



# 黑洞X射线双星SLX 1746-331光变曲线演化及黑洞质量再估算

黄超<sup>1,2</sup>, 廖春香<sup>1,2</sup>, 谭桂萍<sup>3</sup>, 常宁<sup>3</sup>, 沈玉玲<sup>3</sup>, 董爱军<sup>1,2\*</sup>

1. 贵州师范大学物理与电子科学学院, 贵阳 550025

2. 贵州省射电天文数据处理重点实验室, 贵阳 550025

3. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011

\*联系人, E-mail: [aijdong@gznu.edu.cn](mailto:aijdong@gznu.edu.cn)

收稿日期: 2025-08-21; 接受日期: 2025-11-24; 网络出版日期: 2025-12-08

国家重点研发计划(编号: 2022YFC2205203)、国家自然科学基金(编号: 12363005)、贵州省科学技术项目(编号: KY[2022]132, KY[2022]137)、新疆维吾尔自治区重大科技项目(编号: 2022A03013-4)和2025年贵州省基层科普行动计划项目资助

**摘要** SLX 1746-331是一个黑洞X射线双星暂现源. 本文基于我国“慧眼”硬X射线调制望远镜卫星对其2023年爆发观测的数据, 对此次爆发的光度下降阶段进行了能谱及光变曲线分析. 得到在整个观测期间: (1) 光变曲线、硬度比以及能谱拟合参数呈现出两段式演化; (2) 盘成分流量和内盘温度能较好地满足 $F_{\text{disk}, 0.1-100 \text{ keV}} \propto T_{\text{in}}^{4.25}$ 关系; (3) 光变曲线的两个阶段能够分别被参数不同的e指数函数较好地拟合, 这两个e指数函数的时间参数关系为 $\beta=2.04 \pm 0.06$ . 上述结果表明, SLX 1746-331在光度下降阶段经历了从甚高态到高软态的转化过程. 假设高软态时峰值光度为 $0.3L_{\text{Edd}}$ , 则可以估算SLX 1746-331的黑洞质量为 $M_{\text{BH}} = (3.11 \pm 1.75)M_{\odot}$ . 该结果对黑洞X射线双星的黑洞质量估算、辐射特性研究具有意义.

**关键词** 黑洞, X射线双星, 吸积和吸积盘

**PACS:** 97.60.Lf, 97.80.Jp, 97.10.Gz

## 1 引言

黑洞X射线双星系统通常是X射线暂现源, 由恒星级质量黑洞和伴星组成. 在该系统中, 伴星通过吸积盘向黑洞供给物质, 被吸积的物质释放引力势能, 产生强烈的射电、光学和X射线等多波段的辐射. 黑洞X射线暂现源大多数时间处于宁静态, 随着物质在吸积盘上

堆积, 吸积盘的温度升高, 黏滞力增加, 产生剧烈的X射线爆发现象, 爆发通常能够持续数周到数月时间<sup>[1-4]</sup>. 根据能谱和时变特性, 黑洞X射线双星的爆发通常可以分为低硬态、中间态和高软态<sup>[5,6]</sup>. 低硬态时, 黑洞X射线双星的光度较低, X射线辐射以非热辐射为主, 辐射主要来自径移主导吸积流(Advection Dominated Accretion Flow, ADAF)的康普顿化过程.

**引用格式:** 黄超, 廖春香, 谭桂萍, 等. 黑洞X射线双星SLX 1746-331光变曲线演化及黑洞质量再估算. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 219517  
Huang C, Liao C-X, Tan G-P, et al. Light curve evolution and recalculation of black hole mass in the black hole X-ray binary SLX 1746-331 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 219517, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0365](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0365)

此时, X射线能谱较硬, 并伴随着较强的射电辐射. 在高软态时, X射线辐射以光学厚、几何薄的吸积盘的黑体辐射为主, 此时, X射线光度较高, 能谱较软, 吸积盘延伸至最内稳定轨道附近, 射电辐射被严重抑制. 中间态是低硬态和高软态之间的过渡状态, 此时, X射线能谱的非热辐射和黑体辐射都较为明显. 在低硬态向高软态演化的过程中, 有时会出现甚高态. 与高软态相比, 黑洞X射线双星在甚高态时的X射线光度更高, 质量吸积率高, 并可能伴随有强烈的间歇性喷流, 软X射线和硬X射线都很强烈<sup>[7]</sup>.

