

慧眼时代吸积脉冲星回旋吸收线和吸积物理研究*

纪 龙[†]

(中山大学物理与天文学院 珠海 519082)

摘要 自2017年发射以来, 慧眼硬X射线调制望远镜(Insight Hard X-ray Modulation Telescope, *Insight-HXMT*)凭借着宽能段、大有效面积和高观测频率的优势, 已经成为吸积X射线脉冲星研究领域中最重要的一颗天文卫星之一. 它在回旋吸收线和吸积物理研究中取得了重要进展, 主要包括探测到高能回旋吸收线、揭示回旋线能量的演化和观测到辐射压主导的吸积盘.

关键词 恒星: 中子星, 吸积, X射线: 双星, 脉冲星: 普通

中图分类号: P145; **文献标识码**: A

1 引言

X射线吸积脉冲星是磁化的中子星, 出现于X射线双星系统中, 其伴星多为大质量主序星. 它们通常呈现比较强的磁场, 其磁场强度可高达 $10^{12} - 10^{13}$ Gs. 如此强的磁场远远超出地球实验室中所能达到的强度, 所以它们是研究强磁场下物理过程的天然实验室. 自上世纪70年代以来, 人们对吸积脉冲星的观测研究已经持续了近50 yr, 积累了大批的观测数据. 由于其伴星种类的不同, 吸积脉冲星系统可以大致分为持续源和暂现源, 其中暂现源占大部分. 吸积脉冲星的光度范围可以跨越多个数量级(从约 10^{32} erg/s至约 10^{41} erg/s), 在低吸积率的情况下, 系统可能进入“螺旋桨”态, 即磁球附近的吸积过程由于离心力的作用而停止; 在高吸积率的情况下, 系统将演化为超亮X射线源(Ultraluminous X-ray source, ULX). 由于强磁场的影响, 吸积流在磁球半径附近被截断. 在磁球半径内部, 吸积物质沿着脉冲星的偶极场磁感线落入极冠区, 在极冠区引力势能转换为X射线辐射被

我们观测到. 由于脉冲星偶极场的磁轴通常不与脉冲星自转轴重合, 所以我们观测的X射线流强呈现出周期性的调制. 推荐感兴趣的读者参阅综述文献[1].

吸积脉冲星的能谱以非热辐射为主导, 一般情况下其连续谱可以用现象学模型描述, 例如, 幂律谱加高能指数截断(可能的数学形式请参阅综述文献[2]). 吸积脉冲星的能谱上还存在窄带的线结构, 例如6.4 keV附近来自Fe元素的共振荧光以及回旋共振散射特征(cyclotron resonant scattering feature, CRSF). 后者亦被简称为“回旋线”, 是由于强磁场下电子在垂直于磁场方向运动的能量量子化(朗道能级)引起的, 在能谱上表现为较宽的吸收结构. 回旋吸收线的重要之处在于它的中心能量(E_{cyc})只与当地的磁场强度有关 $E_{\text{cyc}} \approx \frac{n}{1+z} 11.6 \times B_{12}$ keV, 其中 n 为量子数, z 为引力红移, B_{12} 为以 10^{12} Gs为单位的磁场. 所以, 回旋吸收线可以作为测量中子星辐射区磁场的最直接手段. 回旋线往往不是恒定不变的, 而是通常伴随着天体的光

2024-10-11收到原稿, 2024-12-09收到修改稿

* 国家自然科学基金项目(12173103、12261141691)资助

[†] jilong@mail.sysu.edu.cn

度、自旋相位、轨道相位、超轨相位以及爆发态的不同阶段而变化的. 需要强调的是, 回旋线能量的变化不是由于中子星本身的磁场发生了改变, 而是因为极冠区的辐射结构或者辐射方向变化引起的. 所以, 对回旋线的研究以及相关的时变和连续谱分析, 是研究极冠区吸积和辐射转移过程的最主要手段.

针对吸积脉冲星的深入研究需要宽能段、大有效面积的观测设备, 以往的研究中比较重要的观测卫星有BeppoSAX (Satellite per Astronomia a raggi X)、RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer)、NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array)和INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory)等. 2017年, 中国主导的慧眼硬X射线调制望远镜 (Insight Hard X-ray Modulation Telescope, *Insight-HXMT*)发射成功, 该卫星拥有能段宽(1–250 keV)和硬X射线波段有效面积大的特点(详见文献[3]). 更重要的是, 该卫星拥有灵活的观测策略, 优先将曝光时间集中在明亮的爆发态, 对一些重要的爆发源(例如Swift J0243.6+6124和1A 0535+262等)获得了前所未有的高质量观测数据, 成为该研究方向最重要的探测卫星之一. 目前, 利用慧眼卫星数据, 研究者们已经针对13个不同的天体发表了36篇关于吸积脉冲星时变、能谱分析和理论模型的学术论文. 本文由于篇幅有限, 笔者难免挂一漏万, 无法一一详述, 故仅介绍有代表性的研究亮点.

