

基于慧眼卫星观测的准周期振荡现象的研究进展*

张 亮[†] 屈进禄 张 澍

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 X射线双星的光变曲线中普遍存在准周期振荡(Quasi-Periodic Oscillation, QPO)现象,一般认为QPO来自于距离致密星很近的吸积流,因此QPO是检验强引力场下的广义相对论效应以及研究致密星附近吸积几何演化的重要探针. 慧眼卫星发射之前,对QPO的研究主要集中在小于30 keV的能量范围. 慧眼卫星在高能段具有非常大的有效面积,打开了研究QPO高能性质的窗口. 总结了慧眼卫星在QPO的研究方面取得的进展,包括高能QPO的观测特征、物理起源以及对应的吸积几何演化等,并对未来可能的突破方向进行了展望.

关键词 X射线: 双星, 吸积, 吸积盘, 黑洞物理

中图分类号: P172; **文献标识码**: A

1 引言

X射线双星是由一颗致密星(恒星级黑洞或中子星)和一颗恒星组成的双星系统. 致密星从伴星吸积物质,物质在下落过程中释放出巨大的引力势能并且转化为辐射,辐射主要在X射线波段. 这些天体中存在极端引力、极端磁场和极端密度的物理环境,是我们研究极端环境下物质的状态和运动规律的绝佳实验室. 根据伴星质量的不同,X射线双星可以大致分为低质量X射线双星和高质量X射线双星两类. 低质量X射线双星包括黑洞X射线双星、中子星X射线双星Z源和Atoll源,高质量X射线双星则可根据伴星类型分为Be X射线双星和超巨星X射线双星. X射线双星系统的空间尺度非常小,目前还无法实现空间分辨,而时变特征为我们提供了一种间接测量致密星周围吸积几何的方法. 在X射线双星的功率谱上,最显著的信号是一些窄的峰,被称为准周期振荡(Quasi-Periodic

Oscillation, QPO). 一般认为QPO起源于致密星附近的吸积流,因此QPO是检验强引力场下的广义相对论效应以及研究致密星附近吸积几何演化的重要探针.

按照中心频率的不同,X射线双星系统中的QPO可分为毫赫兹QPO (<0.01 Hz)、低频QPO ($\sim 0.01\text{--}60$ Hz)和高频QPO (>60 Hz) 3类. 黑洞系统中的低频QPO又可以根据功率谱和交叉谱性质(中心频率、半高全宽、振幅和延迟等)的不同分为C型、B型和A型3类. 其中,C型QPO和B型QPO的振幅较强、宽度较窄,而A型QPO的振幅较弱、宽度较宽. C型QPO的中心频率($\sim 0.1\text{--}30$ Hz)随着能谱的变软而逐渐增加,功率谱中存在很强的宽带噪声成分和QPO的谐频成分. B型QPO的中心频率集中在4–6 Hz,功率谱中的宽带噪声成分较强,二次谐频的峰也很常见. A型QPO的中心频率主要集中在6–8 Hz左右,伴随着很弱的宽带噪声,一般没有谐频出现. 不同类型的低频QPO出

2024-10-11收到原稿, 2024-12-17收到修改稿

* 国家自然科学基金项目(12203052)资助

[†] zhangliang@ihep.ac.cn

现在不同的谱态, C型QPO主要出现在硬态和硬中间态, B型和A型QPO分别出现在软中间态和软态. 虽然用于解释低频QPO的模型很多(关于QPO模型的介绍请参考文献[1]), 但是关于QPO的物理起源一直存在争议. 最近一些观测证据表明QPO的流量调制来自于几何效应, 广义相对论预言的Lense-Thirring进动是一种可能的产生机制. 黑洞系统中的高频QPO一般很弱, 目前只在GRS 1915+105、GRO J1655-40和XTE J1550-564等少数几个源中探测到显著信号.

Z源和Atoll源功率谱上最显著的信号是成对出现的千赫兹QPO, 目前用于解释千赫兹QPO的理论模型有拍频模型和进动模型等. 相较于黑洞系统而言, 中子星系统中的低频QPO现象一般较弱. 按照所处演化轨迹分支的不同, Z源中的低频QPO可以分为水平分支振荡(Horizontal branch oscillation, HBO) QPO、正常分支振荡(Normal branch oscillation, NBO) QPO和耀发分支振荡(Flaring branch oscillation, FBO) QPO, 分别对应黑洞系统中的C型、B型和A型QPO. 在Atoll源中也观测到了与HBO和FBO功率谱形状类似的QPO现象. 一般认为黑洞和中子星系统中的低频QPO具有相似的物理起源. 此外, 在中子星系统中也普遍存在毫赫兹QPO现象.

