doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2022.02.001

黑洞候选体MAXI J1535−571爆发期间的时变现象

李 超[1] 王鹏举[2] 李小波[2†] 杨雪娟[1] 肖化平[1‡]

(1 湘潭大学物理与光电工程学院 湘潭 411105)
(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 利用“慧眼” (Hard X-ray Modulation Telescope, *Insight*-HXMT)卫星在2017年9月对黑洞候选体MAXI J1535−571的观测数据, 研究了该源在爆发期内的时变现象. 当源处于不同的爆发谱态时, 功率密度谱的谱型存在明显差异. 在硬中间态, 有明显的限带噪声(band-limited noise)成分和QPO (Quasi-Periodic Oscillation)成分. 分析结果表明: 低频限带噪声的特征频率随能量的变化呈现正相关, 即软能段光子的特征频率小于硬能段光子的特征频率. 0.1–0.5 Hz频率区间的限带噪声RMS (Root Mean Square)谱在硬中间态和软中间态均出现峰值, 且在高能端存在差异, 可能是主导噪声RMS的能谱成分占比不同. 当谱态由硬中间态过渡到软中间态时, C型QPO的RMS谱保持相似趋势, 但限带噪声RMS谱存在谱态依赖现象, 暗示着噪声和QPO有不同的起源机制.

关键词 X射线: 双星, 吸积盘: 准周期震荡, 噪声

中图分类号: P142; **文献标识码**: A

1 引言

低质量黑洞X射线双星是一类辐射X射线的双星系统, 由黑洞和一颗低质量的伴星构成. 在双星系统互相绕转运动过程中, 黑洞会通过洛希瓣的方式吸积伴星的物质, 并产生一个光学厚、几何薄的吸积盘[1]. 经过长时间的宁静态后, 由于吸积盘的热不稳定性, 可能会发生爆发. QPO (Quasi-Periodic Oscillation)是黑洞X射线双星系统在爆发期常见的一种时变现象. 根据QPO中心频率的不同, 可以分为高频QPO和低频QPO两类. 其中, 低频QPO根据Casella等[2]的分类标准可以分为3种: A型QPO、B型QPO和C型QPO. 该划分标准是根据低频QPO的品质因子Q、噪声、相对RMS (Root Mean Square)以及相位延迟的不同. A型QPO很弱($\lesssim$ 3% RMS), 中心频率~8 Hz, 品质因子相对较小($Q \lesssim 3$), 并且伴随着较弱的红噪声; B型QPO的RMS大约为4%, 中心频率~5–6 Hz之间, 峰的宽度也比较窄($Q \gtrsim 6$), 伴随有弱幂律噪声; C型QPO是最常见的, 也是最强的一类低频QPO (~3%–16% RMS), 有时还会出现一个半频和一个二次谐频的峰, 中心频率~0.1–15 Hz之间, Q~7–12, 伴随有强限带噪声[3].

根据黑洞X射线双星爆发期内的能谱和时变特征信息, 可以把爆发过程分成多个谱态, 即低硬态(Low Hard State, LHS)、硬中间态(Hard Intermediate State, HIMS)、软中间态(Soft Intermediate State, SIMS)和高软态(High Soft State, HSS)[4]. 低硬态通常出现在系统爆发开始和结束阶段, 能谱主要由硬成分主导, 盘成分很弱, 吸积盘离中心黑洞较远; 此时的光变比较剧烈, 相对RMS能高达30%,

2021-04-19收到原稿, 2021-07-23收到修改稿

†lixb@ihep.ac.cn

‡hpxiao@xtu.edu.cn

功率密度谱上可能存在C型QPO, 并伴有较强的限带噪声成分. 硬中间态与低硬态相比能谱更软, 幂律成分逐渐减少, 吸积盘成分逐渐显现, 功率密度谱上存在C型QPO, QPO频率与硬度呈反相关, 并与光子指数相关[4]. 软中间态的能谱比硬中间态的稍软一点, 能谱中既存在幂律成分又存在盘成分; 软中间态的光变幅度逐渐减弱, 功率密度谱上的限带噪声由更弱的幂律噪声替代, 可能会出现A或B型QPO[5]. 高软态的能谱主要由盘成分主导; 光变幅度很弱, 很少能检测到QPO的存在[6].

时变分析中, 相对RMS表征的是功率密度谱中各信号的振幅占总流量的百分比[7]. Gierliński等[8]建立的一套X射线能谱物理参数变化与能量的关系理论模型, 预测了黑洞双星XTE J1650−500的总RMS谱在软X射线段($\lesssim$3 keV)出现截断现象和XTE J1550−564的总RMS谱在$\sim$20–30 keV附近有一个峰值. Huang等[9]给出了MAXI J1535−571中C型QPO的RMS谱, 谱中低能段RMS很小且与能量呈现正相关, 直到大约在20 keV附近达到最大值且维持不变, 这一结果与You等[10]根据Lense-Thirring进动模型算出的QPO的RMS谱相似.