2 能量最高的回旋吸收线新记录

回旋线通常具有较宽的能谱特征, 导致和连续谱容易形成相互耦合. 所以对它们的测量需要宽波段的能量覆盖. 慧眼卫星已经在Her X-1、Vela X-1、Cen X-3、GRO J1008–57、Swift J0243.6+6124、1A 0535+262中测到了回旋吸收线^[4–10], 展现了HXMT对回旋吸收线的强大探测能力, 尤其是在高能段. 例如, 在GRO J1008–57中, 将90 keV回旋线的探测显著性水平由以往的 2σ 提升到了 20σ ^[7]. 在银河系内首个超亮X射线源Swift J0243.6+6124爆发峰值阶段, Kong等^[9]通过研究分位相的能谱, 发现了能量为120–146 keV的回旋吸

收线, Swift J0243.6+6124的宽波段能谱和能谱拟合残差见图1. 这是能量最高的回旋吸收线的新记录, 也是首次在超亮X射线源中测量到回旋吸收线. 据此, 可以推测出中子星的表面磁场约为 1.6×10^{13} Gs, 这一数字远大于之前根据“螺旋桨”效应, 即吸积盘与吸积流相互作用而推测出的磁场强度^[11–12]. 这意味着脉冲星表面存在多极场(multipole field). 多极场的存在在理论上早有预言, 而Swift J0243.6+6124中通过回旋线对中子星表面磁场的测量首次确认了这一物理图像. 这个结果也对于理解普通X射线脉冲星和超亮X射线源的关系有积极意义, 即部分超亮X射线源的辐射机制与普通X射线脉冲星相似, 辐射方式以“风扇”(fan beaming)模式为主, 所估计的高光度是本征的, 而非强辐射准直性引起的^[13–15]. 另一方面, 根据低光度下的自转演化, Liu等^[16]观测到在不同的爆发态(强爆发和弱爆发), 吸积流的性质可能有所不同. 在低光度下, 某些时候脉冲星可能不会进入“螺旋桨”态, 这对于上文中利用“螺旋桨”效应限制中子星偶极磁场形成了挑战.

3 回旋线能量的演化

回旋吸收线能量通常伴随着极冠区吸积结构的变化而变化. 例如, 在观测资料最丰富的Her X-1中曾发现了回旋线能量与光度的正相关关系; 此外, 还发现了时标为几十年的长时标演化^[17–20]. 慧眼卫星发射以来, 对Her X-1进行了多次观测, 验证了回旋线能量的长期演化趋势^[5, 20], 并且将在未来对其进行长期的监控, 力图在第一时间抓住回旋线能量发生突变的时间点.

在很多天体源中发现, 回旋线能量与脉冲星的光度存在相关关系: 大部分情况成正相关关系, 仅在极个别天体高光度情况下成反相关关系^[2, 21]. 理论认为, 当脉冲星吸积率较高时(即超临界吸积态; 反之称为亚临界吸积态), 极冠区的光度较高, 进而引起强辐射压阻碍吸积物质下落到中子星表面. 这导致在极冠区形成吸积柱结构, 其高度随吸积率的增高而上升, 吸积柱刚好形成的光度被称为临界光度^[21–24]. 当光度超过临界光度时, 辐射的主要区域将稍微远离脉冲星极冠区^[23, 25], 导致当地

磁场强度下降, 进而导致“光度-回旋线能量”的反相关关系. 这一反相关关系在以往仅在V0332+53中被观测到^[26-27]. 2020年底, 慧眼卫星通过对1A 0525+262爆发态的观测, 打破了这个孤例. 在该源中, 在低光度阶段, 回旋线能量与光度成正相关; 在高光度阶段, 回旋线能量与光度成反相关^[10], 有力地支持了以往的理论模型. 图2是在不同爆发阶段中, 回旋吸收线能量与光度的关系. 随后利用pulse-to-pulse技术手段, Shui等^[28]对“光度-回旋线能量”做了进一步详细分析, 尤其是延伸到了更低光度的范围, 为理论模型的建立提供了观测指引. 另一个有趣的问题是, 如图2所示, 回旋线能量的演化在爆发的上升阶段和下降阶段是不同的. 同时, 脉冲轮廓的研究显示, 在相同的光度下, 上升和下降阶段所呈现的脉冲轮廓也存在明显差异^[29-30]. 这意味着吸积率并非影响极冠区吸积结构的唯一因素, 具体细节需要进一步研究.