2017年之前对QPO的观测研究主要依赖美国的罗西X射线计时探测器(Rossi X-ray Timing Explorer, RXTE), 该卫星于2012年退役, 在QPO的研究方面取得了丰硕的成果. 但是RXTE卫星在高能段(>30 keV)的有效面积很小, 使得之前对QPO的研究主要集中在小于30 keV能量范围. 2017年我国发射的第一颗X射线天文卫星慧眼在高能段具有非常大的有效面积, 打开了研究QPO高能性质的窗口. 本文将介绍慧眼卫星在QPO现象的研究方面取得的科学成果.

2 黑洞系统中的QPO现象

2.1 C型低频QPO现象

2.1.1 高能QPO的观测特征

在RXTE时期, 通过直接方法探测到的最高能量的QPO在40 keV左右. 慧眼卫星在8 yr多的运行

时间里, 已经在多个黑洞X射线双星中探测到了能量超过50 keV的低频QPO^[2-8], 这表明高能QPO是黑洞X射线双星中普遍存在的现象. 特别是在黑洞X射线双星MAXI J1820+070中, 慧眼卫星探测到了能量超过200 keV的C型QPO, 这是迄今为止探测到的能量最高的QPO现象^[3]. 图1展示了慧眼在MAXI J1820+070中观测到的不同能量的C型QPO以及喷流进动模型的示意图.

在1-250 keV范围内, C型QPO的中心频率基本不随能量变化, 在一些观测中发现的QPO频率随能量的变化^[2, 8]可能是同时存在两个不同频率QPO成分导致的^[9]. C型QPO典型的振幅谱可以近似用一条折线描述: 在低能段, QPO的振幅随着能量的升高而增加; 大于某一转折能量后, QPO的振幅基本不随能量变化或者呈现出略微下降的趋势^[10]. 图2展示了黑洞X射线双星中不同类型QPO的典型的振幅谱和延迟谱. 转折能量随着能谱变软而逐渐升高, 在中间态达到~10-20 keV. QPO在高能段的振幅(可达20%)远远高于低能段的振幅, 说明QPO的调制主要来自于康普顿化过程, 热冕或者喷流的根部是可能的产生区域, 而低能段占主导的吸积盘成分对振幅的贡献很小. 一些情况下, 反射成分对QPO流量的调制也有显著贡献^[12]. 在随时间演化方面, 随着能谱的变软和QPO频率的增加, 通常低能QPO的振幅逐渐降低而高能QPO的振幅逐渐升高^[6, 13].

QPO的延迟随时间和能量的演化较为复杂, 延迟的计算方法和物理解释也一直存在争议. 传统方法是交叉谱上以QPO频率为中心一个半高全宽内($\nu_0 \pm \text{FWHM}/2$)的延迟的平均值作为QPO的延迟, 但是该方法没有考虑宽带噪声的影响. 慧眼卫星发现在高能段的交叉谱上, 低频平台噪声范围内的相位延迟很大而且近似为常数, QPO在交叉谱上对应的结构叠加在噪声连续谱上, 因此计算QPO的延迟需要考虑宽带噪声的影响^[3, 8, 14]. Ma等^[3]提出了一种新的计算QPO延迟的方法, 用交叉谱上QPO范围内相位延迟的平均值减去低频平台噪声范围内相位延迟的平均值, 得到QPO内禀的相位延迟. 利用该方法在MAXI J1820+070不同的观测中得到了较为一致的QPO相位延迟谱, 相较于10 keV左右的光子, 低能光子和高能光子

均更早到达观测者. 利用希尔伯特黄变换提取 QPO 的瞬时光变, 进而计算不同能段的延迟得到的 QPO 延迟谱与 Ma 等人得到的 QPO 内禀延迟谱基本一致^[15]. 类似的 QPO 相位延迟谱也在 2023 年爆发的新源 Swift J1727.8–1613 中观测到^[8]. QPO 的延迟可能是不同能量光子的传播路径不同产生的时

间差(time delay), 也可能是不同能段 QPO 的波形存在相位差(phase delay)导致的. 在 MAXI J1820+070 中, 最高能段相较于低能段的延迟时标达到秒量级, 如果延迟完全由时间差引起, 那么对应的物理尺寸约为 $10^4 R_g$, 这样大的尺寸与已知的物理图像不符. 因此, QPO 的延迟可能是相位差占主导.