黑洞候选体MAXI J1535−571于2017年9月2日开始进入爆发阶段. 它同时被MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)的GSC (Gas Slit Camera)探测器和Swift卫星的BAT (Burst Alert Telescope)探测器检测到[11]. 该源在天球中的位置(RA = $15^{\rm h}\ 35^{\rm m}19.73^{\rm s}$, Dec = $-57°13'48.1''$), 源的距离为$4.1^{+0.6}_{-0.5}$ kpc, 在银道面附近[12]. Miller等[13]估计了这个源中致密星的自旋参数$a = 0.994$. Russell等[14]分析射电波段的数据认为它在爆发时期的低硬态阶段有一个比较活跃的喷流结构. Xu等[15]认为它的能谱中有一个反射成分.

“慧眼”卫星(Hard X-ray Modulation Telescope, *Insight*-HXMT)在观测高能X射线辐射有显著的优势. 本文利用该卫星在2017年9月对MAXI J1535−571的观测数据, 分析了MAXI J1535−571的X射线辐射的时变特征, 以此解释它的辐射机制和辐射模型, 进而给理论研究提供科学支撑. 文章第2节介绍了“慧眼”卫星的相关情况及其数据处理流程和方法. 第3节给出了时变分析的结果. 第4节讨论了低频限带噪声的特征频率与能量的分布关系以及限带噪声与QPO的RMS谱, 同时还结合已有的模型分析了噪声与QPO的起源机制, 第5节是总结.

2 观测和数据分析

2.1 卫星和数据处理简介

“慧眼”卫星于2017年6月15日发射升空, 运行高度约550 km、轨道倾角约43°的近地轨道, 是中国第1台X射线空间天文卫星. 与其他同类卫星相比较, 它具有覆盖能段宽、在高能X射线能段的有效面积大、时间分辨率高以及有效工作时间占比高等优点, 可以探索比以往更靠近黑洞视界或中子星表面的区域[16]. 它的主要科学载荷: 高能X射线望远镜(HE), 探测能段20–250 keV, 由NaI (CsI)晶体构成, 有效面积$\sim$ 5000 cm^2, 视场大小1.6° × 6°; 中能X射线望远镜(ME), 探测能段5–30 keV, 由Si-PIN (PN Junction with Isolation Region)装置构成, 有效面积$\sim$ 900 cm^2, 视场大小1° × 4°; 低能X射线望远镜(LE), 探测能段1–10 keV, 由SCD (Swept Charge Device)探测器构成, 有效面积$\sim$ 400 cm^2, 视场大小1.1° × 5.7°[17].

“慧眼”卫星对黑洞双星MAXI J1535−571的观测时间开始于2017年9月6日. 由于观测期间发生了太阳耀发, 因此9月7日到12日关闭了部分探测器. 表1详细记录了卫星对这次MAXI J1535−571爆发过程中的观测样本数据. HXMTDAS (*Insight*-HXMT Data Analysis Software package)是卫星数据的处理软件包, 它的作用是对原始数据进行预处理, 产生能谱、光变曲线以及相应的响应文件等可直接进行科学数据分析的数据. 我们处理数据使用的软件版本是HXMTDAS V2.04. 数据筛选条件: 地球边缘与望远镜的指向夹角(Elevation angle, ELV) > 6°; 点源位置偏移量 < 0.05°; 地磁截止刚度COR (Cut-off rigidity) > 6. 背景估计工具是lebkgmap、mebkgmap和hebkgmap. 好时间段(good-time-interval, gti)估算的命令为legtigen、megtigen和hegtigen. 产生光变曲线的命令是lelcgen、melcgen和helcgen[9].

表 1 MAXI J1535−571的“慧眼”观测数据

Table 1 *Insight*-HXMT observation data for MAXI J1535−571

ObsID[a]	Start date	MJD	HE rate (30–120 kev) /(cts · s^{-1})	ME rate (10–30 kev) /(cts · s^{-1})	LE rate (1–10 kev) /(cts · s^{-1})	State[b]
101	2017-09-06	58002.32	–[c]	250.69	273.75	LHS
102	...	58002.45	–[c]	259.11	283.85	LHS
103	...	58002.58	–[c]	263.51	295.76	LHS
104	...	58002.72	741.99	276.61	308.68	LHS
105	...	58002.85	749.83	284.89	320.56	LHS
106	...	58002.98	768.27	293.66	331.33	LHS
107	2017-09-07	58003.11	766.38	298.53	339.82	LHS
108	...	58003.25	769.97	305.14	345.06	LHS
109	...	58003.38	–[e]	317.34	361.00	LHS
144	2017-09-12	58008.44	483.72	418.26	1177.79	HIMS
145	...	58008.58	496.69	424.90	1197.94	HIMS
146	2017-09-13	58009.03	482.03	–[e]	–[d]	HIMS
147	...	58009.16	523.01	452.00	–[d]	HIMS
201	2017-09-14	58009.21	623.40	507.13	–[d]	HIMS
301	2017-09-15	58011.2	619.75	522.28	1321.68	HIMS
401	2017-09-16	58012.26	547.78	509.18	1495.12	HIMS
501	2017-09-17	58013.26	519.10	516.89	1726.81	HIMS
601	2017-09-18	58014.12	554.54	539.43	1773.20	HIMS
701	2017-09-19	58015.97	222.56	288.71	–[e]	SIMS
901	2017-09-21	58017.1	335.13	407.35	2687.21	SIMS
902	...	58017.25	339.24	396.30	2697.70	SIMS
903	...	58017.39	366.60	433.96	2639.50	SIMS
904	...	58017.53	212.20	278.15	2697.40	SIMS
905	...	58017.9	149.73	183.18	–[e]	SIMS
906	2017-09-22	58018.03	122.92	182.29	2596.61	SIMS
907	...	58018.17	168.85	194.13	2607.47	SIMS
908	...	58018.32	215.52	241.18	2640.08	SIMS
909	...	58018.45	138.39	168.86	2586.09	SIMS
910	...	58018.83	133.55	164.94	–[e]	SIMS
911	...	58018.96	116.90	167.84	2566.64	SIMS
912	2017-09-23	58019.09	154.83	184.03	2608.64	SIMS
913	...	58019.24	168.04	204.31	2583.89	SIMS
914	...	58019.38	164.65	176.74	2576.69	SIMS
915	...	58019.52	196.97	227.08	2582.74	SIMS
916	...	58019.66	193.03	258.77	2620.72	SIMS
917	...	58019.79	193.09	259.77	2661.73	SIMS
918	...	58019.92	178.58	216.79	2552.64	SIMS

