

慧眼对弱磁场中子星低质量X射线双星的研究

卜庆翠[†]

(华中师范大学物理科学与技术学院天体物理研究所 武汉 430079)

摘要 弱磁场中子星低质量X射线双星一般指主星(中子星)磁场强度低于 10^{10} Gs的低质量X射线双星系统,中子星通过吸积盘以洛希瓣吸积的方式从伴星吸积物质,在吸积过程中释放大量的引力能并在中子星附近转化为X射线辐射.它们的X射线辐射通常带有短时标的快速时变特性,并伴随能谱性质的演化.因此,这类天体对于研究基础物理学有重要意义,特别是在测试广义相对论和强引力场效应以及研究超密物质的状态方程等方面.主要总结了自慧眼卫星发射以来对弱磁场($10^8 - 10^{10}$ Gs)中子星低质量X射线双星的观测研究,主要包括对千赫兹准周期振荡的研究进展、高能硬X射线尾巴的起源研究和吸积盘冕几何随吸积态演化的研究进展.

关键词 X射线: 双星, 致密星体: 吸积, 恒星: 中子星

中图分类号: P142; **文献标识码**: A

1 引言

弱磁场中子星低质量X射线双星(Neutron Star Low Mass X-ray Binary, NS-LMXB)一般指主星(中子星)磁场强度在 $10^8 - 10^{10}$ Gs的低质量X射线双星系统,其伴星通常为质量低于一个太阳质量($M_{\odot}$)的主序星、白矮星或红巨星,并且其轨道周期一般小于1 d.自1962年首个弱磁场NS-LMXB系统Sco X-1发现以来,目前人们在银河系内已观测到200多个此类源.在这类系统中,中子星通过吸积盘从伴星吸积物质,在吸积过程中释放大量的引力能并在中子星附近转化为X射线辐射;由于中子星磁层半径与磁场正相关,与吸积率反相关,所以当中子星磁场较弱且吸积率足够高时,吸积盘内半径可接近中子星表面.简言之,弱磁场NS-LMXB的吸积过程受中子星磁场和吸积率的直接调制.弱磁场NS-LMXB是我们研究弱磁场下中子星附近的极端物理过程的理想实验室.

根据弱磁场NS-LMXB在两色图(Color-Color Diagram, CCD)/硬度-强度图(Hardness-Intensity Diagram, HID)上展现的形状不同,弱磁场NS-LMXB星可以分为Z源和Atoll源两大类^[1].Atoll源为持续源或暂现源,亮度一般低于0.1倍爱丁顿光度,在CCD上展现出一个“C”型轨迹;Z源一般为持续源,亮度在0.1 – 1倍爱丁顿光度或更高,在CCD图上展现出一个“Z”型轨迹.目前已经认证的Z源共有6个,其中包括银河系首个弱磁场NS-LMXB系统Sco X-1.

Atoll源和Z源都显示出3种主要谱态,这些谱态大致对应于黑洞系统中的硬态、中间态以及软态^[2].在Atoll源中(见图1,左),这些谱态被称为岛态(Island State, IS)、下香蕉(Lower Banana, LB)和上香蕉(Upper Banana, UB);在Z源中(见图1,右),这些谱态则分别为水平分支(Horizontal Branch, HB),正常分支(Normal Branch, NB)和耀发分支(Flaring Branch, FB).而在一些特殊源(如

2024-10-11收到原稿, 2025-01-13收到修改稿

[†]bu@ccnu.edu.cn

XTE J1701-462、IGR 17480-2446)中发现的Z和Atoll源之间的形态转变, 表明了这两类源之间的主要区别是平均吸积率($\dot{m}$)的不同: Z源的平均吸积率显著高于Atoll源. 在Z和Atoll整体轨迹上, 通

常 $\dot{m}$ 从硬态(IS、HB)到软态(UB、FB)呈增加趋势, 然而目前对于 $\dot{m}$ 在Z/Atoll源各个分支上的演化特征目前仍存在争议. 关于弱磁场中子星低质量X射线双星更全面的介绍见最新综述文章[3].

