

黑洞暂现源XTE J1650-500 在2001—2002年爆发期的时变现象*

肖广成^{1†} 李子建¹ 闫林丽¹ 卢宇¹ 陈黎² 屈进禄^{1‡}

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(2 北京师范大学天文系 北京 100875)

摘要 采用RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer)卫星数据研究了黑洞暂现源XTE J1650-500在2001—2002年爆发的时变现象. 采用傅里叶频域上的时延分析方法, 研究了该源在3个特征傅里叶频率范围—宽限噪声、红噪声及准周期振荡(Quasi-Periodic Oscillation, QPO)内的时变特征. 这3个频率区间(时间尺度)的特征及演化行为可能分别由不同的吸积区域主导. 一般认为时间尺度越小, 对应吸积区域越靠内. 由此结合黑洞爆发所处的吸积态讨论了所得的结果, 给出了所得观测现象对吸积盘与吸积流的演化行为的观测限制. 研究表明, 扰动传播模型可以对QPO频率范围内的各种时变特征给出较好的解释, 而宽限噪声和红噪声频率范围内的时变现象(包括对可能存在的拐点)尚无良好模型对应, 人们对黑洞最内吸积区域的性质及其演化的认识有待提高.

关键词 X射线; 双星, 吸积, 吸积盘; 准周期振荡, 时间延迟

中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

河内X射线辐射主要来源于双星系统中致密星的吸积过程, 致密星可以是黑洞或中子星. 大多数黑洞X射线双星系统为暂现源. X射线暂现源一般在相当长的时间内处于低光度的状态, 然后在数月数年的时间内经历一个爆发周期. 在爆发周期内, 其X射线光度在数天内上升2-3个数量级, 在高光度水平持续十几天到数月后逐渐衰减到爆发前的水平.

黑洞暂现源在爆发期内具有丰富的时变现象和吸积态变化. 根据X射线辐射的时变和谱变化, 可以将一个爆发周期分为5个不同阶段, 即暂现源的5个态: 宁静态、低硬态、硬中间态、软中间态和高软态^[1-2].

一个完整的X射线暂现源爆发一般经历从宁静态→低硬态→硬中间态→软中间态→高软态→软中间态→硬中间态→低硬态→宁静态的过程. 河内黑洞暂现源宁静

2016-05-13收到原稿, 2016-08-27收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11543008, 11503027)资助

[†]xiaogc@ihep.ac.cn

[‡]qujl@ihep.ac.cn

态的X射线光度($L_X = 10^{30.5} - 10^{33.5} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$)约为 $10^{-8.5} - 10^{-5.5} L_{\text{Edd}}$. 低硬态(LHS, $L_X \sim 0.01 - 0.08 L_{\text{Edd}}$)的X射线谱一般可以由标准薄盘多色黑体辐射谱的热成分和占主导地位的非热成分组成, 能观测到强的射电辐射、强的X射线光变(两者存在一定相关性^[3]), 其相对rms幅度(fractional rms)可达百分之十几到40%, 偶尔观测到准周期振荡(Quasi-Periodic Oscillation, QPO)现象^[4]. 硬中间态(HIMS, $L_X \sim 0.08 - 0.09 L_{\text{Edd}}$)的光度略有增加, 由于盘成分的增加与非热成分增大导致谱逐渐变软, 光变幅度下降, 常常观察到C型QPO. 软中间态(SIMS, $L_X > 0.2 L_{\text{Edd}}$)仍有强的热和非热辐射, 谱变得更软, 功率密度谱上的宽限噪声(Band limited noise, BLN)由非热形式取代, 光变幅度变弱, 可能出现B或A型QPO. 高软态(HSS, $L_X \sim 0.09 - 0.5 L_{\text{Edd}}$)的谱由热成分主导, 射电辐射弱, 光变幅度很弱, 一般观测不到QPO现象^[5-6].

黑洞暂现源XTE J1650-500于2001年9月由RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer)卫星上的ASM (All Sky Monitor)探测器发现, 在2001年9月至2002年1月经历了一次完整的爆发. Orosz等^[7]采用光学望远镜观测得到致密星伴星为K3 V-K5 V型, 质量函数为 $(2.73 \pm 0.56) M_{\odot}$, 轨道倾角为 $50^{\circ} \pm 3^{\circ}$, 致密星质量上限为 $7.3 M_{\odot}$. 在整个爆发期内, 该源展示了丰富的能谱特征和时变现象: Miller等^[8]发现其能谱中存在相对论性展宽铁线, 推测致密星可能为极端克尔黑洞; Corbel等^[9]分析了该源射电辐射的起源; Homan等^[10]研究了其高频QPO的演化特征; 另外Tomsick等^[11]发现了该源的短时标($\sim 100 \text{ s}$) X射线耀斑; Kalemci等^[12]在XTE J1650-500的爆发衰减期发现了4-9 Hz的低频QPO. 这些丰富的研究为模型的构建提出了很多限制条件.

不同能段X射线辐射的相关性可以提供致密天体辐射的信息, 利用RXTE对XTE J1650-500在2001—2002年爆发期间的观测, 通过研究X射线辐射的相关性、功率密度谱, 探索X射线暂现源的辐射机制和吸积盘结构, 为进一步的理论研究提供观测基础. 本文第2部分介绍RXTE卫星及相关数据处理过程, 概述了时变分析方法及暂现源的爆发行. 第3部分给出了时变研究的结果. 第4部分在“截断盘+热内流”的模型框架下, 结合现有的时延机制, 讨论了所得结果. 第5部分对我们的研究结果进行了总结.

2 观测与数据分析

2.1 卫星与数据处理简介

RXTE卫星于1995年12月30日由Delta II火箭发射升空, 在轨运行16 yr. RXTE卫星的科学仪器主要有3组: (1)大面积、高时间分辨(最高可达 $1 \mu\text{s}$)、覆盖范围广的正比计数阵列(Proportional Counter Array, PCA, 2-60 keV), 该探测器共含5个正比计数器单元(Proportional Counter Unit, PCU), 其中PCU2一般处于工作状态; (2)高能X射线时变探测器(High Energy X-ray Timing Experiment, HEXTE, 15-250 keV); (3)全天监测器(2-12 keV).

时变分析采用时间分辨率为 $125 \mu\text{s}$ 的Event事例数据, 计数率取自RXTE上PCA的全部工作的PCU探测器. 对于每个观测号, PCA数据时间长度为1-2 ks. 由于本文的研究不涉及千赫兹QPO的研究, 考虑到低频QPO的频率范围一般为0.1-30 Hz, 因此我们对数据重新并道提取分辨率为 2^{-7} s ($\sim 7.8 \text{ ms}$)的光变曲线(傅里叶时延方法要求采样间隔为等时间隔). 同时在计算中为了提高信噪比, 将光变曲线统一截成32 s的小段, 对各

段分别计算相关的物理量, 然后取平均并计算误差.

2.2 数据分析方法

功率密度谱的计算采用Heasoft软件包中的powspec命令, 使用Leahy归一化^[13]. 宽限噪声和QPO可用洛伦兹函数拟合. 本文给出了置信度为 1σ 的拟合参数误差.