[a] P011453500XXX;

[b] Following definitions in Belloni[18];

[c] HE detector was operated in the GRB (Gamma Ray Burst) mode;

[d] LE detector was saturated;

[e] Missing data.

经过上述一系列的筛选过滤后, 产生的数据就可以直接用作科学分析. 为方便进行时变分析, 对每次观测的光变曲线使用powspec工具产生时间间隔为64 s的功率密度谱, 时间分辨率1/128 s, 采用Miyamoto归一[19]并减去泊松噪声. 利用xspec工具拟合功率密度谱[20], 拟合的模型是多个洛伦兹(Lorentz)函数叠加. 其中QPO和谐频成分采用的是中心频率非0的洛伦兹函数, 限带噪声成分使用的是中心频率为0的洛伦兹函数[21], 拟合过程的置信区间为90%.

2.2 数据分析方法

黑洞双星的X射线辐射存在显著的短时标变化, 光变曲线在时域上的研究不能直接获取有用的信号参数, 而一段连续观测的光变曲线经过傅里叶变换可以提取比较弱的周期信号或者准周期信号.

对X射线源的光变曲线进行傅里叶变换得到功率密度谱. 在功率密度谱上包含噪声和QPO成分, QPO在谱上表现为有限宽度的峰, 一般用洛伦兹函数描述, 公式如下[22]:

$$L(\nu)=\frac{a_0^2}{\arctan(\nu_0/\Delta)+\pi/2}\frac{\Delta}{\Delta^2+(\nu-\nu_0)^2}\,, \quad (1)$$

其中, ν是傅里叶频率, ν_0是洛伦兹函数的峰值频率(对应QPO的中心频率), Δ是半高全宽(FWHM), a_0^2等于$L(\nu)$从$\nu=0$到$\nu=\infty$的积分. 根据帕塞瓦尔定理, 功率密度谱可以归一化, 使其在所有正频率上的积分等于相应时间序列相对RMS的平方[23]. RMS本质上量化了一个给定时间序列在给定频率范围内的变化程度. 如果使用RMS归一, 那么a_0就是相对RMS. 通常把ν_0与2Δ的比值定义为Q[21]:

$$Q=\frac{\nu_0}{2\Delta}\,, \quad (2)$$

其中, Q表征给定分量峰的宽窄程度, Q越大功率密度谱上的峰越尖锐. 一般, $Q>2$的峰就是QPO, 反之, $Q\leqslant 2$的峰为噪声.

3 结果

3.1 光变曲线

图1展示了MAXI J1535−571在2017年9月爆发期内的光变曲线, 图中标注了HE、ME和LE探测器的计算能段. 从图1中看出, LE的计数率由最开始MJD 58002时的低水平位置缓慢上升, 然后在MJD 58017时达到峰值~2697 cts/s, 最后保持稳定在这一水平位置附近; ME的计数率从MJD 58002时的~250 cts/s上升到MJD 58014时的~539 cts/s, 然后到MJD 58015时骤降到~288 cts/s, 此时爆发源进入软中间态, 最后是出现了几次上下波动. HE的计数率在早期是下降的一个阶段, 随后的变化基本与ME保持一致. 当源从低硬态过渡到硬中间态, LE和ME的计数率整体是一个上升的阶段, 而HE则恰恰相反, 且HE的计数率整体呈下降趋势.

3.2 功率密度谱

我们研究了黑洞双星MAXI J1535−571在爆发期内“慧眼”卫星的观测数据, 并且计算了它们的功率密度谱. 研究发现, 功率密度谱的谱型与它所处的爆发谱态有关, 在同一爆发谱态下的功率密度谱的谱型相差不大, 不同爆发谱态下的功率密度谱差异较明显. 为了了解源在爆发期内功率密度谱的变化情况, 我们选取了在不同爆发谱态下具有代表性的多个功率密度谱. “慧眼”卫星在2017年9月的观测数据未能完整记录源的爆发过程, 缺少高软态的数据. 图2给出了源在低硬态、硬中间态和软中间态的功率密度谱(未减去白噪声).