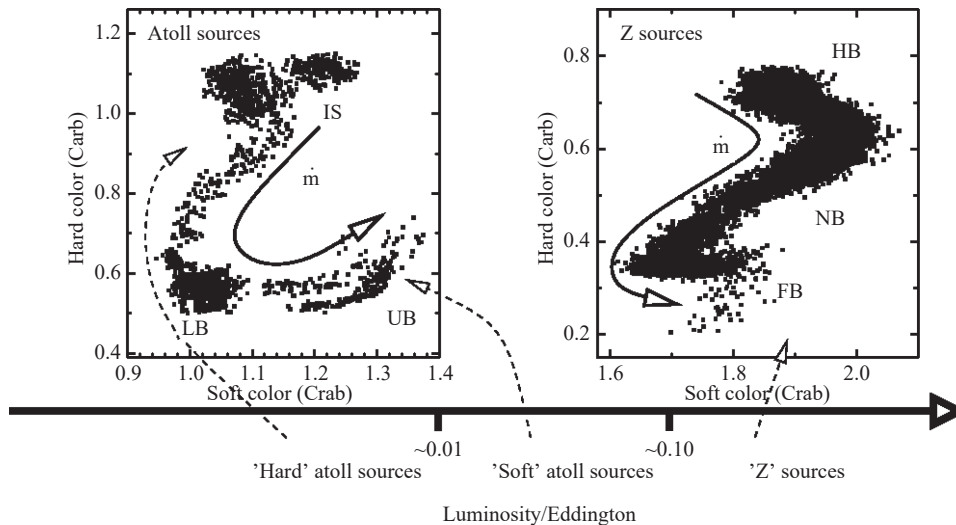


图 1 典型Atoll源(左)和Z源(右)的两色图. 下方箭头表示吸积率从左到右逐渐增大. Atoll源分为岛态(IS)和香蕉态(LB/UB), 分别对应能谱的硬态和软态; Z源分为水平分支(HB)、正常分支(NB)和耀发分支(FB). 图引自文献[2].

Fig. 1 Typical CCD of Atoll (left) and Z (right) sources. The (inferred) increasing mass accretion rate ($\dot{m}$) is indicated by the arrows. Two states are clearly defined for Atoll sources, the Island State (IS), and the banana states (LB, UB), corresponding to hard and soft states, respectively. As for Z-sources, three branches are distinguishable: the horizontal branch (HB), the normal branch (NB), and the flaring branch (FB). Adapted from Ref.[2].

弱磁场NS-LMXB的X射线辐射通常可以用一个软的热成分和一个硬的康普顿成分来描述. 其中软成分可以是来自中子星表面或者边界层的单温黑体辐射, 或者是来自吸积盘的多温黑体辐射. 硬成分则来自软光子在热的等离子体冕中的逆康普顿散射. 基于这两种成分选择的不同, 中子星X射线双星存在两个经典模型, 被称为“东方模型”和“西方模型”. 在“东方模型”中, 软成分由多温黑体盘描述, 而硬康普顿成分则由源于中子星表面或者边界层的弱康普顿化描述. 在“西方模型”中, 软成分是来自于中子星表面或者边界层的单温黑体, 而硬康普顿成分来自于覆盖在吸积盘上的板状结构的冕. 因此, X射线连续谱分析对于理解中子星附近的吸积流物理性质和空间几何结构有着重要意义. 弱磁场NS-LMXB的X射线连续谱特征随着源在CCD/HID上的位置发生明显变化, 并伴随出

现时变特征的演化^[4]. 在功率谱上, 除了比较常见的低频准周期振荡(Quasi-Periodic Oscillation, QPO)和宽带噪声成分以外, 千赫兹QPO的发现为弱磁场NS-LMXB的研究带来了变革性的贡献. 这些千赫兹QPO一般在功率谱上成对出现, 其特征频率一般在几百赫兹到千赫兹之间, 是迄今为止我们从天体中观测到的最快的时变特征($\sim$ 微秒量级, 见图2左图). 这些极短时标意味着千赫兹QPO很可能起源于离中子星表面很近的辐射区域, 为我们研究中子星的吸积流动力学提供了最为直接的观测证据. 迄今为止, 我们已经在30多个NS-LMXB中观测到成对出现的千赫兹QPO, 由于这些对千赫兹QPO的上频很接近中子星的开普勒频率, 所以可被直接用来限制中子星的质量和半径(见图2右图, 详见综述文章[6]).