相干函数(Coherence Function)用来计算两列同时采集的数据在频域上的相关性. 在天文数据分析中, 可以用相干函数检验高能道和低能道光变曲线在各时间尺度上的相关性. 相干函数定义如下^[14]:

$$\gamma^2(f) = \frac{|\langle S^*(f)H(f) \rangle|^2}{\langle |S(f)|^2 \rangle \langle |H(f)|^2 \rangle}, \quad (1)$$

根据定义有 $0 \leq \gamma^2(f) \leq 1$, 1表示高能道和低能道光变曲线完全相关, 0表示完全不相关. $S(f)$ 和 $H(f)$ 分别表示低能道和高能道光变曲线的傅里叶变换, 星号表示变换式的共轭, 尖括号表示对各段光变曲线和并道范围内所有频率对应点求平均. 误差计算公式为^[14]:

$$\delta\gamma^2(f) = \frac{\sqrt{2}\gamma^2(f)[1 - \gamma^2(f)]}{|\gamma(f)|\sqrt{n}}, \quad (2)$$

上式中 $n = M \times N$ 是参与平均的点数, M 为参与并道的频率数, N 为光变曲线所截段数. 对于RXTE观测卫星数据, 一般认为在高于30 Hz频率段, 相干性很差. 本文采用van der Klis的方法消减高频噪声^[15], 将交叉相关矩阵(见下文)中高于40 Hz的所有频率对应点分段求平均, 然后在各段低于40 Hz的频率对应点减去上述对应的平均值. 该高频减噪方法也适用于相位延迟和时间延迟的计算.

频域上的相位延迟(Phase lag)表征两条时间序列在不同频段上的相位延迟情况, 计算公式如下: $\phi(f) = \arg[C(f)]$, 其中

$$C(f) = \langle S^*(f)H(f) \rangle \quad (3)$$

为交叉相关矩阵. 误差计算采用如下公式:

$$\Delta\phi(f) = \frac{1}{2} \sin(2\phi(f)) \left(\left| \frac{\Delta \operatorname{Re}\langle C(f) \rangle}{\operatorname{Re}\langle C(f) \rangle} \right| + \left| \frac{\Delta \operatorname{Im}\langle C(f) \rangle}{\operatorname{Im}\langle C(f) \rangle} \right| \right), \quad (4)$$

其中 $\operatorname{Re}\langle C(f) \rangle$ 和 $\operatorname{Im}\langle C(f) \rangle$ 分别为交叉功率密度谱的实部和虚部.

时间延迟(Time lag) $\tau(f) = \phi/(2\pi f)$ 表征高低能道光子到达卫星探测器的时间差, 误差 $\Delta\tau(f) = \Delta\phi/(2\pi f)$, $\tau(f) > 0$ 称为硬时延, 表示硬X射线光子滞后软X射线光子到达探测器, $\tau(f) < 0$ 称为软时延, 表示软X射线光子滞后硬X射线光子到达探测器.

本文主要研究黑洞暂现源在爆发期间所处各态的功率密度谱、相干函数和时间延迟特征及演化. 所研究频段分为3个: 宽限噪声(0.03–0.8 Hz)、红噪声(7.5–10 Hz)和QPO频率范围. 上述3个成分的频率范围具体选取将在第3部分各对应小节给出详细说明.

2.3 整体爆发行为

为了从整体上分析这次爆发情况, 图1 (A)给出了RXTE卫星上的ASM全天探测器的光变曲线, 它的时间分辨率为1 d. 对应每个观测号, 图1 (B)也给出了PCU2探测单元

的平均计数演化图. 图1 (C)给出了整个爆发期间由每个观测号计算所得的硬度比演化图, 硬度比计算取自6.3–8.4 keV (绝对能道14–19)与2.1–5.8 keV (绝对能道0–13)光子流量之比. 对于爆发期间暂现源所处各态, 按时间排列将其分为6段: 低硬态(LHS)、硬中间态(HIMS)、软中间态(SIMS)、高软态(HSS)、硬中间态(HIMS)及低硬态(LHS)^[12].

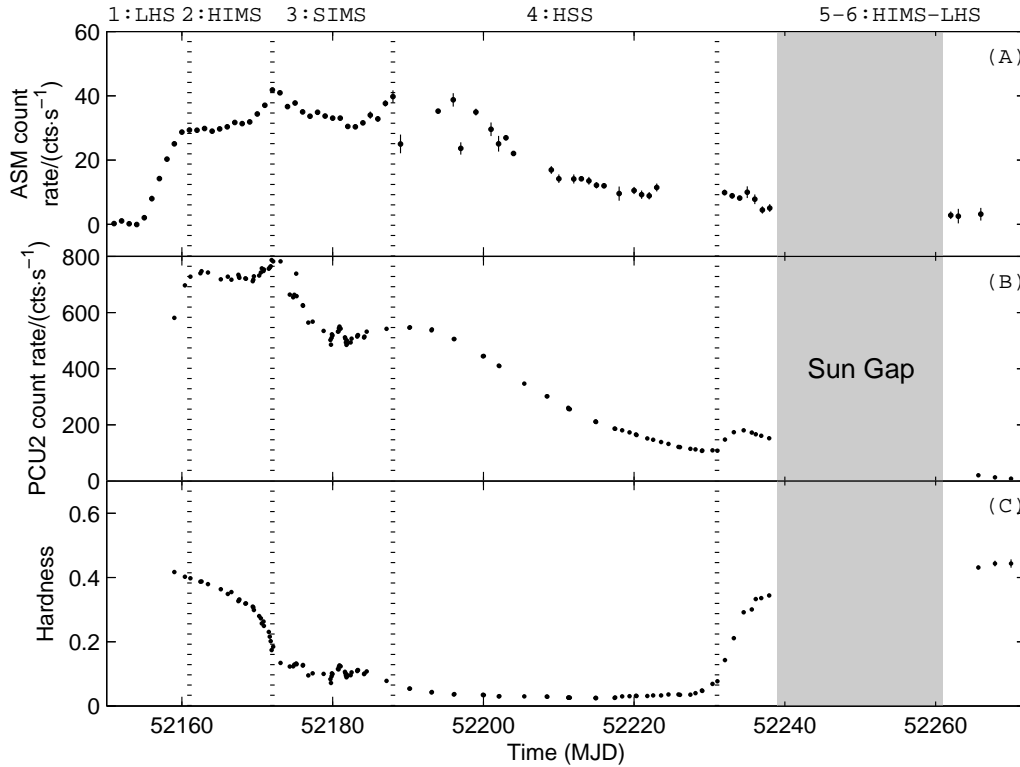


图1 光变曲线与硬度比演化图. (A): PCA/ASM探测器给出的以天为单位的光变曲线. (B): PCU2探测单元给出的光变曲线. (C): 硬度比演化图, 硬度比计算取自6.3–8.4 keV与2.1–5.8 keV光子流量之比. 3幅子图中的每个点都对应一个观测号. 暂现源的爆发分4个态, 分别为低硬态(LHS)、硬中间态(HIMS)、软中间态(SIMS)、高软态(HSS). QPO主要出现在硬中间态. 观测后期因太阳遮挡暂停观测.

Fig. 1 Light curves and hardness evolution diagram. Panel A: light curve from the PCA/ASM detector with time resolution of one day. Panel B: light curve from RXTE/PCU2. Panel C: hardness evolution diagram in which hardness is the photon flux ratio between 6.3–8.4 keV and 2.1–5.8 keV. Each point corresponds to one observation in 3 panels. The outburst of the transient show 4 states, namely low-hard state (LHS), hard intermediate state (HIMS), soft intermediate state (SIMS), and high-soft state (HSS). QPOs mainly appear in HIMS. The observation was paused for the sake of protecting the satellite from the sun in the observational later stage.

图2给出了暂现源在爆发期间的硬度比–强度图(HID), 图中每个点对应一个PCA观测号数据计算结果. HID可作为识别暂现源爆发期吸积态及分析其演化的依据. 与图1中各吸积态的对应已用阿拉伯数字标示.

在低硬态, 随X射线流量上升, 硬度比略有下降, 其对应HID上1区. 硬中间态对应HID图上2区, X射线流量继续升高了约30%, 硬度比显著降低. 在软中间态, PCA观测显示X射线流量下降, 硬度比维持在0.2以下的低水平, 在HID图上对应3区. 在高软态, X射线流量缓慢下降, 硬度比达到最低水平约0.05, 在HID图上对应4区. 随后在源从高软态转向低硬态的过程中, 受到太阳影响, 出于对卫星探测器的保护, 约25 d没有对该源进行观测. 但在暂停观测前, 暂现源的谱硬度比开始上升, HID图显示源已进入硬中间态.