黑洞X射线双星的周期性爆发可以由吸积盘的热不稳定模型(Disk Instability Model, DIM)很好地解释<sup>[8-10]</sup>. 根据吸积盘的热不稳定模型, 在黑洞X射线双星的爆发中, 光度呈现快速上升、指数下降的特征. 下降阶段的质量吸积率服从e指数下降规律<sup>[11,12]</sup>:

$$\dot{M} \propto \exp(-t/\tau_m), \quad (1)$$

其中 $\tau_m$ 是吸积率演化的时间参数, 与吸积盘几何结构、黑洞和伴星的质量等参数相关.

许多证据表明, 黑洞X射线双星光变曲线的演化与吸积模式的转换密切相关<sup>[13]</sup>. 对于辐射高效的吸积模式, 如标准盘(Shakura-Sunyaev Disk, SSD)<sup>[14]</sup>, 其辐射效率 $\eta \sim 0.1$ <sup>[15]</sup>, 光变曲线可以表述为

$$L_X \propto \eta \dot{M} \propto \dot{M} \exp(-t/\tau_s), \quad (2)$$

其中 $\tau_s = \tau_m$ . 对于辐射低效的吸积模式, 如径移主导吸积流<sup>[16-18]</sup>, 其辐射效率<sup>[19,20]</sup>:

$$\eta \propto \dot{M}^\beta, \beta \sim 1.0, \quad (3)$$

其光变曲线可以表述为

$$L_X \propto \eta \dot{M} \propto \dot{M}^2 \exp(-t/\tau_h), \quad (4)$$

其中 $\tau_h = \tau_m/2$ .

Eckersall等人<sup>[13]</sup>分析了6个黑洞X射线双星的15次爆发后, 得到了 $\tau_s/\tau_h \sim 2.0$ . 该结果表明黑洞X射线双星的光变曲线分段式演化是由于吸积模式转换导致的.

SLX 1746-331是一个黑洞X射线双星暂现源, 我国“慧眼”硬X射线调制望远镜(Insight-Hard X-ray Modulation Telescope, HXMT)对其2023年的爆发进行了观测<sup>[21,22]</sup>. SLX 1746-331的基本参数已经得到了较好的限定: 距离为 $D = (10.81 \pm 3.52) \text{ kpc}$ <sup>[23]</sup>, 倾角为 $i = (53 \pm 0.5)^\circ$ <sup>[21,22]</sup>, 黑洞自旋为 $a_* = 0.88^{+0.01}_{-0.02}$ <sup>[24]</sup>. Peng等人<sup>[21,22]</sup>

对SLX 1746-331 2023年爆发的能谱和时变特性进行了详细分析, 认为SLX 1746-331一直处于高软态, 进而估算了黑洞质量 $M_{\text{BH}} \approx (5.5 \pm 3.6) M_\odot$ . 该估算方法需要对SLX 1746-331的能态进行限定. 参考Peng等人得到的此次爆发的光变曲线(见文献<sup>[21]</sup>的图1), 可以发现光变曲线存在分段式演化, 暗示其吸积模式存在转换. 本文将基于HXMT的观测数据, 对SLX 1746-331 2023年爆发的能谱及光变曲线演化进行分析, 探讨其在光度下降阶段是否存在吸积模式的转换, 判断其能态的演化, 进而估算黑洞质量及吸积效率等物理参数.

## 2 数据处理

“慧眼”卫星对SLX 1746-331的观测从2023年3月14日开始至2023年5月19日结束, 共计66 d, SLX 1746-331在这段时间一直处于爆发的光度下降阶段. 本文基于“慧眼”卫星数据分析软件HXMTDAS v2.06, 标定数据库CALDB v2.07, 根据“慧眼”卫星数据简化指南v2.06推荐的标准流程, 对SLX 1746-331 2023年爆发的数据进行处理. 本文选取低能(Low-Energy, LE, 2–10 keV)和中能(Medium-Energy, ME, 10–25 keV)数据, 使用GRPPHA命令对能谱文件进行处理, 使用XSPEC v12.13.1软件读取每次曝光的平均光子计数率, 并对能谱进行分析, 系统误差设置为1%<sup>[25]</sup>, 使用马尔科夫链蒙特卡罗(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)方法估算误差.