在过去几十年里, 随着一系列X射线望远镜的

成功发射, 我们对弱磁场NS-LMXB的研究取得了重要的进展. 例如, BeppoSAX和RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer)的宽能段特性帮助我们更好地理解弱磁场中子星附近的吸积物理; RXTE高时间分辨率、大有效面积的特性帮助我们发现了千赫兹QPO, 为我们限制中子星物态提供了新思路; Chandra和XMM-Newton在软X射线波段的高能谱分辨率的优势让我们可以更好地分析X射线连续谱上的发射线和吸收边特征, 从而进一步限制强引力场下的中子星吸积物理. 然而, 目前对于弱磁场NS-LMXB的研究仍存在一些争议, 例如, 吸

积率在Z源各分支上的演化规律、硬X射线尾巴的起源、千赫兹QPO的物理起源以及不同吸积率下的盘冕几何演化等. 而中国首颗X射线望远镜, 慧眼-硬X射线调制望远镜(Insight Hard X-ray Modulation Telescope, *Insight-HXMT*)的成功发射为我们深入研究这些问题提供了机会. 慧眼卫星是首颗集宽能段(1–250 keV)、高时间分辨率、大有效面积的特点于一体的X射线望远镜, 为我们提供了前所未有的高质量观测数据^[7]. 在下面的章节里, 笔者将重点介绍近几年里研究者们利用慧眼卫星数据发表的代表性研究亮点.

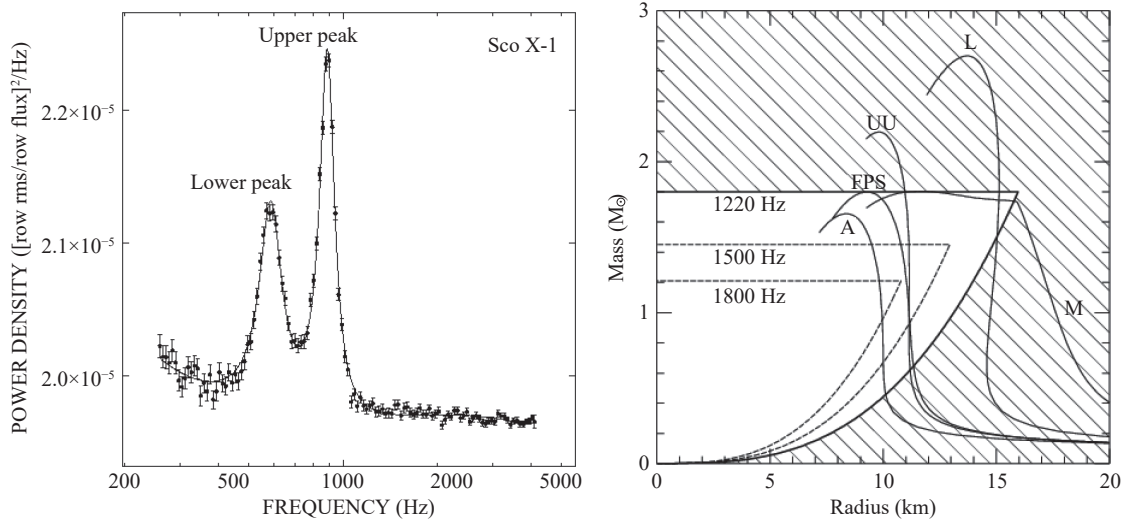


图 2 左: Z源Sco X-1功率谱上探测到的对千赫兹QPO. 图引自文献[4]; 右: 利用对千赫兹QPO的上频限制中子星的质量和半径. 图中千赫兹QPO的上频被视为开普勒频率, 当开普勒频率大于1220 Hz时超过中子星质量上限, 质量半径关系不成立, 此时用阴影区域表示. 图引自文献[5].

Fig. 2 Left: power spectral density of the Z-source Sco X-1 showing a pair (lower and upper peaks) of kilohertz QPOs. Adapted from Ref.[4]; Right: constraints on NS mass and radius from the observed maximum kHz QPO frequency (identified as the orbital, Keplerian frequency of the matter in the disk) as indicated. The hatched area is excluded if the maximum orbital frequency is 1220 Hz. Adapted from Ref.[5].