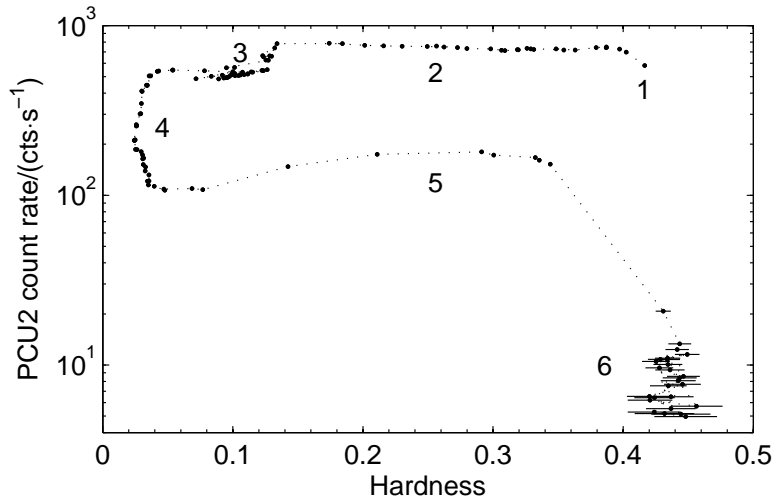


图2 HID图. 硬度比为6.3–8.4 keV与2.1–5.8 keV能段光子流量之比, 强度取自PCU2探测单元的2.1–8.4 keV光子计数率. X射线暂现源吸积态的划分可以清晰地HID图上反映出来.

Fig. 2 Hardness-intensity diagram. Hardness is the photon flux ratio between the 6.3–8.4 keV and 2.1–5.8 keV energy band. The intensity is the photon count rate in the 2.1–8.4 keV energy band. The accretion states can be distinguished from the HID.

从HID图上看, 右上角表示暂现源爆发起始阶段, 图2中的点随着时间推移沿逆时针方向到达右下角, 与Rossi等^[16]计算的结果类似, 所得差异来源于能道的选择不同. XTE J1650-500爆发期内的“q”形HID图与其他河内黑洞暂现源是类似的.

3 结果

3.1 暂现源在各吸积态的功率密度谱、相干函数及时间延迟

我们研究了暂现源XTE J1650-500在爆发期内135个PCA观测的数据, 计算了它们的功率密度谱、相干函数和时间延迟谱.

我们发现功率密度谱与黑洞暂现源的吸积态密切相关. 不同吸积态的功率密度谱差异明显, 而同一吸积态内的功率密度谱线型差异较小. 为分析其演化, 从不同吸积态中挑选典型的功率密度谱作代表. 图3给出暂现源在低硬态、硬中间态、软中间态及高软态的典型功率密度谱.

低硬态和硬中间态的典型功率密度谱由3个分量组成: 宽限噪声分量, 功率密度谱上表现为低频端(0.03–0.8 Hz)近似水平的高功率段, 可用中心频率为0的洛伦兹分量 L_0 拟合; 红噪声分量, 功率密度谱上表现为1–10 Hz范围内的可用幂律函数拟合的成

分; QPO分量, 数量不定, 可用洛伦兹函数拟合. 宽限噪声和红噪声的频率范围没有统一定义, 对应不同的暂现源(或者说不同的物理系统), 需要根据具体情况确定它们的主导区间. 一般在0 Hz到洛伦兹分量 L_0 的截止频率 f_b 区间内, 功率密度谱表现为近似水平的高功率段, 我们将其定义为宽限噪声区. 红噪声区虽然对应于功率密度谱上的幂律下降段, 但考虑到该段有QPO成分, 因此可以人为提高频率避开QPO成分. 这些分量的物理来源及其演化特征将在3.2–3.4节给出详细讨论. 本文主要研究的是这些频率范围内的时变现象.

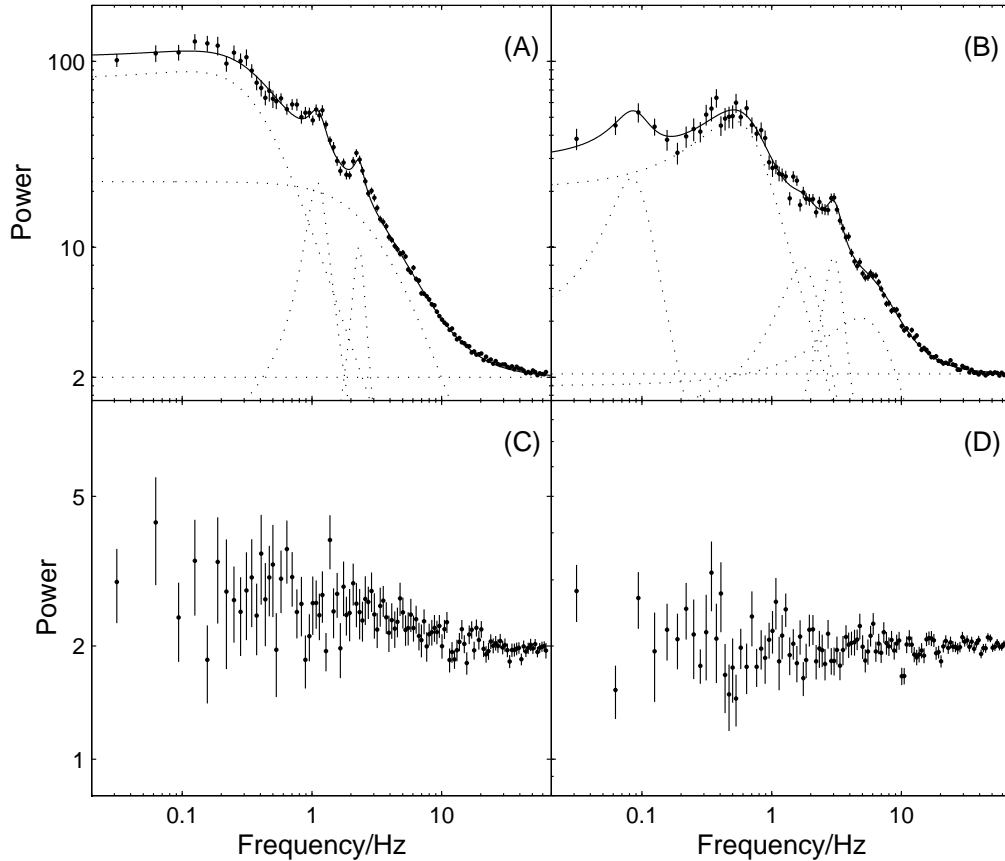


图 3 暂现源各吸积态的典型功率密度谱. (A)、(B)、(C)、(D)分别对应暂现源在低硬态(RXTE观测号60113-01-04-00)、硬中间态(60113-01-10-01)、软中间态(60113-01-19-06)和高软态(60113-01-33-00)下的功率密度谱.

Fig. 3 Typical PDS (Power Density Spectrum) for each accretion state. Panels (A), (B), (C), and (D) correspond to LHS, HIMS, SIMS, and HHS, respectively, and the corresponding observation IDs are 60113-01-04-00, 60113-01-10-01, 60113-01-19-06, and 60113-01-33-00.

从低硬态到高软态, 暂现源在各频率段的功率呈现下降的趋势, 光变幅度减弱. 低硬态及硬中间态可见明显的宽限噪声区, 硬中间态宽限噪声区相对于低硬态多了些复杂的结构, 这些复杂结构的出现可能与吸积盘的变化有关. 低硬态、硬中间态及软中间态都能见到红噪声现象. QPO现象主要在硬中间态被观测到. 高软态的功率密度谱近似白

噪声, 未能观测到宽限噪声、红噪声及QPO现象.