为了研究SLX 1746-331的能谱特性和光变曲线演化, 本文采用constant\*tbabs\*(diskbb+powerlaw)模型对SLX 1746-331的X射线能谱进行拟合, 使用cflux模型计算流量. 其中, constant是归一化常数, 用于校准LE和ME的数据, 在LE中被固定为1, 在ME中为自由参数<sup>[26]</sup>. tbabs用于描述星际介质吸收<sup>[27]</sup>, diskbb用于描述吸积盘的黑体辐射<sup>[28,29]</sup>, powerlaw用于描述幂律成分. 在能谱拟合中 $N_H$ 固定为 $0.64 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ <sup>[21]</sup>. 该模型可以较好地拟合能谱( $\chi^2/\text{d.o.f} \sim 1$ ), 所有拟合结果的残差总体分布均匀, 没有明显的结构, 如图1所示.

## 3 主要结果

图2给出了SLX 1746-331能谱拟合参数随时间的演化. 可以发现光子计数率、硬度比及各个能谱拟合

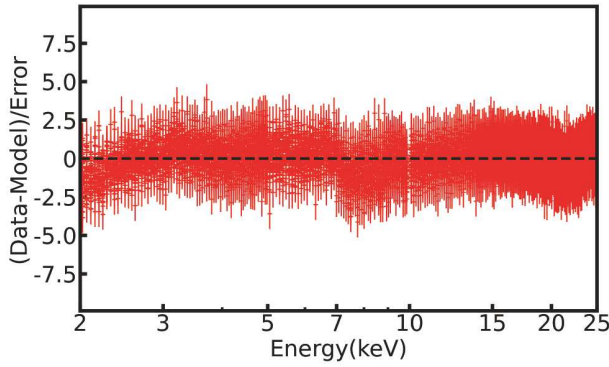


图 1 SLX 1746-331 2023年爆发中所有曝光的能谱拟合残差图

Figure 1 Spectral fit residuals for all exposures of SLX 1746-331 during its 2023 outburst.

参数呈现出两段式演化: 第一个阶段(MJD = 60017–60036)在图2中用红色实心点表示, 第二个阶段(MJD = 60046–60084)用蓝色空心点表示。

由图2(a)可以看出, 第一个阶段光子计数率下降速度较快. 硬度比和内盘温度的演化也与光子计数率相似(如图2(b)和(c)所示). 图2(d)给出了盘成分的归一化因子的演化, 其通常被用于计算吸积盘的内半径. 如图2(d)所示, 在第一个阶段盘成分的归一化因子基本不变, 在第二个阶段, 归一化因子稍微下降, 并在 MJD = 60060后一段时间内维持不变, 这暗示 MJD = 60046–60060期间吸积盘的内半径稍微减小, 在达到最内稳定轨道附近后维持了一段时间。

图3给出了SLX 1746-331在0.1–100 keV能段的X射线流量 $F_{0.1-100 \text{ keV}}$ 随时间的演化. 从图3中可以看出,  $F_{0.1-100 \text{ keV}}$ 一直处于下降阶段, 很难由单一的e指数函数拟合. 需要指出的是, 如Eckersall等人<sup>[13]</sup>所述, 下降过程中的再亮事件将影响光变曲线的演化, MJD = 60036–60046期间的数据应该是一个小型的再亮事件, 因此在分析中我们排除了该时间段的数据. 再亮事件被去掉后, 流量的演化仍不能由单一的e指数函数拟合. 参考此前的一些研究成果<sup>[30–32]</sup>, 上述现象暗示下降过程存在吸积模式的转换。

因此, 本文使用两个参数不同的e指数函数分别对流量随时间演化的两个阶段进行拟合, 拟合结果表明, 流量随时间演化的两个阶段能够分别被参数不同的e指数函数较好地拟合, 拟合参数结果如表1所示。