2 溯源千赫兹QPO

关于千赫兹QPO起源的争议已经持续了近30 yr, 目前较为广泛讨论的模型主要集中在千赫兹QPO的动力学性质研究上, 包括拍频模型(beat-frequency model)、相对论进动模型(relativistic precession model)和相对论共振模型(relativistic resonance model). 这些动力学模型一般假设千赫

兹QPO产生于吸积盘或者冕表面的某种形式的振荡(更详细的介绍见综述文章[6]). 而对千赫兹QPO的辐射机制的理论研究则相对较少, 目前这些研究主要集中在千赫兹QPO的产生位置和它们的X射线辐射特征上. 在过去30 yr间, 人们通过研究千赫兹QPO的特征参数(频率、时间延迟、振幅等)随着谱态和能量的演化特征, 把千赫兹QPO的起源限制在吸积盘以外的区域, 即中子星

表面或冕区. 但对于它们具体的物理起源和辐射机制还不清楚, 需进一步研究.

千赫兹QPO的研究需要卫星同时具备高时间分辨率和大有有效面积的特点, 由于上一代时变望远镜RXTE在硬X射线能段的有效面积的限制, 前期我们对千赫兹QPO的研究主要集中在20 keV以下. 慧眼卫星是自RXTE卫星以后, 首个探测到千赫兹QPO的卫星, 且首次把千赫兹QPO在20 – 60 keV能段的探测能力提高到了 3σ 以上, 展现了慧眼在硬X射线能段对千赫兹QPO的探测能力. 例如, 在Z源Sco X-1中, Jia等^[8]首次在20 – 60 keV能段同时探测到了低频QPO和千赫兹QPO (见图3左图). 这个发现为限制千赫兹QPO的起源提供了重要的观测证据, 这意味着如此高能量的QPO不可

能来自于能量较低的吸积盘或者中子星表面辐射区域, 而更可能来自于能量较高的硬康普顿辐射区域. 弱磁场NS-LMXB的基本物理图像是在吸积盘和中子星之间存在一个边界层(transition layer, TL), 物质主要经过边界层和吸积盘被吸积到中子星表面. Jia等^[9]通过拟合千赫兹QPO的均方根强度(rms)随光子能量的演化(见图3右图), 发现千赫兹QPO的rms谱主要由边界层内层光子的康普顿散射主导(图中虚线部分), 从而把千赫兹QPO的起源限制在边界层的内层区域. 同时, 他们也发现千赫兹QPO的rms谱指数比其连续谱的谱指数要小(谱更硬), 意味着千赫兹QPO很可能起源于边界层内层区域的团块运动.

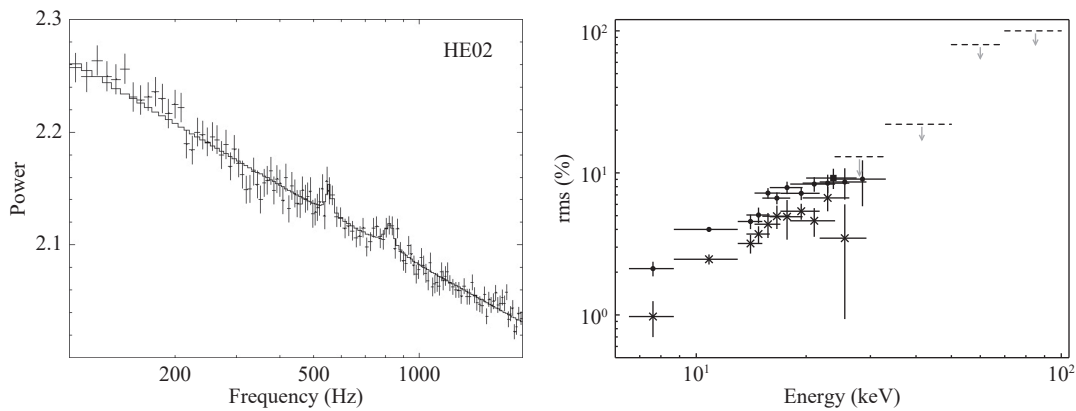


图 3 左: 慧眼在Z源Sco X-1中探测到的千赫兹QPO, 其中千赫兹QPO的频率分别为 ~ 550 Hz和 ~ 824 Hz. 图引自文献[8]; 右: 千赫兹QPO的rms随能量的演化, 其中黑点代表RXTE探测到的千赫兹QPO上频, 星号代表RXTE探测到的千赫兹QPO下频, 方块代表慧眼探测到的千赫兹QPO上频. 箭头和虚线代表慧眼对千赫兹QPO上频的rms和能量关系的模拟结果. 图引自文献[9].

