotating magnetic neutron stars. III - accretion torques and period changes in pulsating X-ray sources [J]. *The Astrophysical Journal*, 1979, 234(1):296-316.
- [23] SHAPIRO S L, TEUKOLSKY S A. Black holes, white dwarfs, and neutron stars: the physics of compact objects [J]. *Physics Today*, 1983, 36(10):89-90.
- [24] FRANK J, KING A, RAINE D. *Accretion power in astrophysics* [M]. New York: Cambridge University Press, 2002.
- [25] HUA F, SORIA R. Ultraluminous X-ray sources in the Chandra and XMM-Newton era [J]. *New Astronomy Reviews*, 2011, 55(5/6):166-183.
- [26] GHOSH P. Spin evolution of neutron stars in binary systems [J]. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 1995, 16(2):289-305.
- [27] GHOSH P, LAMB F K. Diagnostics of disk-

- magnetosphere interaction in neutron star binaries[M]// VAN DEN HEUVEL E P J, RAPPAPORT S A. X-Ray Binaries and Recycled Pulsars. Santa Barbara: NATO Advanced Science Institutes (ASI), 1992:487-510.
- [28] KING A R, DAVIES M B, WARD M J, et al. Ultraluminous X-ray sources in external galaxies [J]. The American Astronomical Society, 2001, 552 (2) : L109-L112.
- [29] PAN Y Y, SONG L M, ZHANG C M, et al. The simulation of the magnetic field and spin period evolution of accreting neutron stars [J]. Astronomische Nachrichten, 2015, 336(4):370-377.
- [30] ZHANG C M, KOJIMA Y. The bottom magnetic field and magnetosphere evolution of neutron star in low-mass X-ray binary [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, 366(1):137-143.
- [31] PAN Y Y, ZHANG C M, SONG L M, et al. The minimum magnetic field of millisecond pulsars calculated according to accretion: application to the X-ray neutron star SAX J1808.4-3658 in a low-mass X-ray binary [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 480(1):692-696.
- [32] TONG H, WANG W. Accreting magnetars: linking ultraluminous X-ray pulsars and the slow pulsation X-ray pulsars [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 482(4):4956-4964.
- [33] ERKUT M H, TÜRKOĞLU M M, EKSI Y, et al. On the magnetic fields, beaming fractions, and fastness parameters of pulsating ultra-luminous X-ray sources [J]. The Astrophysical Journal, 2020, 899(2):97-120.
- [34] KING A, LASOTA J P. No magnetars in ULXs [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 485(3):3588-3594.
- [35] KING A, LASOTA J P. Pulsing and non-pulsing ULXs: the iceberg emerges [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 494(3):3611-3615.
- [36] BRIGHTMAN M, BALOKOVIĆ M, KOSS M, et al. A long hard-X-ray look at the dual active galactic nuclei of M51 with NuSTAR [J]. The American Astronomical Society, 2018, 867(2):110-127.

(责任编辑:兰丽丽)

(上接第35页)

- [9] STORASTA L, BERGMAN J P, JANZEN E, et al. Deep levels created by low energy electron irradiation in 4H-SiC [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96 (9) : 4909-4915.
- [10] KANEKO H, KIMOTO T. Formation of a semi-insulating layer in n-type 4H-SiC by electron irradiation [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(26):262106.
- [11] 林必波, 靳思玥, 秦璐, 等. 高纯半绝缘性SiC材料上缺陷的发光特性的研究[J]. 光电子与激光, 2020, 31(1):1-7.
- [12] LI X J, LIU C M, YANG J Q. Synergistic effect of ionization and displacement damage in NPN transistors caused by protons with various energies [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015, 62 (3) : 1375-1382.
- [13] BUSATTO G, LUCA V, IANNUZZO F, et al. Single-event effects in power MOSFETs during heavy ion irradiations performed after Gamma-ray degradation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60 (5) : 3793-3801.
- [14] DING L L, GERARDIN S, BAGATIN M, et al. Investigation of total ionizing dose effect and displacement damage in 65 nm CMOS transistors exposed to 3 MeV protons[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2015, 796:104-107.

(责任编辑:兰丽丽)