这表明在光度下降过程中可能存在两个辐射效率不同的阶段. 根据硬度强度图和能谱分析结果可以发

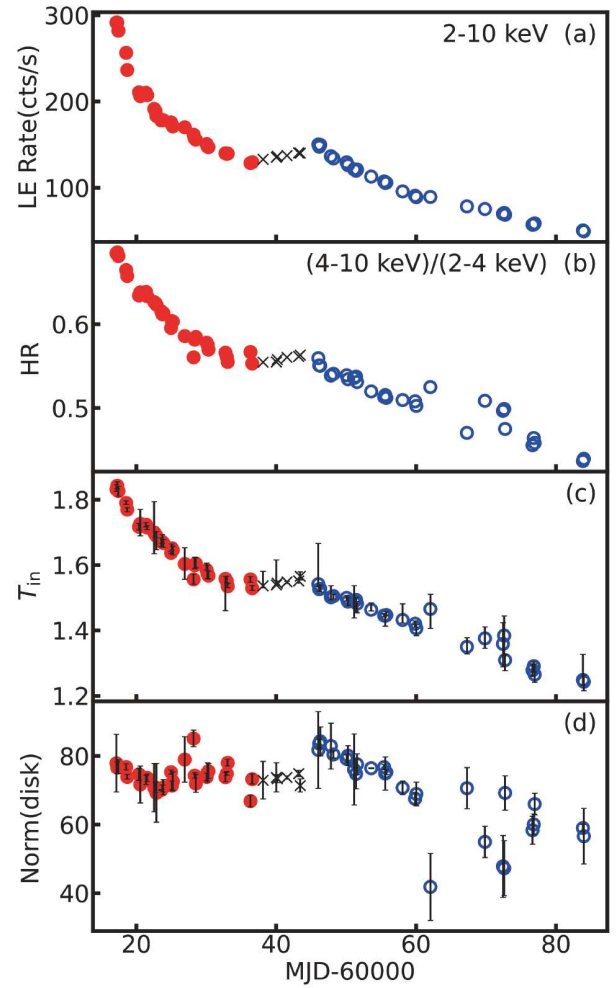


图 2 SLX 1746-331 2023年爆发的光子计数率、硬度比及能谱拟合参数随时间的演化. (a) LE能段的光子计数率; (b) 硬度比(HR, 4–10和2–4 keV之间的光子计数率之比); (c) 吸积盘内盘温度; (d) 盘成分的归一化因子. 红色实心点代表第一个阶段, 蓝色空心点代表第二个阶段

Figure 2 Temporal evolution of the count rate, hardness ratio, and spectral fitting parameters for SLX 1746-331 during its 2023 outburst. (a) Count rate in the LE band; (b) hardness ratio (HR), defined as the ratio of count rate between 4–10 and 2–4 keV; (c) temperature at inner disk radius; (d) disk normalization. Red solid points represent the first phase, while blue hollow points represent the second phase.

现, 第二个阶段硬度比低, 软X射线光子占主导, 结合此前Peng等人<sup>[21,22]</sup>的研究, 可以认为此时该源处于软态, 可以用标准盘模型来描述这一阶段的吸积过程, 即辐射效率为常数:  $\eta \propto \dot{M}^\beta$ ,  $\beta=0$ . 而流量服从:

$$F_X \propto \exp(-t/\tau_m), \quad (5)$$

即第二个阶段的e指数函数拟合参数 $B_2=\tau_m$ . 第一个阶

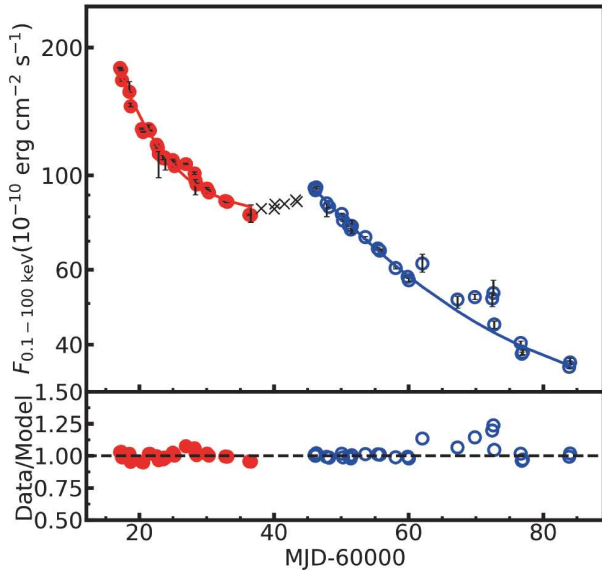


图 3 上图为SLX 1746-331 2023年爆发中总流量随时间演化的图像. 红色和蓝色的点与图2保持一致, 红色和蓝色的实线是使用e指数函数分别对红色和蓝色的点进行拟合的结果. 下图为拟合残差图

**Figure 3** The top panel displays the temporal evolution of the total flux from SLX 1746-331 during its 2023 outburst. The red and blue data points are consistent with those in Figure 2, the solid red and blue lines represent the fitting results using the exponential function applied to the red and blue points, respectively. The bottom panel shows the corresponding residuals from the fit.