为了研究暂现源在各吸积态下低能道(2.1–5.8 keV)和高能道(6.3–8.4 keV)光变曲线间的相干性, 图4给出了暂现源在低硬态、硬中间态、软中间态及高软态的相干函数. 在低硬态和硬中间态, 暂现源两能道的光变曲线在低频端(小于2 Hz)展现出较高的相关性(相关系数大于0.7); 对于高频端(2–10 Hz), 相干系数随着频率的增大而减小; 在大于10 Hz的更高频段, 可认为不相关; 对于QPO频率范围, 相干系数有一定程度的增大, 与功率密度谱表现类似. 对于软中间态和高软态, 数据结果显示两能道光变曲线在各频率段相关性都非常低, 不适合做时间延迟分析, 这与Kalemci等^[12]的结论一致.

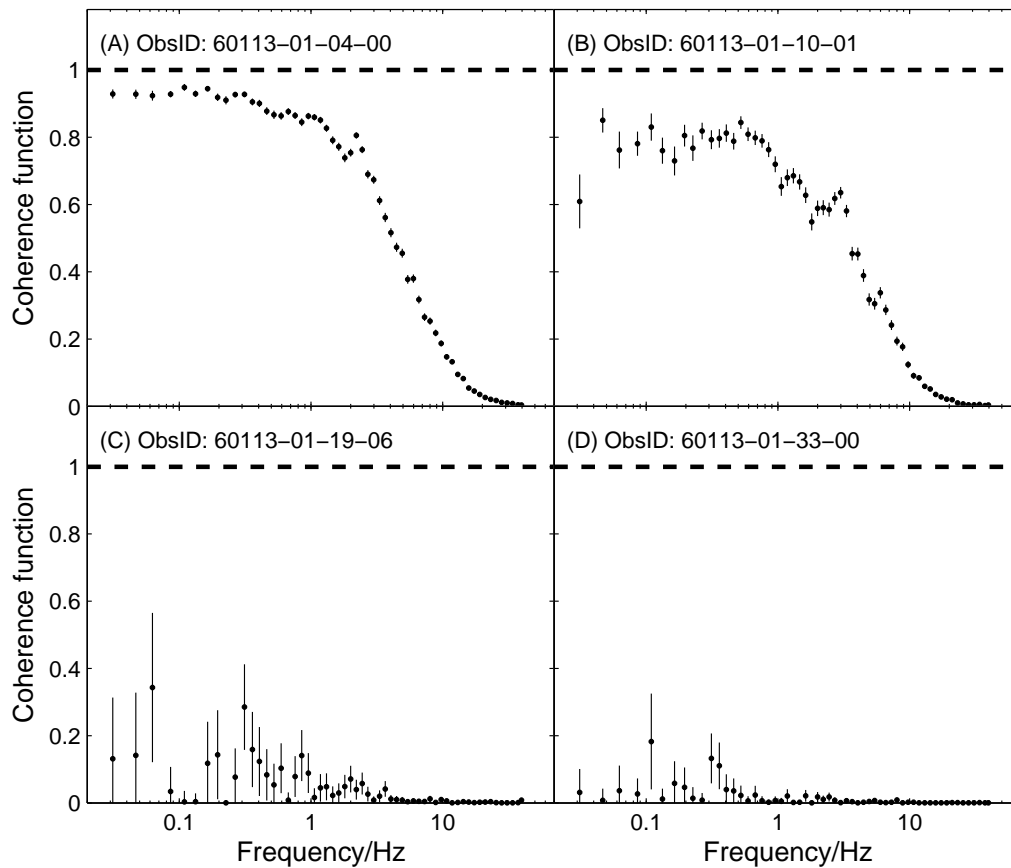


图4 暂现源在各吸积态下的相干函数. 观测号的选择与图3一致. 随着暂现源向高软态演化, 各个频率段的相关系数降低.

Fig. 4 Typical coherence function for each accretion state. The observations are selected the same as in Fig.3. With the energy spectrum getting softer, the coherence coefficient gets lower in each frequency range.

结合图3与图4, 我们发现暂现源的功率密度谱与相干函数有一定的相似性. 特别在高频端(> 10 Hz), 所有的功率密度谱光变都很弱, 同时光变曲线间的相干性也很弱.

图5给出暂现源在各态下的时间延迟谱, 其观测号与光变曲线的能道选取与图4一致. 暂现源在低硬态和硬中间态展现出依赖频率的硬时延特征. 与Cyg X-1展现的 $\tau(f) \propto f^{-0.79}$ 关系类似^[17], 由图5 (A)拟合给出 $\tau(f) \propto f^{-0.86 \pm 0.12}$ (95%的置信区间). 此外在低硬态下, 时间延迟谱上显示QPO频率范围内出现一个小鼓包.

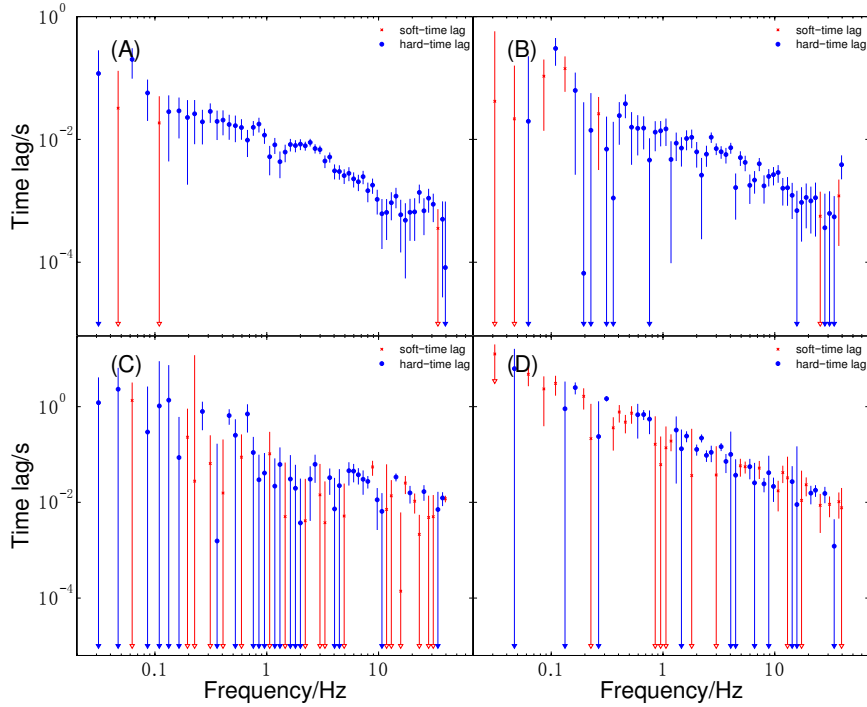


图 5 暂现源在各态下的时间延迟谱. 各子图对应的观测号及光变曲线能道的选择与图4一致.

Fig. 5 Typical time lag spectrum for each accretion state. The observation IDs and energy bands are the same as in Fig.4.

3.2 宽限噪声范围时变性质

暂现源处于低硬态与硬中间态时, X射线辐射光变很强, 其相对rms幅度可达40%–50%, 在功率密度谱上表现为“宽限噪声+红噪声+QPO”的3成分叠加. 功率密度谱不能用单一模型拟合, 一般用一个中心值为0左右的洛伦兹分量 L_0 拟合宽限噪声分量和其他几个洛伦兹分量 L_i 来拟合QPO分量. 图3 (A)中给出了一个宽限噪声 L_0 分量和一个中心值在2.3 Hz左右的QPO分量. 对于 L_0 分量, 我们把拟合给出的半高全宽(FWHM)的一半 Δ_0 称为截止频率. 为定出宽限噪声范围, 本文拟合了所有低硬态和硬中间态的功率密度谱, 取其中最小的 Δ_0 为宽限噪声频率上限, 由此定出宽限噪声频率范围0.03–0.8 Hz. 在这个频率范围内, 我们针对每个观测号把所要考虑的物理量(相干函数、相位延迟)求平均, 然后分析其演化规律及强度、硬度比的依赖性.