从图2中能看出, 从低硬态到软中间态的功率呈现下降的趋势, 且低硬态的QPO成分不是很明显, 有很强的限带噪声. 硬中间态除了QPO成分以外, 还包含有谐频和高、低限带噪声成分. 软中间态的功率密度谱在QPO成分的前面有一个很显著的鼓包成分, 提高了整体光变的变化幅度.

3.3 特征频率

根据3.2节总结的功率密度谱特点, 我们可以使用多个洛伦兹函数拟合功率密度谱. 从谱型中能看出, 硬中间态的功率密度谱在低频端呈现明显的截断现象. 因此, 硬中间态的功率密度谱的低频限带噪声成分可以采用中心频率为0的洛伦兹函数拟合. 根据Belloni等[21]的定义, 各成分的特征频率$\nu_{\max}=\sqrt{{\nu_0}^2+\Delta^2}$, 其中$\nu_0$是中心频率, Δ是半高

全宽. 对于限带噪声成分, 令$\nu_0 = 0$, 即限带噪声的特征频率也是截断频率. 在图3中我们给出了低频限带噪声的特征频率$\nu_{\rm b}$随能量的演化关系. 结合图中的信息能发现, 低频限带噪声的特征频率在1–3 Hz位置附近, 且随能量的上升有逐渐升高的趋势. 图3观测号的缩写定义见表1.

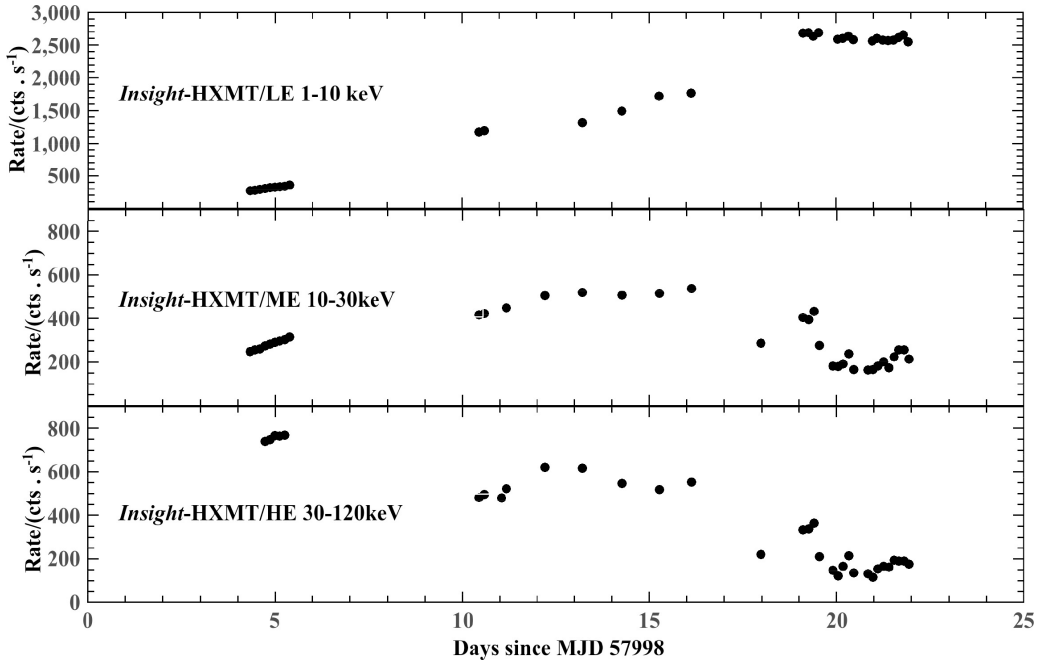

图 1　MAXI J1535−571在2017年9月爆发的光变曲线, 其中LE: 1–10 keV, ME: 10–30 keV, HE: 30–120 keV, 每个点对应一次观测.

Fig. 1　Light curve of MAXI J1535−571 outburst in September 2017, where LE: 1–10 keV, ME: 10–30 keV, HE: 30–120 keV, each point represents one observation.

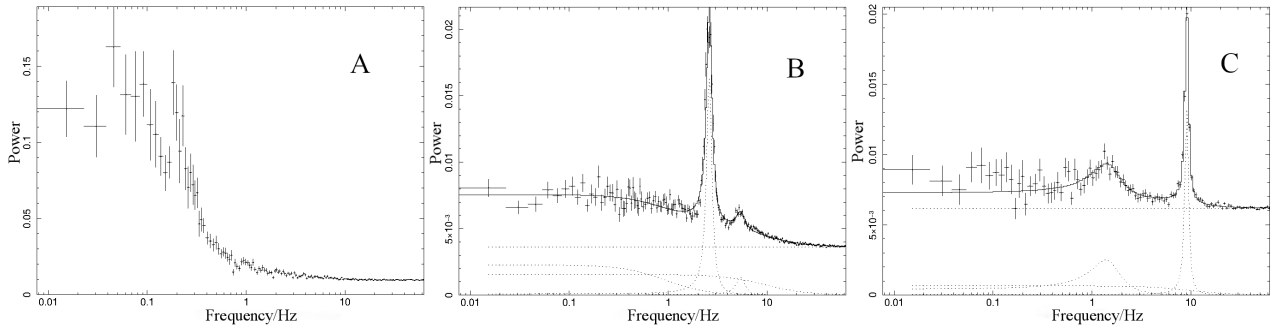

图 2　各爆发谱态下的功率密度谱. A、B和C分别对应低硬态(观测号P011453500101)、硬中间态(观测号P011453500145)和软中间态(观测号P011453500901)的功率密度谱.