Fig. 3 Left: power spectral density of the Z-source Sco X-1 showing a pair of kilohertz QPOs observed by Insight-HXMT, with the QPO frequencies of ~ 550 Hz and ~ 824 Hz. Adapted from Ref.[8]; Right: the root mean square (rms) of kilohertz QPOs evolves with photon energy. The circles, asterisks and squares represent upper kHz QPOs from RXTE, lower kHz QPOs from RXTE and upper kHz QPOs from HXMT, respectively. The arrows and dashed lines indicate the simulated values for the upper kHz QPOs with HXMT data. Adapted from Ref.[9].

3 揭秘高能硬X射线尾巴起源

弱磁场NS-LMXB的宽波段能谱分析表明, 这些源在软态时, 其连续谱在20 – 30 keV左右经常出现一个由幂律成分主导的硬X射线尾巴(Hard X-ray Tail), 其幂指数一般在1.9 – 3.3之间, 且这个硬成分的流量随着吸积率的增加而减小. 一般来说, 硬X射线尾巴在Atoll源中较为常见, 目前仅

有几例在Z源中被观测到. 硬X射线尾巴的观测性质随着源在CCD上的位置发生明显的演化, 这种现象在Z源中表现得尤为明显, 具体表现为其辐射强度在HB上最高(幂指数 ~ 2.7), 而在NB上可下降至其1/20. 关于中子星中硬X射线尾巴的起源一直存在争议, 目前比较主流模型分为: (1)来自局域外流或冕区的相对论性电子的非热康普顿化或

来自中子星附近吸积物质的体运动(bulk motion), 其中冕是一个由热和非热电子组成的混合冕. 需要注意的是, 在高吸积率态下, 来自NS表面的辐射压会减缓周围吸积物质的体运动, 导致体康普顿化(bulk Comptonization)被抑制(详见最新综述文章[3]); (2)来自于从喷流中逃逸出来的相对论电子的同步加速辐射. 在这个模型中, 由于喷流起源于热电子冕并由其供能, 因此喷流的射电辐射与X射线辐射流量正相关^[10]. 这种相关性不仅在NS-LMXB被观测到, 也广泛存在于黑洞双星系统中, 为我们研究硬X射线尾巴的物理起源提供了更多的样本.

硬X射线尾巴的研究需要卫星在硬X射线能段有足够大的有效面积, 非常符合慧眼卫星的观测特性. 目前慧眼在Z源Sco X-1、GX 17+2、GX 349+2中都观测到高能硬X射线尾巴. 其中, Ding等^[11]通过分析慧眼卫星对Sco X-1中硬X射线尾巴的观测, 如图4所示, 发现硬X射线尾巴的能谱特征随着Z分支发生明显演化, 其流量从HB经NB到FB分支显著地减小. 通过进一步分析此源在2–240 keV的宽能段能谱特征, Ding等^[11]发现在HB和NB分支上的硬X射线尾巴可以由大尺度热康普顿化模型(Thermal and bulk Comptonization of a seed blackbody-like spectrum, COMPTB)很好地解释, 意味着这些高能光子很可能是由中子星表面的软光子和边界层以及流向中子星的高温电子之间的逆康普顿散射产生的.

4 追踪盘冕几何演化

X射线连续谱分析对于理解致密天体附近吸积流的物理性质和空间几何有着重要作用, 然而由于弱磁场NS-LMXB系统在连续谱拟合中普遍存在强简并现象, 因此仅通过能谱拟合通常并不足以描述盘冕几何的完整图像. 在能谱分析的基础上, 时变或者偏振分析都可以提供一个的新的维度, 可以在一定程度上打破能谱模型中的简并. 例如, 能谱分析结合傅里叶频率分解谱可以研究不同谱成分在一些特征频率处的性质, 从而达到限制盘冕几何的目的; 另外, 由于康普顿散射产生的

光子偏振对散射物质的几何性质高度敏感, 不同的几何形状和观测角度会导致观测到的偏振度(polarization degree, PD)和偏振角(polarization angle, PA)也不同. 因此, 能谱分析结合偏振分析可以更直观地研究辐射区域的几何性质.