首先, 必须指出在HID图中, 能明显地区分低硬态和硬中间态, 两个吸积态间存在明显的拐点. 对于低硬态, 一般X射线流强迅速上升(XTE J1650-500爆发太过迅速而没有前期观测), 而硬度比有小幅下降, 流量为主要变量. 对于爆发前期的硬中间态(HID图的上水平分支), 强度小幅增大, 而硬度比迅速下降, 而爆发后期的硬中间态(HID图的下水平分支), 两者关系貌似相反, 但综合来看硬度比仍然为主要变量, 从这个角度看来, 这两个吸积态呈现的流量与硬度比的反相关关系是有区别的. 因此, 对于两个吸积态下宽限噪声和红噪声的研究, 我们把流量和硬度比作为两个独立的变量, 分别研究相关系数与相位延迟对它们的依赖.

图6展现了宽限噪声频段(0.03–0.8 Hz)相干系数的演化. 两能道宽限噪声区的相干系数在低硬态末期达到了最高点, 约0.9. 在硬中间态的前期, 相干函数一直处于比较高的水平(~ 0.8). 随后在向软中间态转变的过程中, 下降到0.1左右的水平. 在软中间态期间, 相干函数在0.1上下浮动, 保持在较低的水平. 而在进入高软态后, 相干函数接近于0, 可认为两能道的光变曲线不相干. 在暂现源再次转向硬中间态时, 相干函数快速上升. 最后, 在暂现源转向宁静态的过程中, 相干函数也再次下降到接近于0.

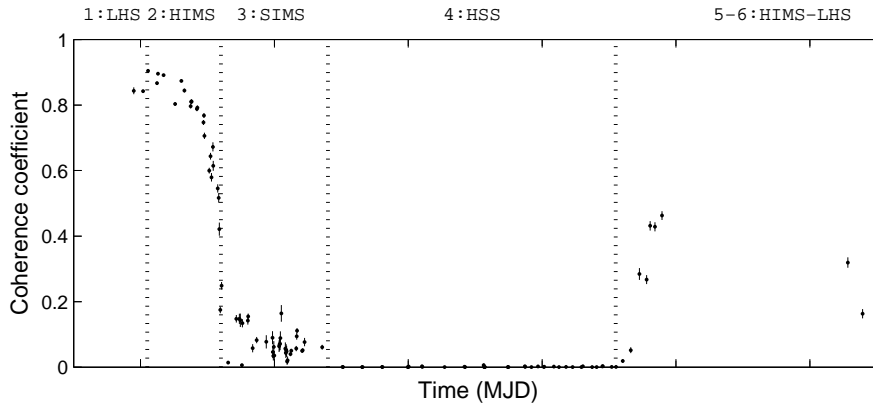


图6 宽限噪声频段(0.03–0.8 Hz)相干系数的演化图

Fig. 6 The coherence coefficient evolution diagram in the frequency range of band limited noise (0.03–0.8 Hz)

宽限噪声频率范围反映了X射线源的长时标光变, 而这种长时标光变很可能来源于吸积盘的外区演化. 为了分析吸积盘可能的演化行为, 我们研究了时间延迟随暂现源X射线流强及谱硬度比的变化情况. 图7中给出了低硬态与硬中间态下相干系数、相位延迟随PCU2计数率及硬度比的演化图. 总体来看, 对于低硬态与硬中间态, 宽限噪声频率范围相干系数随暂现源X射线流强的增大而减小, 随谱硬度比减小而减小; 相位延迟随吸积率增大而增大, 随谱硬度比的减小有一定程度的增大. 在低硬态与硬中间态, 暂现源流强与硬度比的变化一般被认为来源于吸积盘内热成分的变化, 由上述结果可见时间延迟与热成分有一定的关联性, 详细分析见第4节.

3.3 红噪声范围时变性质

红噪声在功率密度谱上表现为一定范围内的功率 $\propto 1/f$, 很多物理和天文系统中都能观察到该特征^[18]. 对应某个物理系统, 红噪声频率一般有一个范围, 并且在该范围内, 能见到功率密度谱上附加的一些其他结构. 在图3 (A)、(B)中给出的功率密度谱上, 幂律下降段(1–10 Hz)即为红噪声主导, 同时该范围内还叠加了QPO结构. 为了将红噪声与QPO区分开来, 我们将红噪声的频率范围限定在7.5–10 Hz, 其中7.5 Hz为QPO频率范围上限. 对于功率密度谱中的红噪声, 一般认为其来源于吸积系统中物理参数的扰动, 如气体密度、吸积率、吸积盘不同半径处磁流体力学的扰动^[19]. 对于红噪声的出现, 至今没有统一解释.

图8给出了红噪声频率范围内的相干系数随时间的演化, 计算选取的光变曲线与宽限噪声的光变曲线选取一致. 对于高低能道光变曲线在红噪声频率范围的相干函数, 其演化特点与宽限噪声类似. 在低硬态与硬中间态, 红噪声范围内的相干系数只有0.2左右, 远低于宽限噪声范围内的值. 在软中间态与高软态, 相干系数接近0, 两能道不相关. 在从高软态向硬中间态演化时, 红噪声的相干函数有一定的回升. 总体看来, 红噪声范围内的相干函数偏低.

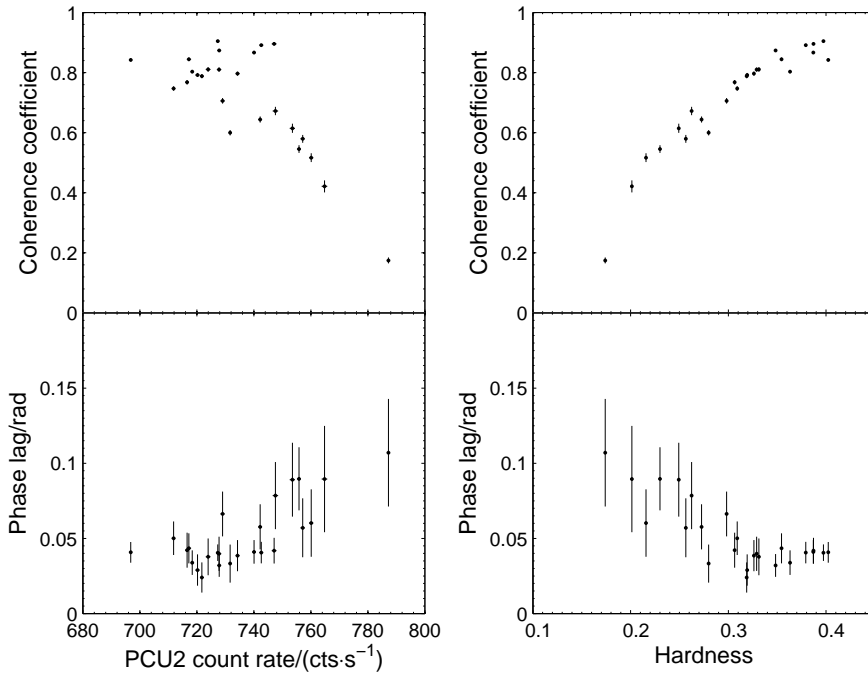


图 7 低硬态与硬中间态下的宽限噪声频段的平均相干系数、相位延迟随暂现源流强、硬度的变化图

Fig. 7 The mean coherence coefficient and phase lag in BLN frequency range as the function of photon flux and hardness of transient in the LHS and HIMS

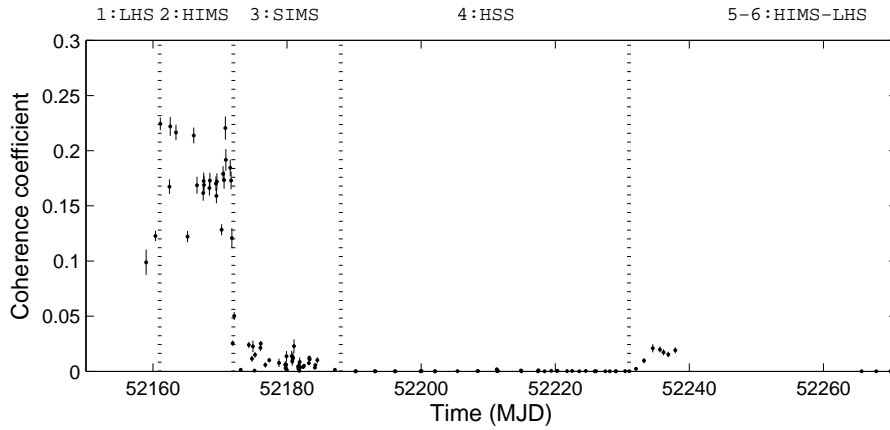


图 8 红噪声频率范围(7.5–10 Hz)相干系数演化图

Fig. 8 The coherence coefficient evolution diagram in the frequency range of red noise (7.5–10 Hz)

同理, 为了理解红噪声光变的产生区域及其演化, 我们研究了该频率范围内的相干系数、相位延迟随强度及谱硬度比的变化情况, 如图9所示.