Fig. 2　Power density spectrum for each outburst state. A, B and C correspond to LHS, HIMS, SIMS, respectively, and the corresponding observation ID are P011453500101, P011453500145, P011453500901.

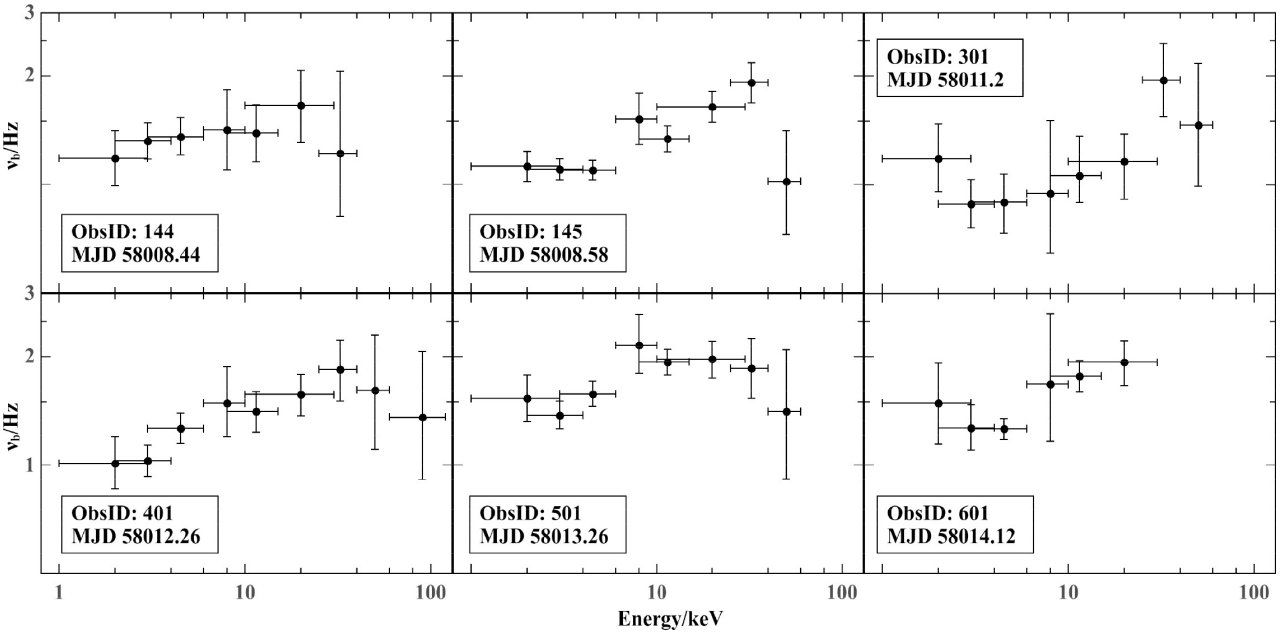

图 3 低频限带噪声的特征频率与能量的依赖关系

Fig. 3 Energy dependence of the characteristic frequency of low frequency band-limited noise

3.4 QPO与限带噪声的RMS谱

如3.2节所述, 当谱态由硬中间态过渡到软中间态时, 功率密度谱谱型发生明显的改变, 功率密度谱1 Hz附近有一个洛伦兹鼓包的成分出现, 提高了光变幅度, 使得功率密度谱的总RMS增加. 因此, 我们集中讨论功率密度谱截断前的成分, 即0.1–0.5 Hz频率区间内限带噪声的RMS谱演化, 以避开功率密度谱中其他成分对限带噪声观测性质的影响, 考虑到背景对RMS的贡献, 则RMS的计算公式[24]: $\mathrm{RMS}=\sqrt{P}(S+B)/S$. 其中$S$和$B$分别代表源和背景的平均计数率, P是洛伦兹函数在频率上的积分. 然后, 我们分能段计算限带噪声的RMS. 图4给出了限带噪声的RMS随能量的分布情况. 根据图中的特征信息能看出, 当源从硬中间态过渡到软中间态(观测号901、902和903)时, 限带噪声RMS谱呈现明显的演化. 当源处在硬中间态, 限带噪声RMS谱在6 keV附近存在明显的鼓包, 在小于6 keV时随能量增加逐渐上升, 在6–30 keV时逐渐下降, RMS在高能处保持相对稳定. 当谱态进入软中间态, 限带噪声RMS谱的鼓包消失, RMS峰值由6 keV过渡到10 keV.

Huang等[9]给出了MAXI J1535−571在2017年爆发时C型QPO的RMS谱. 给出的所有C型QPO的RMS谱型在硬中间态和软中间态保持一致且随能量呈现上升的趋势, 并在高能端保持稳定, 我们同样给出了一致的结果. 图5是C型QPO的RMS谱, 结合限带噪声RMS谱可以看出, 限带噪声的RMS谱与QPO的RMS谱谱型存在明显差异, 并且限带噪声的RMS谱存在一定的谱态依赖. 图4和图5观测号的缩写同表1.