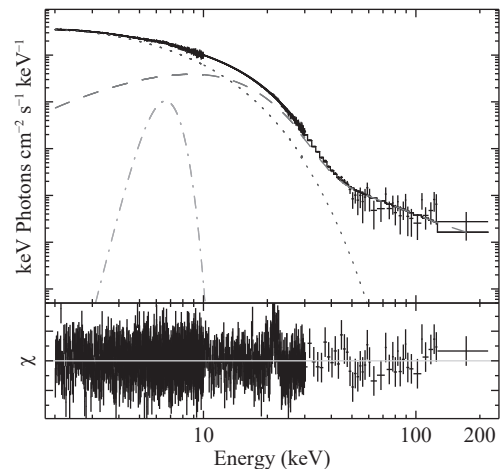


图4 Sco X-1的慧眼宽能段(2–240 keV)能谱拟合结果, 图中虚线代表COMPTB成分, 点虚线代表高斯线成分, 点线代表nthcomp成分. 图中给出了拟合的残差分布, 其单位为标准差(σ). 图引自文献[11].

Fig. 4 The joint fitting of the broadband spectrum of Sco X-1, in the energy band of 2 – 240 keV. The dashed line represents the COMPTB component, the dash-dotted line represents the Gaussian line component, and the dotted line represents the nthcomp component, respectively. The residual distribution of the fitting is also displayed, in the units of the standard deviation (σ). Adapted from Ref. [11].

利用慧眼卫星和成像X射线偏振探测器(Imaging X-ray Polarimetry Explorer, IXPE)的联合观测, 可以对目标源同时提供能谱、时变和偏振3个不同维度的信息, 更好地研究中子星的吸积几何. 种子光子在冕中经过逆康普顿散射后会被偏振化, 这被认为是光子偏振的主要来源之一. 在这种情况下, PD高度依赖于吸积流的几何性质和源的谱态. 对于板状冕的情况, 逆康普顿散射的种子光子主要来自吸积盘, 而对于球壳状的冕, 种子光子主要来自中子星的表面. 对于同一个源, 不同的吸积几何下, 其偏振度和偏振角随能量的演化特征也存在差异. 因此, 通过研究偏振性质随能量和谱态的演化特征能够到达限制吸积几何的目的. 近期, Yu等^[12]利用慧眼、Nustar和IXPE对XTE

J1701–462的联合观测, 研究该源在Z分支上的盘冕几何演化, 发现此源的PD从HB到NB显著减小甚至消失(见图5), 同时康普顿化流量也随之发生了显著降低, 意味着冕的尺度从HB到NB发生了显著减小, 甚至在NB上会完全消失. 同时, 他们的结

果也显示这个源的偏振主要是来自于反射成分的贡献, 并排除了球状冕几何的可能. 这些研究结果表明, 偏振-能谱联合分析可以有效打破能谱拟合中的简并效应, 对 neutron 星系统的吸积几何作出有力限制.

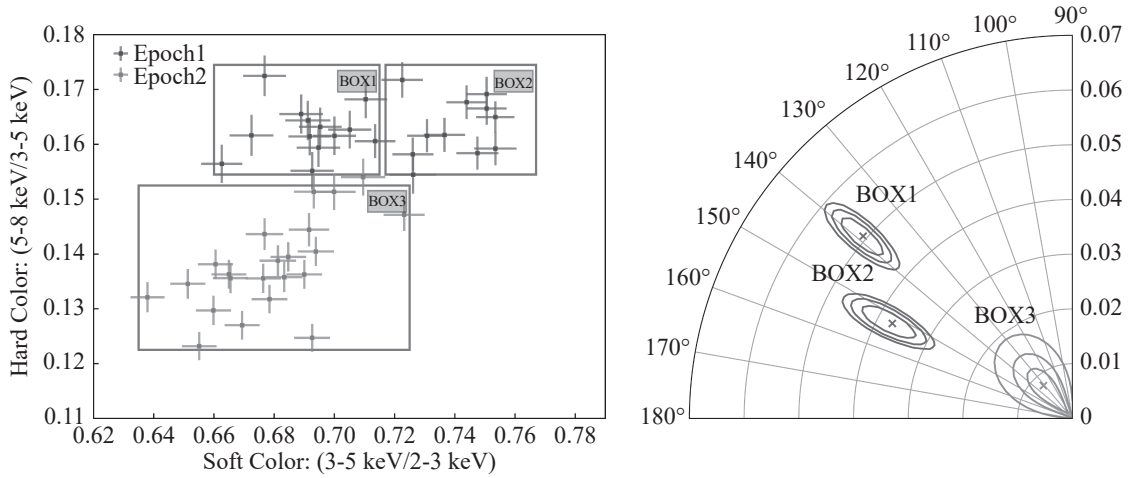


图 5 左: XTE J1701–462的CCD图, 其中Z分支被划分为3个区域, BOX1和BOX2属于HB分支, BOX3属于NB分支. 图中数据都取自IXPE. 右: 3个分区的偏振度和偏振角轮廓图, 拟合结果来自模型tbabs*polconst (diskbb+thcomp*bbodyrad+gaussian). 图中给出了68.3%、95.4%和99.7%的置信度. 图引自文献[12].