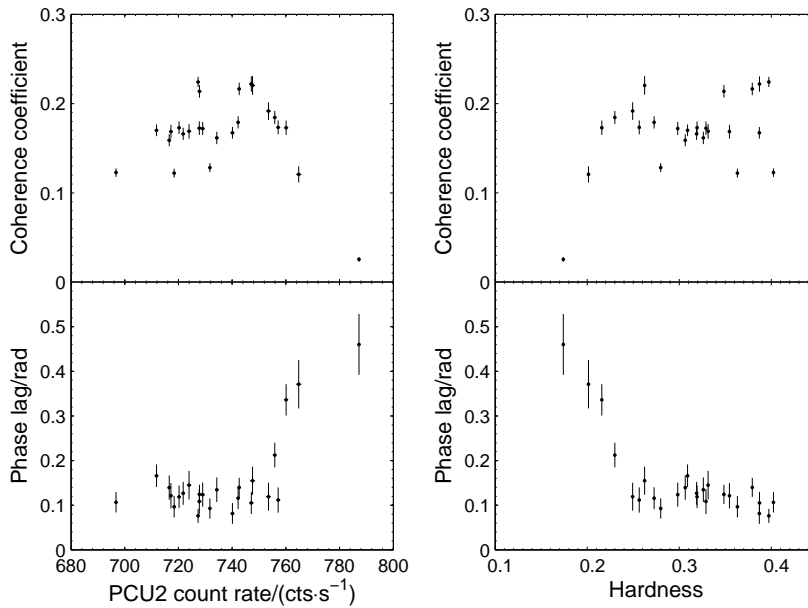


图 9 低硬态与硬中间态下的红噪声频率范围(7.5–10 Hz)内平均相干系数、相位延迟随暂现源流强、硬度比的变化图. 光变曲线能道选取与宽限噪声处做法相同.

Fig. 9 The mean coherence coefficient and phase lag in the red noise frequency range (7.5–10 Hz) as the function of photon flux and hardness of transient in the LHS and HIMS. The energy bands are the same as the BLN frequency range.

红噪声频率范围内的相干系数分布较为弥散, 对强度、硬度比没有显著的依赖性. 该范围的相位延迟在光度稍低时(PCU2计数率小于760 cts/s)基本保持不变, 而在光度较大时(PCU2计数率大于760 cts/s), 随着光度变大, 相位延迟明显变大; 相位延迟对硬

度比的依赖刚好相反, 在硬度比大于0.25时基本保持不变, 而在硬度比小于0.25时, 随硬度比的减小显著增大. 上述结果来源于软成分的增加和吸积盘的几何结构演化, 相关讨论将在第4节进行. 总体看来, 红噪声频率范围的相干系数对暂现源X射线流强的依赖行为与宽限噪声处明显不同, 而相位延迟对X射线流强、谱硬度比的依赖性则与宽限噪声类似.

3.4 QPO的时变性质

对于XTE J1650-500的该次爆发, QPO都出现在硬中间态, 其中心频率从1.32 Hz增加到6.79 Hz. 我们用洛伦兹函数拟合功率密度谱中的QPO分量, 相关物理量(相干函数、相位延迟)在 $f_{\text{QPO}} \pm \Delta_{\text{QPO}}$ 的频率范围内求平均.

首先, 我们考虑了QPO中心频率对暂现源硬度比、流强的依赖性质. 从图10中可见, QPO中心频率随硬度比的减小而增大、随暂现源流强的增大而增大.

其次, 与宽限噪声和红噪声频率范围内的做法一样, 我们考虑了QPO频率范围($f_{\text{QPO}} \pm \Delta_{\text{QPO}}$)内的相干系数、相位延迟对暂现源流强、硬度比的依赖性, 见图11. 从完备性出发, 图11同时考虑了更高能道的光变曲线(8.2–14.76 keV)与低能道(2–5.7 keV)的相位延迟, 用实心点表示.

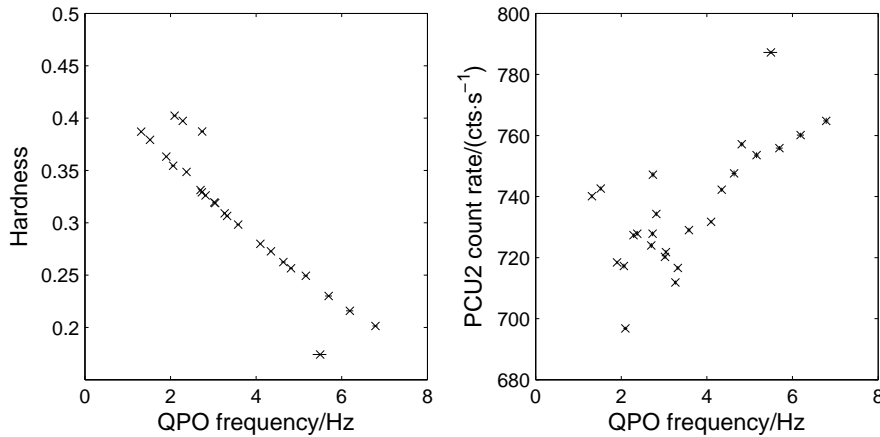


图 10 QPO频率范围相干系数演化图

Fig. 10 The coherence coefficient evolution diagram in the frequency range of QPOs

从图11中可见, QPO频率范围内的相干系数与暂现源流强大致呈反相关, 而与谱硬度比呈明显的正相关关系. 而QPO频率范围内的相位延迟则表现出相反的依赖关系, 即与源的X射线流强呈大致正相关, 而与谱硬度比呈反相关. 可见软成分的增加对QPO的产生区域有重大影响. 同时我们发现, 随着能量提高, 相位延迟均增大.

最后, 我们给出了QPO频率范围的相位延迟及时间延迟与QPO中心频率间的相关关系, 见图12.

从图12中可见, QPO处的相位延迟与QPO的中心频率大致呈正相关, 时间延迟与中心频率也大致呈正相关, 但更为弥散. 相关结果物理含义将在第4节中讨论.