段的e指数函数拟合参数 $B_1 = \tau_m / (\beta + 1)$ , 从而得到第一个阶段的辐射效率服从 $\eta \propto \dot{M}^\beta$ .

$$\beta = \frac{B_2}{B_1} - 1, \quad (6)$$

$\beta = 2.04 \pm 0.06$  (表1).

图4给出了吸积盘的X射线流量 $F_{\text{disk}, 0.1-100 \text{ keV}}$ 与内盘温度 $T_{\text{in}}$ 之间的相关性, 拟合结果为 $F_{\text{disk}, 0.1-100 \text{ keV}} \propto T_{\text{in}}^{4.25}$ . 第一个阶段的数据与拟合曲线吻合较好, 第二个阶段的数据稍微偏离拟合曲线, 处于拟合曲线的下方. 该结果暗示, 在第二个阶段, SLX 1746-331吸积盘的内半径减小, 达到最内稳定轨道附近, 并维持了一段时间, 该结果与盘的归一化因子的演化结果一致.

上述分析表明, SLX 1746-331在下降过程中光变曲线、硬度比及能谱拟合参数可以分为两个演化阶段, 第一个阶段相比第二个阶段光度和硬度比更高, 软X射线和硬X射线都较强, 可能处于甚高态. 而第二个

表 1 e指数函数拟合SLX 1746-331 2023年爆发的总流量随时间演化的结果

**Table 1** Results of the exponential fit to the temporal evolution of the total flux from SLX 1746-331 during its 2023 outburst

| $B_1(\text{d})$ | $B_2(\text{d})$  | $\beta$         |
|-----------------|------------------|-----------------|
| $6.02 \pm 0.06$ | $18.29 \pm 0.33$ | $2.04 \pm 0.06$ |

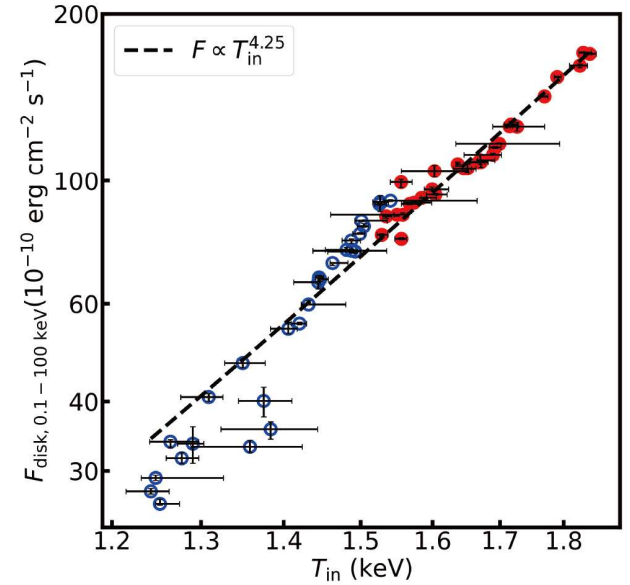


图 4 SLX 1746-331 2023年爆发中盘流量与内盘温度的关系. 红色和蓝色的点与图2保持一致. 黑色虚线是对盘流量和内盘温度关系拟合的结果

**Figure 4** Relationship between disk flux and inner disk temperature during the 2023 outburst of SLX 1746-331. The red and blue data points are consistent with those in Figure 2. The black dashed line represents the fit to the relationship between the disk flux and the inner disk temperature.

阶段硬度比降低, 吸积盘进一步向内延伸, 并在最内稳定轨道附近维持了一段时间, 表明黑洞X射线双星进入了高软态.

黑洞X射线双星处于高软态时, 其X射线光度的范围一般为 $0.001L_{\text{Edd}} \leq L_{\text{disk}, 0.1-100 \text{ keV}} \leq 0.3L_{\text{Edd}}$  [33-36], 其中 $L_{\text{Edd}} = 1.26 \times 10^{38} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ erg s}^{-1}$ . 本文采用Peng等人 [21,22] 的方法估算SLX 1746-331的黑洞质量, 假设高软态时的最大光度为 $0.3L_{\text{Edd}}$ , 吸积盘光度可以估算为 $L_{\text{disk}, 0.1-100 \text{ keV}} \approx \frac{2\pi FD^2}{\cos i}$ , 其中 $D = (10.81 \pm 3.52) \text{ kpc}$  [23],  $i = (53 \pm 0.5)^{\circ}$  [21,22]. SLX 1746-331的黑洞质量可以估算为 $M_{\text{BH}} = (3.11 \pm 1.75)M_{\odot}$ .