表2给出了MAXI J1535−571爆发时的C型QPO的参数. 结合表中的信息可以看出, 当源从硬中间态过渡到软中间态, C型QPO的中心频率有增加的趋势, 除了301和903这两个观测号, 且软中间态QPO的RMS普遍比处于硬中间态的RMS高.

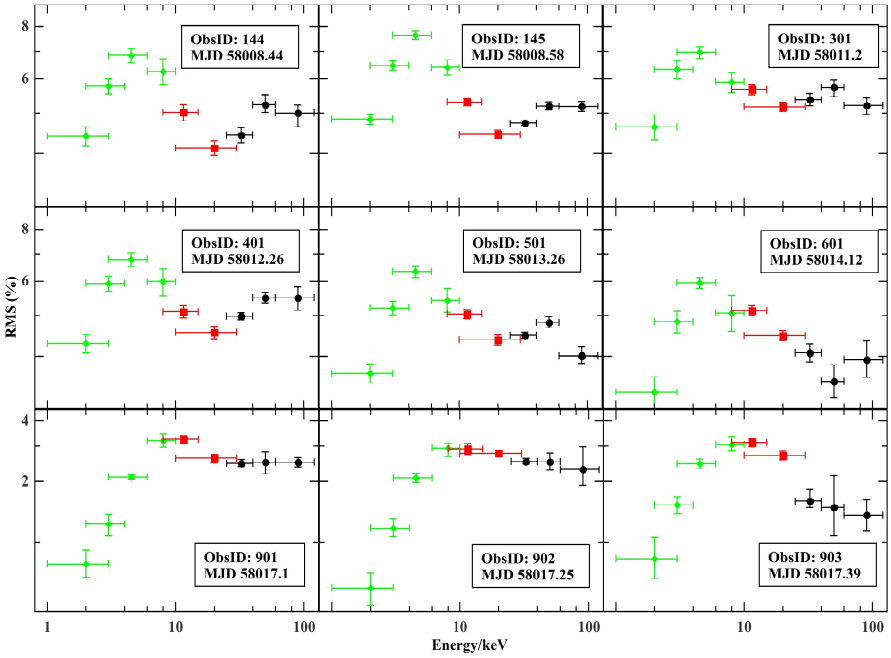

图 4 限带噪声的RMS谱. 绿色、红色和黑色的数据点分别对应LE、ME和HE的数据.

Fig. 4 RMS spectrum of band-limited noise. The green, red and black points represent LE, ME, and HE data, respectively.

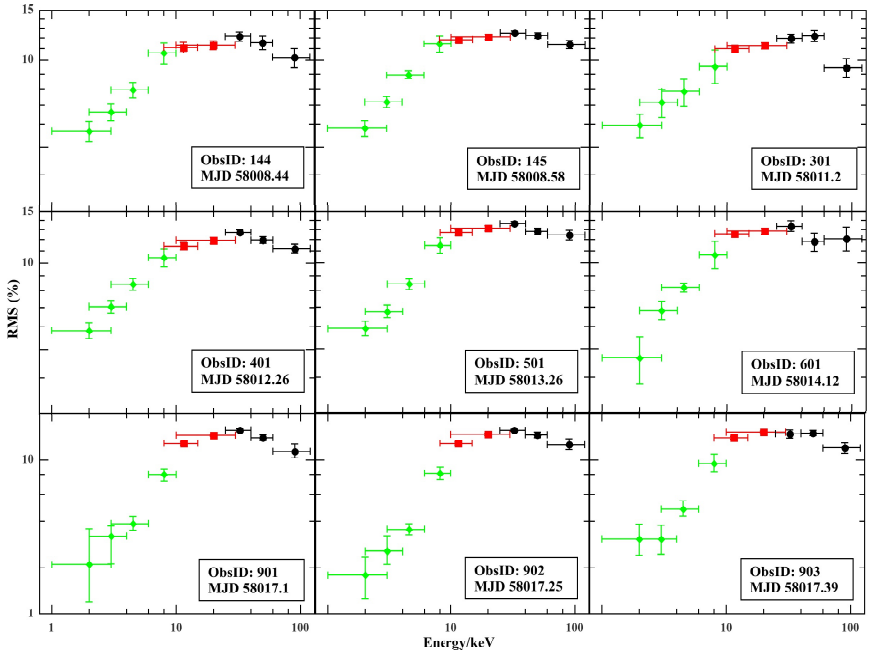

图 5 C型QPO的RMS谱. 绿色、红色和黑色的点分别对应LE、ME和HE的数据.

Fig. 5 RMS spectrum of type-C QPO. The green, red and black points represent LE, ME, and HE data, respectively.