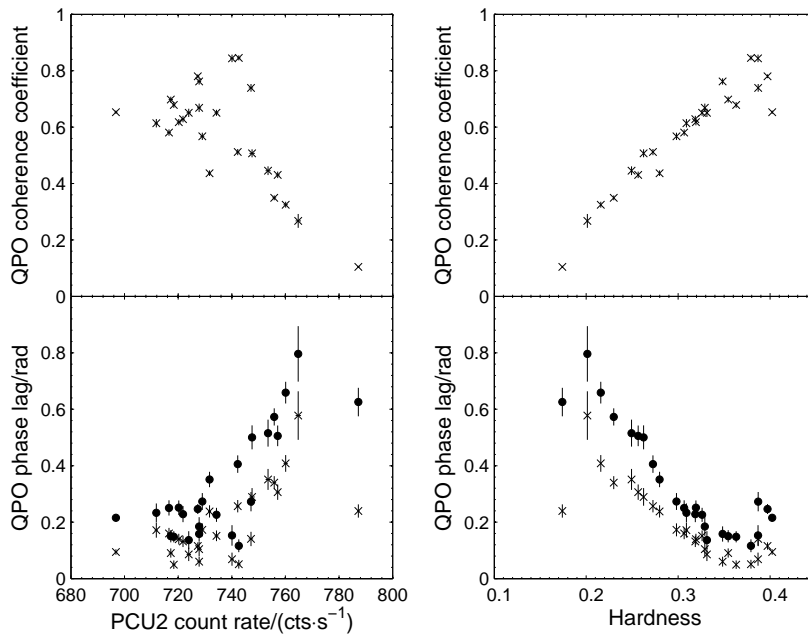


图 11 QPO 频率范围内的平均相干系数、相位延迟随暂现源流强、硬度比的变化图. 图中实心点表示 8.2–14.76 keV 对 2–5.7 keV 的相位延迟, 叉点表示 5.7–8.2 keV 对 2–5.7 keV 的相位延迟.

Fig. 11 The mean coherence coefficient and phase lag of QPO frequency range as the function of photon flux and hardness of transient. The filled circles are the phase lag between 8.2–14.76 keV and 2–5.7 keV, while the bifurcate points are the phase lag between 5.7–8.2 keV and 2–5.7 keV.

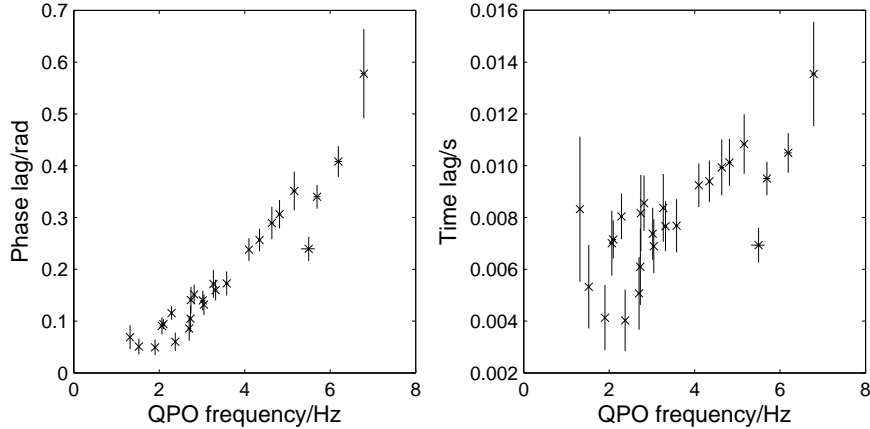


图 12 QPO 频率范围的相位延迟与时间延迟随 QPO 中心频率的变化图

Fig. 12 The phase lag and time lag in the QPO frequency range as the function of the central frequency of QPOs

4 讨论

我们采用 RXTE/PCA 的数据对 XTE J1650-500 在 2001—2002 年爆发期间的时变现象做了分析. 我们回顾了爆发的总体光变及硬度比演化; 分析了暂现源在不同态的功率

密度谱、相干函数及时间延迟图;分3个特征频率范围(宽限噪声、红噪声、QPO)的相干函数、相位延迟及时间延迟的演化.

我们的主要结果如下(主要针对低硬态与硬中间态):

- 时间延迟是依赖频率的($\tau(f) \propto f^{-0.86 \pm 0.12}$), 这与Cyg X-1的时间延迟谱是类似的.

- 宽限噪声区的相干系数随暂现源的流强增大而减小, 随硬度比的减小而减小; 相位延迟随暂现源流强的增大而增大, 随硬度比的减小而增大.

- 红噪声区的相干系数比宽限噪声区低, 不显著依赖于暂现源的流强、硬度比; 相位延迟比宽限噪声区大, 对流强、硬度比的依赖性与宽限噪声区类似, 不同的是暂现源在该频率范围段可能存在某个拐点(相位延迟在PCU2计数率小于760 cts/s、硬度比大于0.25时基本保持不变). Diego等^[20]发现对于GX 339-4存在这么一个拐点, 对应光学、近红外波段流量陡降, 热成分开始出现.

- QPO中心频率在1.32 Hz到6.79 Hz间演化, 中心频率随着硬度比的减小、流强的增大而增大. QPO频率范围内的相干系数随暂现源流强增大而减小, 随硬度比减小而减小; 相位延迟随流强增大而增大, 随硬度比减小而增大, 并且与QPO中心频率有明显的正相关性. 而必须注意的一点是, 在硬中间态, 流强与硬度比有一定的反相关性. 考虑到硬中间态热成分的加入显著影响了硬度比, 而X射线流强没有太大变化, 因此我们认为硬度比的变化对时间延迟有显著影响.

- 软中间态与高软态下, 所取的两能道光变曲线间相干系数非常低.

一个成功的理论除了能够解释暂现源的能谱, 也应该包含对暂现源一系列时变现象的解释. QPO是黑洞X射线暂现源中一种比较普遍的现象, 其产生机制也没有定论. 主流的QPO模型主要分为吸积区域不稳定模型与几何效应模型. 随着研究的深入, Ingram等^[21]展示了低频QPO可以用Lense-Thirring进动来解释, 他们在原有的“截断盘+热内流”几何结构中, 进一步将热内流的内半径限制到模拟研究显示的密度陡降点, 从而将进动频率与黑洞自旋联系起来, 该模型已成为刻画黑洞暂现源吸积过程的主流模型. 该模型改进了传统的盘冕模型, 完善了截断盘和热内流模型: 截断的吸积盘通过热辐射产生大部分软X射线光子^[22-23], 吸积盘盘面始终与绕转轨道面保持一致; 截断半径以内、密度陡降点以外是Lense-Thirring进动的热吸积流, QPO起源于热吸积流的进动, 硬X射线光子则来源于热内流中种光子的逆康普顿散射^[24]. 采用黑洞自旋和吸积热流外半径两个参数可以确定吸积区域内的一系列物理量, 如进动频率、吸积流面密度^[25]. 该模型预言, 随着截断盘内半径向致密星中心移动, 可以产生中心频率在0.1-10 Hz之间增加的QPO. 我们的数据表明, 随着暂现源流强的增加、硬度比的减小(这意味着吸积率与热成分增加, 此时内盘半径向致密星移动), QPO中心频率增加(1.32-6.79 Hz), 这与模型预言相符. 至于在软中间态与高软态没有观测到(或者存在极弱的) QPO, 两能段的光变曲线间相干系数接近为0, 可以作如下解释: 热成分的增加使吸积盘向内延伸到最小稳定轨道附近, 破坏了进动的热内流结构, 相干性自然要变差.

时间延迟现象的产生机制复杂. 现有解释时间延迟的物理机制众多, 各机制也存在相应的一些问题. 本文将所要讨论的时间延迟机限制到以下3种: 其一为静态冕模型, 即软X射线在静态冕(恒温, 等离子体密度为常数)中经过逆康普顿散射变硬后被观测

到^[14]; 其二为扰动传播模型, 盘上某半径处吸积率发生突变, 该突变向内传播引起各半径处相应变化, 时延即来源于盘中扰动传播的时间^[26]; 其三, Guilbert等^[27]认为原初X射线可在绕转物质中再次发射, 若原初光子与反射光子存在一定程度的相关性^[28], 则可以观测到相应的时延现象^[29], 称为反响时延(reverberation lag). 下文在“截断盘+热内流”框架下, 结合所得的数据结果, 对上述模型进行讨论.