## 4 结论与讨论

SLX 1746-331在2023年爆发期间的硬度强度图(详见文献[22]的图2)与通常在黑洞X射线双星中观察到的“q”形图案不同, SLX 1746-331的硬度强度图向左下角演化, 硬度比随光子计数率的降低而降低. 光子计数率、硬度比及能谱拟合参数呈现出两个不同的演化阶段. 这些现象与4U 1543-47在2021年的爆发非常相似. 4U 1543-47 2021年的爆发在被HXMT观测期间同样处于光度下降阶段, 并且也可以被分为两个阶段, 第一个阶段光度超过了爱丁顿光度, 可能处于“slim盘”状态, 第二个阶段可能处于高软态[37–39]. 这种相似性暗示SLX 1746-331 2023年的爆发可能也存在类似的吸积模式转换.

吸积模式转换导致光变曲线以及能谱拟合参数分段式演化的现象在黑洞X射线双星中多次出现[40–44]. Eckersall等人[13]的研究结果展现了多个黑洞X射线双星因吸积模式转换导致光变曲线从一个e指数衰减转换到另一个参数不同的e指数衰减. 所以本文根据光变曲线以及能谱拟合参数将本次爆发分为了两个阶段, 并使用e指数函数对流量随时间的演化进行拟合, 发现这两个阶段的流量演化能够分别被参数不同的e指数函数较好地拟合, 这表明SLX 1746-331 2023年的爆发

在光度下降阶段发生了吸积模式的转换. 第一个阶段相比第二个阶段的光度和硬度比更高, 软X射线和硬X射线都比较强, 可能处于甚高态, 而第二个阶段光度和硬度比更低, 软X射线光子占主导, 可能进入了高软态.

图4给出了此次爆发中盘流量与内盘温度的相关性:  $F_{\text{disk}, 0.1-100 \text{ keV}} \propto T_{\text{in}}^{4.25}$ . 第一个阶段的数据与拟合曲线吻合较好, 第二个阶段的数据一定程度上偏离拟合曲线, 可能是由于吸积盘的内半径减小, 在达到最内稳定轨道附近后, 维持了一段时间, 这符合高软态的特征. 基于第一个阶段为甚高态, 第二个阶段为高软态的假设, 本文使用Peng等人[21,22]的方法再次估算了SLX 1746-331的黑洞质量.

综上所述, 本文利用HXMT的数据对SLX 1746-331 2023年的爆发进行了能谱和光变曲线演化的分析, 主要结果如下.

(1) SLX 1746-331 2023年爆发的光度下降阶段存在态的转换(甚高态向高软态转换).

(2) 采用Eckersall等人[13]的方法, 估算了此次爆发在甚高态时的辐射效率服从  $\eta \propto \dot{M}^{2.04}$ .

(3) 基于Peng等人[21,22]的方法, 估算了SLX 1746-331的黑洞质量  $M_{\text{BH}} = (3.11 \pm 1.75)M_{\odot}$ .

## 参考文献

- Gu W M, Wu J F, Wang J F. Searching for stellar-mass black holes in the Milky Way (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2021, 51: 030014 [顾为民, 武剑锋, 王俊峰. 搜寻银河系中的恒星级黑洞. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 030014]
- You B, Xu S E, Long Y. Black hole accretion in the outburst of X-ray binaries (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 4230–4244 [游贝, 徐赛恩, 龙毅. X射线双星爆发中的黑洞吸积. 科学通报, 2024, 69: 4230–4244]
- Yuan F. The recent progresses in the theory of black hole accretion and its astrophysical applications (I) (in Chinese). *Prog Astron*, 2007, 25: 101–113 [袁峰. 黑洞吸积理论及其天体物理学应用的近期发展(I). 天文学进展, 2007, 25: 101–113]
- Yuan F. The recent progresses in the theory of black hole accretion and its astrophysical applications (II) (in Chinese). *Prog Astron*, 2007, 25: 285–295 [袁峰. 黑洞吸积理论及其天体物理学应用的近期发展(II). 天文学进展, 2007, 25: 285–295]
- Fender R, Belloni T. Stellar-mass black holes and ultraluminous X-ray sources. *Science*, 2012, 337: 540–544
- Remillard R A, McClintock J E. X-ray properties of black-hole binaries. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2006, 44: 49–92
- Dong A J. The Study on the Fundamental Plane of Black Hole Activity (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 [董爱军. 黑洞天体活动的基本面研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2016]
- van Paradijs J. On the accretion instability in soft X-ray transients. *Astrophys J*, 1996, 464: L139–L141
- King A R, Ritter H. The light curves of soft X-ray transients. *Mon Not R Astron Soc*, 1998, 293: L42–L48
- Dubus G, Hameury J M, Lasota J P. The disc instability model for X-ray transients: Evidence for truncation and irradiation. *Astron Astrophys*, 2001, 373: 251–271
- Lasota J P. The disc instability model of dwarf novae and low-mass X-ray binary transients. *New Astron Rev*, 2001, 45: 449–508