表 2 MAXI J1535−571 C型QPO的参数
Table 2 Parameters of MAXI J1535−571 type-C QPO

ObsID[a]	Type[b]	QPO ν[c](Hz)	Q[c]	RMS[c](%)
144	C	$2.57^{+0.01}_{-0.01}$	$9.65^{+1.08}_{-0.97}$	$11.31^{+0.42}_{-0.42}$
145	C	$2.63^{+0.01}_{-0.01}$	$6.14^{+0.33}_{-0.31}$	$12.08^{+0.24}_{-0.24}$
301	C	$2.07^{+0.01}_{-0.01}$	$8.84^{+0.6}_{-0.66}$	$11.27^{+0.29}_{-0.31}$
401	C	$2.76^{+0.01}_{-0.01}$	$11.56^{+0.79}_{-0.7}$	$11.93^{+0.29}_{-0.29}$
501	C	$3.34^{+0.01}_{-0.01}$	$10.06^{+0.58}_{-0.55}$	$13.14^{+0.28}_{-0.29}$
601	C	$3.34^{+0.01}_{-0.01}$	$9.81^{+0.58}_{-0.54}$	$12.83^{+0.29}_{-0.3}$
901	C	$9.07^{+0.02}_{-0.02}$	$11.0^{+0.54}_{-0.48}$	$14.52^{+0.26}_{-0.26}$
902	C	$9.28^{+0.03}_{-0.03}$	$10.1^{+0.45}_{-0.43}$	$14.71^{+0.29}_{-0.29}$
903	C	$8.39^{+0.03}_{-0.03}$	$6.18^{+0.16}_{-0.15}$	$15.22^{+0.29}_{-0.28}$

[a] P011453500XXX;

[b] Following Huang et al.[9];

[c] QPO frequency, Q, and RMS were computed from ME detector in the energy band 10–30 keV.

4 讨论

“慧眼”卫星的宽能段、高灵敏度的优势, 给了我们机会去研究黑洞X射线双星系统中秒量级的时变特征. 于2017年, 对MAXI J1535−571的观测中, 全面覆盖了硬中间态和软中间态阶段, 并检测到了低频QPO的存在. 在本文中, 我们主要集中研究C型QPO的功率密度谱特征.

黑洞X射线双星中, 关于QPO和噪声的起源一直存在争论. Ingram等[25]给出了一种合理的模型—基于截断盘基础上发展起来的理论. 在爆发软态之前, 吸积盘截断于最内稳定轨道以外. 在截断半径以内存在着几何厚、光学薄的热内流(冕), 由于黑洞自转轴和盘自转轴存在一定角度, 在广义相对论的惯性系拖曳效应影响下, 热内流绕黑洞自转轴发生Lense-Thirring进动, 产生流量调制, 由此产生了QPO. QPO的频率与截断半径有关, 随着内半径的逐渐减小, QPO频率逐渐上升. 吸积流的波动在热内流上的传播被用来解释功率密度谱中噪声的起源[26]. 功率密度谱中的低频截断频率与截断盘内半径的粘滞频率吻合. 相比于高频噪声, 低频噪声可能来自于相对靠外的区域, 更加靠近冷盘. 因此QPO与低频噪声的性质应当存在明显的差异, 不仅因为起源不同, 而且还有产生的区域差异.

首先, 我们研究了功率密度谱的特性. 研究发现, 在同一爆发谱态下, 功率密度谱的谱型保持一致, 但是低频限带噪声的特征频率存在明显变化. 低频限带噪声的特征频率随着能量的上升特征频率逐渐向更高的频率移动, 如图3所示. Stiele等[27]通过两个能段的比较发现, 对于不同的源, 软能段的特征频率小于硬能段的特征频率. 我们对比MAXI J1535−571的结果, 进一步证实了这一研究成果, 并大大拓宽了观测能段. 特征频率随能量的单调演化, 为研究爆发过程中盘冕结构提供了可靠的探针.

基于“慧眼”宽能段的特点, 我们给出了宽能段情况下0.1–0.5 Hz频率区间内限带噪声RMS谱的结果, 对于硬中间态, 高能端的RMS相对于峰值较低, 过渡到软中间态时这一趋势发生反转, 这一结果符合黑洞双星XTE J1650−500的RMS谱演化情况. 通过改变能谱参数, Gierliński等[8]还原出不同谱态下RMS谱的形状. 研究表明, 对于硬态谱/硬中间态, RMS谱型受种子光子的影响较大, 因此RMS谱在高能端下降. 但是对于软态/软中间态, 流量的调制由康普顿化的冕主导, 因此在高能端有相对高的RMS.

值得注意的是, 在硬中间态的限带噪声RMS谱呈现明显的峰状结构, 且限带噪声RMS谱的峰值维持在6 keV附近, 当谱态过渡到软中间态时, 限带噪声RMS谱的峰值移动到10 keV以上, 且在高能端维持较高的RMS. 通过对比Kong等[28]拟合的能谱, 峰值能量大致符合Gierliński等[8]的经验结果, 即15倍盘温.

研究还发现, 在谱态由硬中间态过渡到软中间态, C型QPO的RMS谱谱型始终保持一致, 但限带噪声RMS谱呈现明显变化, 存在谱态依赖. 这暗示着限带噪声和QPO有不同的起源机制. 限带噪声RMS谱的谱态依赖反映在爆发过程中盘冕结构的演化或者盘本身性质的改变上, 限带噪声RMS谱可能成为反映盘冕性质的重要探针.