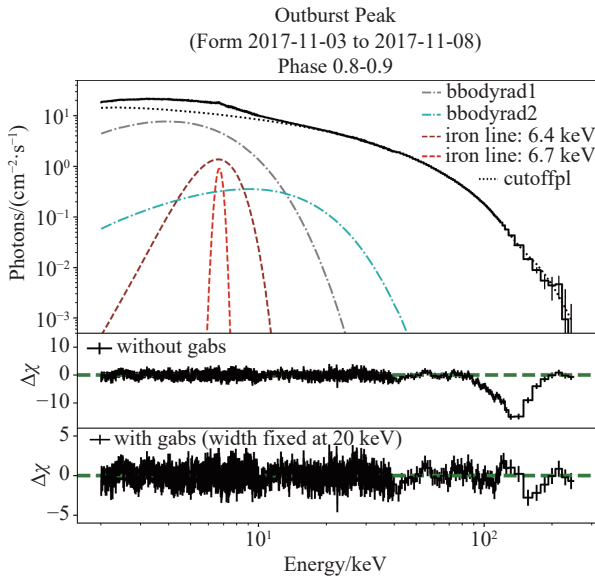


图 1 Swift J0243.6+6124中自旋相位0.8–0.9处的能谱拟合, 不同颜色的线代表不同的能谱成分. 中、下图分别代表去掉回旋线成分和加上回旋线成分情况下的拟合残差. 该图引自文献[9].

Fig. 1 Spectral fitting of Swift J0243.6+6124 at its spin phase of 0.8–0.9. Different colors present different spectral components. Middle and lower panels show residuals without and with the cyclotron absorption line. This figure is adopted from Ref. [9].

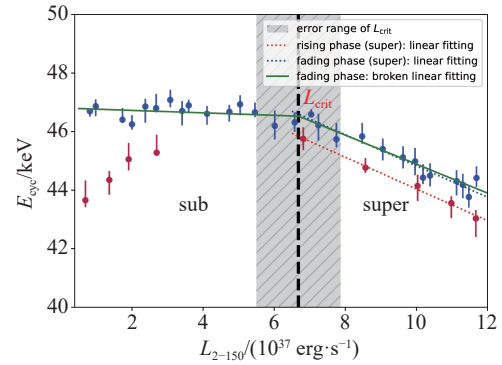


图 2 1A 0535+262中回旋吸收线中心能量随光度的演化, 黑色虚线对应了临界吸积光度, 阴影部分是其误差. 红色和蓝色数据点代表大爆发上升和下降阶段的数据, 点线代表了超临界吸积态数据点的线性拟合. 该图引自文献[10].

Fig. 2 The evolution of the cyclotron line energy with luminosity. The black dashed line indicates the critical luminosity and the gray shadow shows the error range. The data in the rising and fading phases of the outburst are shown in red and blue, respectively. Dotted lines show the linear fits of the cyclotron line energy in the supercritical state. This figure is adopted from Ref. [10].

4 辐射压主导的吸积盘

虽然我们观测到的辐射直接来源于中子星附近的极冠区, 更大尺度(即磁球外)吸积流的性质也会显著影响吸积脉冲星的时变和能谱性质. 这主要源自两方面的原因: (1)极冠区的几何尺度通常认为与吸积盘的厚度有关. 所以, 吸积盘厚度的改变会影响极冠区局域吸积率. (2)吸积流中的时变性质(variability)会传递到极冠区, 引起流强的非周期性变化, 主要反映在功率谱上^[31]. 经典的Shakura-Sunyaev吸积盘理论认为, 当吸积率较低时, 吸积盘是几何薄、光学厚的, 压强主要由气压提供; 当吸积率较高时, 盘中的压强逐渐由辐射压占据主导, 这会影响吸积盘的垂直结构, 产生辐射压主导的厚盘^[32]. 但是, 该图像之前从未在吸积脉冲星中有过观测证实. Doroshenko等^[12]详细研究了Swift J0243.6+6124中的脉冲轮廓和功率谱的演化, 其长时标爆发演化及伴随的时变信号变化见图3. 他们发现脉冲轮廓的形态随光度的演化发生了两次突变, 一次可以解释为由于吸积柱的产生, 另一次可能由于吸积盘从气压主导的薄盘形态转变为辐