- 12 Xu S N, Yuan Y F. Cosmological evolution of massive black holes at the center of galaxies (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42: 1256–1264 [徐生年, 袁业飞. 星系中心大黑洞的宇宙学演化. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 1256–1264]
- 13 Eckersall A J, Vaughan S, Wynn G A. Evidence for changes in the radiative efficiency of transient black hole X-ray binaries. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 450: 3410–3417
- 14 Shakura N I, Sunyaev R A. Black holes in binary systems. Observational appearance. *Astron Astrophys*, 1973, 24: 337–355
- 15 Merloni A, Heinz S, Di Matteo T. A fundamental plane of black hole activity. *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 345: 1057–1076
- 16 Narayan R, Yi I. Advection-dominated accretion: A self-similar solution. *Astrophys J*, 1994, 428: L13
- 17 Narayan R, Yi I. Advection-dominated accretion: Self-similarity and bipolar outflows. *Astrophys J*, 1995, 444: 231–243
- 18 Narayan R, Kato S, Honma F. Global structure and dynamics of advection-dominated accretion flows around black holes. *Astrophys J*, 1997, 476: 49–60
- 19 Xie F G, Yuan F. Radiative efficiency of hot accretion flows. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 427: 1580–1586
- 20 Yuan F, Narayan R. Hot accretion flows around black holes. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2014, 52: 529–588
- 21 Peng J Q, Zhang S, Wang P J, et al. Back to business: SLX 1746-331 after 13 years of silence. *Astrophys J*, 2023, 955: 96
- 22 Peng J Q, Zhang S, Shui Q C, et al. NICER, NuSTAR, and Insight-HXMT views to black hole X-Ray binary SLX 1746-331. *Astrophys J Lett*, 2024, 965: L22
- 23 Yan Z, Yu W. X-ray outbursts of low-mass X-ray binary transients observed in the *RXTE* era. *Astrophys J*, 2015, 805: 87
- 24 Chen J, Wang W. The spin measurement of the black hole SLX 1746-331 using Insight-HXMT observations. *Astrophys J*, 2025, 984: 115
- 25 Liao J Y, Zhang S, Lu X F, et al. Background model for the high-energy telescope of Insight-HXMT. *J High Energy Astrophys*, 2020, 27: 14–23
- 26 Peng J Q, Zhang S, Shui Q C, et al. NICER, NuSTAR, and Insight-HXMT views to the newly discovered black hole X-ray binary Swift J1727.8-1613. *Astrophys J Lett*, 2024, 960: L17
- 27 Wilms J, Allen A, McCray R. On the absorption of X-rays in the interstellar medium. *Astrophys J*, 2000, 542: 914–924
- 28 Makishima K, Maejima Y, Mitsuda K, et al. Simultaneous X-ray and optical observations of GX 339-4 in an X-ray high state. *Astrophys J*, 1986, 308: 635–643
- 29 Peng J Q, Zhang S, Shui Q C, et al. Insight-HXMT, NICER, and NuSTAR views to the newly discovered black hole X-ray binary Swift J151857.0-572147. *Astrophys J Lett*, 2024, 973: L7
- 30 Lazar H, Tomsick J A, Pike S N, et al. Spectral and timing analysis of NuSTAR and Swift/XRT observations of the X-ray transient MAXI J0637-430. *Astrophys J*, 2021, 921: 155
- 31 Zhao X, Gou L, Dong Y, et al. Estimating the black hole spin for the X-ray binary MAXI J1820+070. *Astrophys J*, 2021, 916: 108
- 32 You B, Yang S, Yan Z, et al. The delayed radio emission in the black hole X-ray binary MAXI J1348-630. *Astrophys J Lett*, 2024, 969: L33
- 33 Steiner J F, McClintock J E, Remillard R A, et al. The constant inner-disk radius of LMC X-3: A basis for measuring black hole spin. *Astrophys J*, 2010, 718: L117–L121
- 34 Salvesen G, Miller J M, Reis R C, et al. Spectral hardening as a viable alternative to disc truncation in black hole state transitions. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 431: 3510–3532
- 35 García J A, Steiner J F, McClintock J E, et al. X-ray reflection spectroscopy of the black hole GX 339-4: Exploring the hard state with unprecedented sensitivity. *Astrophys J*, 2015, 813: 84
- 36 Draghis P A, Miller J M, Zoghbi A, et al. A systematic view of ten new black hole spins. *Astrophys J*, 2023, 946: 19
- 37 Yorgancioglu E S, Bu Q C, Santangelo A, et al. Spin measurement of 4U 1543-47 with Insight-HXMT and NICER from its 2021 outburst. *Astron Astrophys*, 2023, 677: A79
- 38 Zhao S J, Tao L, Li P P, et al. The bright black hole X-ray binary 4U 1543-47 during the 2021 outburst: A thick accretion disk inflated by high luminosity. *Astron Astrophys*, 2024, 685: A42
- 39 Jin P, Zhang G, Zhang Y, et al. The bright black hole X-ray binary 4U 1543-47 during 2021 outburst. A clear state transition from super-Eddington to sub-Eddington accretion revealed by Insight-HXMT. *Mon Not R Astron Soc*, 2024, 530: 929–946
- 40 Wu Q, Gu M. The X-ray spectral evolution in X-ray binaries and its application to constrain the black hole mass of ultraluminous X-ray sources. *Astrophys J*, 2008, 682: 212–217
- 41 Dong A J, Wu Q, Cao X F. A new fundamental plane for radiatively efficient black-hole sources. *Astrophys J*, 2014, 787: L20
- 42 Cao X F, Wu Q, Dong A J. Different X-ray spectral evolution for black hole X-ray binaries in dual tracks of radio-X-ray correlation. *Astrophys J*,