5 总结

基于“慧眼”卫星宽能段的数据, 我们首次给出了MAXI J1535−571宽能段功率密度谱的性质和限带噪声的研究. 这一结果拓展了之前对黑洞双星系统中功率密度谱及噪声的认识. 当源处于不同的爆发谱态时, 计算出的功率密度谱有较大的差异, 且在软中间态的低频处有一个明显的鼓包成分, 增大了光变的变化幅度. 硬中间态低频限带噪声的特征频率在1–3 Hz频率, 且随能量增加有逐渐上升的趋势, 这一现象与之前报道的黑洞双星系统趋势一致, 并且拓宽了观测的能段. 给出的0.1–0.5 Hz频率范围的限带噪声RMS谱在硬中间态和软中间态均出现峰值的情况, 且在高能端RMS的表现存在差异, 这一结果可以理解为在不同谱态下, 主导噪声RMS的能谱成分占比不同. 研究还表明, 不同于QPO的RMS谱, 限带噪声RMS谱呈现明显的谱态依赖, 对噪声RMS谱随谱态演化的研究, 可能成为研究盘冕演化的重要工具.

参 考 文 献

[1] Shakura N I, Sunyaev R A. A&A, 1973, 24: 337
[2] Casella P, Belloni T, Homan J, et al. A&A, 2004, 426: 587
[3] Casella P, Belloni T, Stella L. ApJ, 2005, 629: 403
[4] Belloni T M, Motta S E, Muñoz-Darias T. BASI, 2011, 39: 409
[5] Belloni T M, Stella L. SSRv, 2014, 183: 43
[6] Motta S, Belloni T, Homan J. MNRAS, 2009, 400: 1603
[7] Van Der Klis M. NATO ASI C Proc, 1998, 515: 337
[8] Gierliński M, Zdziarski A A. MNRAS, 2005, 363: 1349
[9] Huang Y, Qu J L, Zhang S N, et al. ApJ, 2018, 866: 122
[10] You B, Bursa M, Życki P T. ApJ, 2018, 858: 82
[11] Negoro H, Ishikawa M, Ueno S, et al. ATel, 2017, 10699: 1
[12] Chauhan J, Miller-Jones J C A, Anderson G E, et al. MNRAS, 2019, 488: L129
[13] Miller J M, Gendreau K, Ludlam R M, et al. ApJ, 2018, 860: L28
[14] Russell T D, Miller-Jones J C A, Sivakoff G R, et al. ATel, 2017, 10711: 1
[15] Xu Y J, Harrison F A, García J A, et al. ApJ, 2018, 852: L34
[16] Zhang S, Lu F J, Zhang S N, et al. SPIE, 2014, 9144: 914421
[17] Zhang S N, Li T P, Lu F J, et al. SCPMA, 2020, 63: 249502
[18] Belloni T M. States and Transitions in Black Hole Binaries//Belloni T. The Jet Paradigm. Berlin: Publisher, 2010: 53
[19] Miyamoto S, Kimura K, Kitamoto S, et al. ApJ, 1991, 383: 784
[20] Ingram A, Done C. MNRAS, 2012, 419: 2369
[21] Belloni T, Psaltis D, Van Der Klis M. ApJ, 2002, 572: 392
[22] Ingram A R, Motta S E. NewAR, 2019, 85: 101524
[23] Belloni T, Hasinger G. A&A, 1990, 230: 103
[24] Bu Q C, Chen L, Li Z S, et al. ApJ, 2015, 799: 2
[25] Ingram A, Done C, Fragile P C. MNRAS, 2009, 397: L101
[26] Ingram A, Done C. MNRAS, 2011, 415: 2323
[27] Stiele H, Yu W. MNRAS, 2015, 452: 3666
[28] Kong L D, Zhang S, Chen Y P, et al. JHEAp, 2020, 25: 29

The Temporal Phenomena during the Outburst of the Black Hole Candidate MAXI J1535−571

LI Chao[1] WANG Peng-ju[2] LI Xiao-bo[2] YANG Xue-juan[1] XIAO Hua-ping[1]

(1 School of Physics and Optoelectronics, Xiangtan University, Xiangtan 411105)
(2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Using the observations of the black hole candidate MAXI J1535−571 by the Hard X-ray Modulation Telescope (*Insight*-HXMT) in September 2017, the temporal phenomena of the source during the outburst period are studied. There are significant differences in the power density spectra when the

source is in different outburst states. And in the hard intermediate state, there are obvious band-limited noise components and QPO (Quasi-Periodic Oscillation) components. The analysis results show that the characteristic frequency of low frequency band-limited noise is positively correlated with the energy, i.e. the characteristic frequency of photons in soft energy band is less than that in hard energy band. The band-limited noise RMS (Root Mean Square) spectra in the 0.1–0.5 Hz show peaks in both the hard and soft intermediate states, and there are differences at the high energy, probably due to the ratio of the energy spectrum components of the dominant noise RMS is different. The type-C QPO RMS spectrum maintains a similar trend when the spectral state is from the hard intermediate state to the soft intermediate state. But there is a spectral state dependence in the band-limited noise RMS spectrum, implying that the noise and QPO have different mechanisms of origin.

Key words X-rays: binaries, accretion disk: quasi-periodic oscillation (QPO), noise