首先, 必须指出数据结果显示低硬态与硬中间态下的时间延迟谱是频率依赖的硬时延. 静态冕模型虽然能解释观测到的硬时延, 但其假设冕为恒温、密度为常数的等离子体, 因此它预言所有频率处有相同的时间延迟, 即时间延迟谱为常函数, 显然与我们的数据结果不符. 对于反响时延, 一般认为原初X射线为吸积流内区的硬X射线, 其在外部的低温盘上被软化后反射, 对应为不依赖频率的软时延, 这与我们的数据结果显然不符. 而扰动传播模型虽然本身在大尺度的结构上难以满足能量动态平衡关系, 但其预言的时间延迟反比于频率, 与本文所得数据结果大体一致.

其次, 我们数据分析结果得到QPO频率范围的相位延迟、时间延迟随吸积率、热成分及QPO中心频率的增加而增加. 在“截断盘+热内流”的框架下, 在吸积率与热成分增加时, 内盘向热内流区域移动, 增加了吸积盘与热内流的接触面积使进动流致冷, 这意味着种光子在离开热内流前散射次数更少, 对应相位延迟减小, 很明显与我们的观测不符. 反响时延模型的硬X射线光子也来源于热内流, 时延来自于截断盘与热内流间的光子传播时间, 在截断盘向热内流靠近的过程中, QPO范围内的时间延迟应该减小, 这显然也与我们的结果不符. 对于扰动传播模型, 假设热内流为轴对称的戒指结构, 忽略吸积流的旋转效应, 扰动传播速度为一维声速^[30]:

$$C_s = \sqrt{\frac{kT_0}{m_p}} \approx 3.1 \times 10^8 \left(\frac{T_0}{100 \text{ keV}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (5)$$

式中, k 是玻尔兹曼常数, T_0 是热内流局部区域的温度, m_p 是质子质量. 在致冷效应发生的情况下, 热内流温度降低, 扰动传播速度减小, 故能观测到对应的时间延迟增大现象, 与我们的观测是吻合的.

最后, 必须注意观测的时延可能不是单一机制形成的, 近来Marco等^[31]构造的“扰动传播+反响映射”的复合模型能很好地解释时间延迟谱上的高频下降和多波段观测的能量时延谱的一些特征. 由于RXTE/PCA探测器的有效能段较高(2–60 keV), 无法完全覆盖相对偏软的黑体谱, 因此我们现阶段的工作无法验证新提出的复合模型. 后续工作可以考虑联合其他覆盖较低能段卫星(如XMM-Newton)同时间的观测数据进行分析.

综上所述, 我们倾向于认为暂现源XTE J1650-500的硬时间延迟谱及其在QPO频段上的时变性质可以用吸积盘外区吸积率的扰动向内传播机制来解释.

另外, 虽然现有研究能对功率密度谱上宽限噪声、红噪声及QPO分量作出一定的解释^[30], 但针对本文分别在宽限噪声频段与红噪声频段给出的时变性质还没有相应的研究. 宽限噪声频段反映长时标光变, 限定在7.5–10 Hz的红噪声频段则对应了短时标光变. 长时标光变一般被认为与盘的演化密切相关, 而短时标光变, 可能来源于离致密天体最近的吸积区域. 研究这两个频段上时变现象的物理机制, 可能会加深我们对最外与最内吸积区域的理解.

5 总结

我们研究了暂现源XTE J1650-500在2001—2002年爆发期间的时变现象. 该源展现了与其他黑洞X射线暂现源类似的时变特征. 我们分别在3个特征时间尺度下研究了暂现源在爆发期内的时间延迟现象, 该方法提供了分离吸积区域作针对性研究的新思路. 在“截断盘+热内流”的模型下, 我们主要分析了时间延迟的3种模型, 发现所得数据结果可以用扰动传播模型给出比较合理的解释.

参 考 文 献

- [1] Belloni T M, Motta S E, Muñoz-Darias T. *BASI*, 2011, 39: 409
- [2] Darias T M, Motta S, Belloni T M. *MNRAS*, 2011, 410: 679
- [3] 张旭, 张皓晶, 张雄. *天文学报*, 2016, 57: 254
- [4] 谢富国. *天文学报*, 2010, 51: 432
- [5] Motta S, Belloni T, Homan J. *MNRAS*, 2009, 400: 1603
- [6] 袁峰. *天文学进展*, 2007, 25: 101
- [7] Orosz J A, McClintock J E, Remillard R A, et al. *ApJ*, 2004, 616: 376
- [8] Miller J M, Fabian A C, Wijnands R, et al. *ApJ*, 2002, 570: L69
- [9] Corbel S, Fender R P, Tomsick J A, et al. *ApJ*, 2004, 617: 1272
- [10] Homan J, Klein-Wolt M, Rossi S, et al. *ApJ*, 2003, 586: 1262
- [11] Tomsick J A, Kalemci E, Corbel S, et al. *ApJ*, 2003, 592: 1100
- [12] Kalemci E, Tomsick J A, Rothschild R E, et al. *ApJ*, 2003, 586: 419
- [13] Leahy D A, Elsner R F, Weisskopf M C. *ApJ*, 1983, 272: 256
- [14] Nowak M A, Vaughan B A, Wilms J, et al. *ApJ*, 1999, 510: 874
- [15] Van der Klis M, Hasinger G, Stella L, et al. *ApJ*, 1987, 319: 13
- [16] Rossi S, Homan J, Miller J M. *NuPhB*, 2004, 132: 416
- [17] Crary D J, Finger M H, Kouveliotou C, et al. *ApJ*, 1998, 493: L71
- [18] Press W H. *ComAp*, 1978, 7: 103
- [19] Do T, Ghez A M. *ApJ*, 2009, 691: 1021
- [20] Diego A, Mariano M. *MNRAS*, 2015, 449: 4027
- [21] Ingram A, Done C, Fragile P C. *MNRAS*, 2009, 397: L101
- [22] Shakura N I, Sunyaev R A. *A&A*, 1973, 24: 337
- [23] Frank J, King A R, Raine D J. *Accretion Power in Astrophysics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992
- [24] Haardt F, Maraschi L. *ApJL*, 1991, 380: L51
- [25] 李彦荣. *天文学报*, 2012, 53: 259
- [26] Lyubarskii Y E. *MNRAS*, 1997, 292: 679
- [27] Guilbert P W, Rees M J. *MNRAS*, 1988, 233: 475
- [28] Nowak M A, Juett A, Homan J, et al. *ApJ*, 2008, 689: 1199
- [29] Reynolds C S, Young A J, Begelman M C, et al. *ApJ*, 1999, 514: 164
- [30] Cabanac C, Henri G, Petrucci P O, et al. *MNRAS*, 2010, 404: 738
- [31] Marco B D, Ponti G, Muñoz-Darias T, et al. *ApJ*, 2015, 814: 50

The Temporal Phenomena of Black Hole Transient XTE J1650-500 in Its 2001—2002 Outburst

XIAO Guang-cheng¹ LI Zi-jian¹ YAN Lin-li¹ LU Yu¹ CHEN Li²
QU Jin-lu¹

(1 *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

(2 *Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875*)

ABSTRACT Using the data observed by *Rossi X-ray Timing Explorer*, a systematic study of temporal phenomena of the black-hole transient XTE J1650-500 in its 2001—2002 outburst is presented. By using the time lag in the Fourier frequency domain, three characteristic frequency ranges are analysed, namely the band limited noise, red noise, and QPOs (Quasi-Periodic Oscillations). The properties and evolution behaviour in these frequency ranges may be dominated by different accretion regions. It is commonly believed that the smaller timescale corresponds to the more inner region. The low-hard state and hard intermediate state are especially highlighted. Data analysed results are discussed in the framework of Lense-Thirring precession. Results are in favor of the perturbation propagation regime for explaining the observed time lags. Although the timing analysis in the frequency range of band limited noise and red noise is carried out, and a possibly existing break point is found, the model to explain them is still not established. More work is needed to understand the innermost accretion region.

Key words X-rays: binaries, accretion, accretion disks: quasi-periodic oscillations, time lags