2014, 788: 52

- 43 Yang Q X, Xie F G, Yuan F, et al. Correlation between the photon index and X-ray luminosity of black hole X-ray binaries and active galactic nuclei: Observations and interpretation. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 447: 1692–1704
- 44 Liu H, Dong A J, Weng S S, et al. Evolution of the hard X-ray photon index in black-hole X-ray binaries: Hints for accretion physics. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 487: 5335–5345

## Light curve evolution and recalculation of black hole mass in the black hole X-ray binary SLX 1746-331

HUANG Chao<sup>1,2</sup>, LIAO Chun-Xiang<sup>1,2</sup>, TAN Gui-Ping<sup>3</sup>, CHANG Ning<sup>3</sup>,  
SHEN Yu-Ling<sup>3</sup> & DONG Ai-Jun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

<sup>2</sup> Guizhou Provincial Key Laboratory of Radio Astronomy and Data Processing, Guiyang 550025, China

<sup>3</sup> Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

\*Corresponding author (email: [aijdong@gznu.edu.cn](mailto:aijdong@gznu.edu.cn))

SLX 1746-331 is a black hole X-ray binary transient. Based on data from China's Insight Hard X-ray Modulation Telescope (HXMT) satellite during its 2023 outburst, this paper conducts spectral and flux analysis of the luminosity decline phase of the outburst. The following results were obtained throughout the observation: (1) the light curve, hardness ratio, and spectral fitting parameters exhibit a two-stage evolution; (2) the disk flux and the inner disk temperature follow the  $F_{\text{disk}, 0.1-100 \text{ keV}} \propto T_{\text{in}}^{4.25}$  relation; (3) the two stages of the light curve can be well fitted by exponential functions with different parameters, and the relationship between the parameters of the two exponential functions is  $\beta = 2.04 \pm 0.06$ . These findings indicate that SLX 1746-331 underwent a transition from the very high state to the high soft state during its luminosity decline. Assuming a peak luminosity of  $0.3L_{\text{Edd}}$  during the high soft state, the black hole mass of SLX 1746-331 is estimated to be  $M_{\text{BH}} = (3.11 \pm 1.75)M_{\odot}$ . These results contribute to the estimation of black hole masses and the study of radiative properties in black hole X-ray binaries.

**black holes, X-ray binaries, accretion and accretion disks**

**PACS:** 97.60.Lf, 97.80.Jp, 97.10.Gz

**doi:** [10.1360/SSPMA-2025-0365](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0365)