Fig. 5 Left: IXPE colour-colour diagram of XTE J1701–462. The hard color and soft color are defined as the count rate ratios in 5–8 keV/3–5 keV and 3–5 keV/2–3 keV, respectively. BOX1 and BOX2 correspond to Epoch1 on the HB, while BOX3 corresponds to Epoch2 on the NB. Right: contour plot of PD and PA at 68.27, 95.45, and 99.73 percent confidence levels in the 2–8 keV band obtained with XSPEC. The polarization-spectral fitting was performed using model: tbabs*polconst (diskbb+thcomp*bbodyrad+gaussian). Adapted from Ref.[12].

5 总结

过去6 yr的研究成果表明, 慧眼卫星在研究弱磁场NS-LMXB中的硬X射线尾巴的起源、千赫兹QPO的物理起源以及盘冕几何演化等问题上取得了重要进展, 证明了其在宽能段、高时间分辨率、高统计量等方面的观测优势. 同时通过跟其他卫星的联合观测, 也证明了多信使、多维度的分析手段将是我们研究弱磁场NS-LMXB主要且有效的途径. 未来, 慧眼卫星将继续沿用对弱磁场NS-LMXB的观测策略, 扩大慧眼对千赫兹QPO的观测样本, 探索其能量上限; 通过结合能谱和偏振的演化, 进一步限制中子星的盘冕几何; 结合时变和能谱的演化, 研究FB分支上的硬X射线尾巴的起源.

参考文献

- [1] Hasinger G, van der Klis M. A&A, 1989, 225: 79
- [2] Migliari S, Fender R. MNRAS, 2006, 366: 79
- [3] Salvo T D, Papitto A, Marino A, et al. Low-Magnetic-Field Neutron Stars in X-ray Binaries // Bambi C, Santangelo A. Eds. Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics. Singapore: Springer, 2024: 1-73
- [4] van der Klis M. Rapid X-ray variability // Lewin W, van der Klis M. Eds. Compact Stellar X-ray Sources. Cambridge Astrophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 39-112
- [5] Miller M, Lamb F K, Psaltis D. ApJ, 1998, 508: 791
- [6] Méndez M, Belloni T M. ASSL, 2021, 461: 263
- [7] Zhang S N, Li T, Lu F, et al. SCPMA, 2020, 63: 249502
- [8] Jia S M, Bu Q C, Qu J L, et al. Journal of High Energy Astrophysics, 2019, 25: 1
- [9] Jia S M, Qu J L, Lu F J, et al. ApJ, 2021, 913: 119
- [10] Merloni A, Heinz S, di Matteo T. MNRAS, 2003, 345:

1057

[11] Ding G Q, Qu J L, Song L M, et al. ApJ, 2023, 950: 69

[12] Yu W, Bu Q C, Doroshenko V, et al. A&A, 2025, 695:

A108

Highlight Sciences on Low Magnetic Field Neutron Stars X-ray Binaries with *Insight*-HXMT

BU Qing-cui

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

ABSTRACT Low magnetic field neutron stars X-ray binaries are the systems where the magnetic field strength of the primary star (neutron star) is less than 10^{10} Gauss. In these systems, the neutron star undergoes Roche lobe overflow, whereby matter is accreted from its companion star through an accretion disk. During the accretion process, a substantial quantity of gravitational energy is released and transformed into X-ray radiation in the vicinity of the neutron star. The X-ray emissions from these systems typically exhibit rapid temporal variability with short time scales, along with changes in spectral characteristics. These celestial objects are of great significance in fundamental physics, particularly in testing general relativity and strong gravitational field effects, as well as studying the equation of state of ultra-dense matter. This review presents a summary of observational research on weakly magnetic field neutron stars in low-mass X-ray binaries, with a focus on recent advancements in the study of kilohertz quasi-periodic oscillations, hard X-ray tails and the evolution of the accretion disk-corona geometry along the accretion state, since the launch of the *Insight*-HXMT (Insight Hard X-ray Modulation Telescope) satellite.

Key words X-ray: binaries, compact object: accretion, stars: neutron star