射压主导的厚盘形态, 后者还伴随着功率谱形态的显著突变. Kong等^[33]对同期数据的能谱进行了分析, 在脉冲轮廓出现突变的附近也发现了明显的能谱演化行为, 支持高光度情况下辐射压主导吸积盘的物理图像. Wang等^[34]和Liu等^[35-36]又通过脉冲比分和力矩模型等时变方式对Swift J0243.6+6124进行了细致分析, 高光度下的结果也与辐射压主导吸积盘模型相符合. 另外一个有趣的现象

是, Liu等^[35]发现, 在更高的光度($> 1.3 \times 10^{39}$ erg/s)下, “光度-频率导数”关系偏离了辐射压主导吸积盘的预言. 这有可能是因为来自吸积柱的辐射照射到吸积盘, 引起了盘风, 带走了部分角动量. 此外, 根据脉冲轮廓和功率谱的演化, 辐射压主导吸积盘也在其他源中被观测到^[37-38], 但不同源中的具体情况尚有明显差异, 需要进一步观测研究.

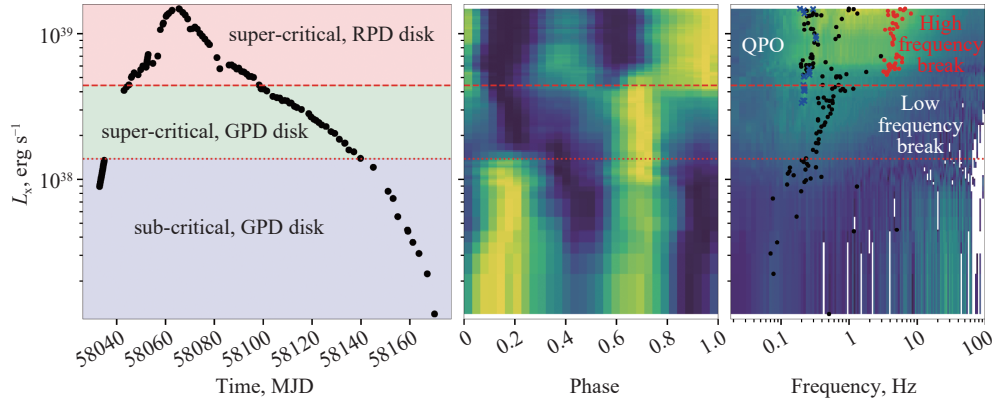


图 3 左图: 慧眼卫星观测的长期光变曲线. 不同颜色代表不同的状态: “下”代表亚临界状态、气压主导的吸积盘; “中”代表超临界状态、气压主导的吸积; “上”代表超临界状态、辐射压主导的吸积盘. 虚线代表不同状态的分界线. 中图: 脉冲轮廓的演化. 每一行代表给定光度的归一化的脉冲轮廓. 右图: 功率谱的演化. 黑点和红点代表功率谱形态上的拐点. 该图引自文献[12].

Fig. 3 Left panel: long-term lightcurve observed with *Insight*-HXMT. Different colors show different states: sub-critical state with a gas pressure dominated disk (bottom), super-critical state with a gas pressure dominated disk (middle), and super-critical state with a radiation pressure dominated disk. Middle panel: evolution of pulse profiles, where each row presents a normalized pulse profile for a given luminosity. Right panel: evolution of power spectra, in which black and red points indicate the breaking points in power spectra. This figure is adopted from Ref. [12].

5 总结与展望

在过去的7 yr间, 通过充分发挥宽能段、高统计量、高观测频次的优势, 慧眼卫星已经成为研究吸积脉冲星方向最重要的科研卫星之一, 并取得了丰硕的研究成果. 尤其是针对暂现源的大爆发态, 慧眼卫星给出了前所未有的高质量观测, 直接检验和推动了极冠区吸积物理模型的发展. 在今后, 慧眼卫星将继续沿用之前的观测策略, 力图在以下几个方面有新的突破: (1)通过pulse-to-pulse等技术手段分析已有数据, 或者捕捉新的爆发态数据, 在更高能段搜寻回旋线出现的证据; (2)持续监控Her X-1等持续源的回旋吸收线长期演化; (3)扩大“光度-回旋线能量”关系的源样本,

确认以往观测到的反常情况^[8]; (4)结合时变和能谱的演化, 在更多的源中搜寻辐射压主导吸积盘的观测证据.

参考文献

- [1] Mushtukov A, Tsygankov S. Accreting Strongly Magnetized Neutron Stars: X-ray Pulsars//Bambi C, Santangelo A. Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics. Singapore: Springer, 2023: 138-209
- [2] Staubert R, Trümper J, Kendziorra E, et al. A&A, 2019, 622: 61
- [3] Zhang S N, Li T, Lu F, et al. SCPMA, 2020, 63: 6349502Z
- [4] Liu Q, Wang W, Chen X, et al. MNRAS, 2022, 514: 2805

- [5] Xiao G C, Ji L, Staubert R, et al. JHEAp, 2019, 23: 29
- [6] Yang W, Wang W, Liu Q, et al. MNRAS, 2023, 519: 5402
- [7] Ge M Y, Ji L, Zhang S N, et al. ApJ, 2020, 899: L19
- [8] Chen X, Wang W, Tang Y M, et al. ApJ, 2021, 919: 33
- [9] Kong L D, Zhang S, Zhang S N, et al. ApJ, 2022, 933: L3
- [10] Kong L D, Zhang S, Ji L, et al. ApJ, 2021, 917: L38
- [11] Jaisawal G K, Wilson-Hodge C A, Fabian A C, et al. ApJ, 2019, 885: 18
- [12] Doroshenko V, Zhang S N, Santangelo A, et al. MNRAS, 2020, 491: 1857
- [13] Mushtukov A A, Portegies Z S, Tsygankov S S, et al. MNRAS, 2021, 501: 2424
- [14] Hou X, Ge M Y, Ji L, et al. ApJ, 2022, 938: 149
- [15] Hou X, You Y, Ji L, et al. ApJ, 2022, 941: 126
- [16] Liu J, Ji L, Ge M Y. ApJ, 2023, 950: 42
- [17] Staubert R, Klochov D, Wilms J, et al. A&A, 2014, 572: 119
- [18] Staubert R, Ducci L, Ji L, et al. A&A, 2020, 642: 196
- [19] Ji L, Staubert R, Ducci L, et al. MNRAS, 2019, 484: 3797
- [20] Xiao G C, Staubert R, Ji L, et al. ApJ, 2024, 960: 57
- [21] Mushtukov A A, Suleimanov V F, Tsygankov S S, et al. MNRAS, 2015, 447: 1847
- [22] Basko M M, Sunyaev R A. MNRAS, 1976, 175: 395
- [23] Becker P A, Klochov D, Schönherr G, et al. A&A, 2012, 544: 123
- [24] Becker P A, Wolff M T. ApJ, 2022, 939: 67
- [25] Poutanen J, Mushtukov A A, Suleimanov V F, et al. ApJ, 2013, 777: 115
- [26] Doroshenko V, Tsygankov S S, Mushtukov A A, et al. MNRAS, 2017, 466: 2143
- [27] Vybornov V, Doroshenko V, Staubert R, et al. A&A, 2018, 610: 88
- [28] Shui Q C, Zhang S, Wang P J, et al. MNRAS, 2024, 528: 7320
- [29] Hu Y F, Ji L, Yu C, et al. ApJ, 2023, 945: 138
- [30] Wang P J, Kong L D, Zhang S, et al. ApJ, 2022, 935: 125
- [31] Mushtukov A A, Lipunova G V, Ingram A, et al. MNRAS, 2019, 486: 4061
- [32] Shakura N I, Sunyaev R A. MNRAS, 1973, 175: 613
- [33] Kong L D, Zhang S, Chen Y P, et al. ApJ, 2020, 902: 18
- [34] Wang P J, Kong L D, Zhang S, et al. MNRAS, 2020, 497: 5498
- [35] Liu J, Jenke P A, Ji L, et al. MNRAS, 2022, 512: 5686
- [36] Liu J, Vasilopoulos G, Ge M, et al. MNRAS, 2022, 517: 3354
- [37] Mönkkönen J, Tsygankov S S, Mushtukov A A, et al. A&A, 2019, 626: 106
- [38] Ji L, Doroshenko V, Santangelo A, et al. MNRAS, 2020, 491: 1851

Insight-HXMT Studies of Cyclotron Resonant Scattering Features and Accretion Physics in Accreting X-ray Pulsars

JI Long

(School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082)

ABSTRACT Since the launch in 2017, *Insight*-HXMT (Insight Hard X-ray Modulation Telescope) has been one of the most important astronomical satellites for accretion X-ray pulsar studies due to its wide energy band, the large effective area and the high observational cadence, which has achieved fruitful research outputs. The aim of this paper is to review and summarize key breakthroughs related to accretion processes and cyclotron resonant scattering features in accreting pulsars, mainly including the detection of high energy cyclotron absorption lines, the evolution of cyclotron line energies, and the study of radiation-pressure-dominated accretion disks.

Key words stars: neutron, accretion, X-rays: binaries, pulsars: general