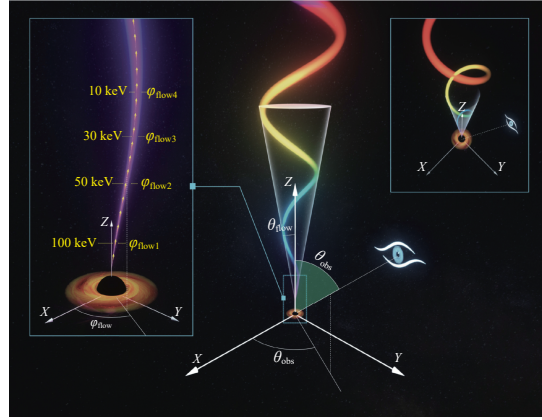
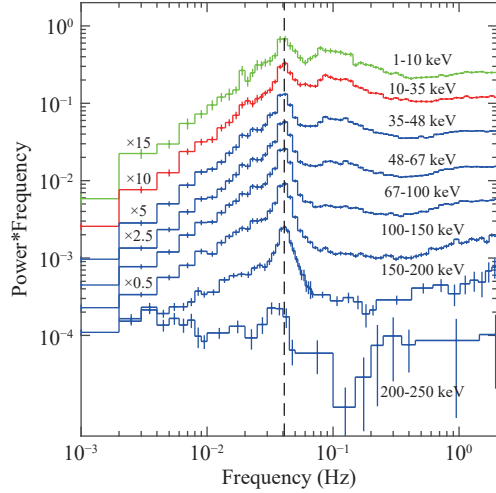


图 1 左图: 慧眼在 MAXI J1820+070 中观测到的不同能量的 C 型低频 QPO. 右图: 喷流进动模型示意图. Z 轴沿着黑洞自转轴方向, XY 平面垂直于 Z 轴. θ_{obs} 是观测者视线方向与黑洞自转轴之间的倾角, φ_{obs} 是该方向在 XY 平面的投影与 X 轴的夹角. θ_{flow} 是喷流的倾角, φ_{flow} 是该方向在 XY 平面的投影与 X 轴的夹角. 图引自 Ma 等^[3].

Fig. 1 Left: type-C QPOs of different energy bands observed in MAXI J1820+070 with *Insight*-HXMT. Right: schematic of the jet precession model. The Z axis aligns with the direction of the spin, while the XY plane lies perpendicular to the Z-axis. θ_{obs} is the inclination angle between the line of sight of the observer and the black hole spin axis. φ_{obs} is the azimuth angle of the observer measured from the X axis. θ_{flow} is the inclination angle and φ_{flow} is the azimuth angle of the jet flow measured from the X axis. Figure adopted from Ma et al.^[3].

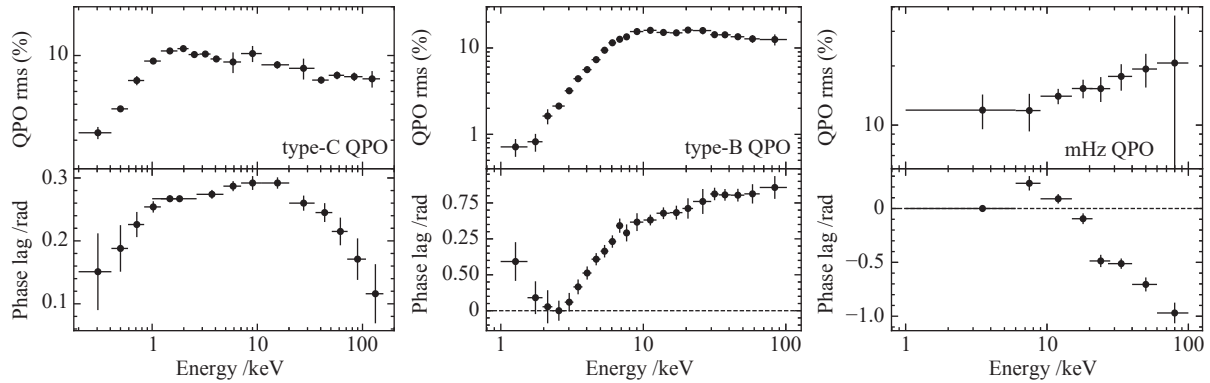


图 2 黑洞 X 射线双星中不同类型 QPO 的典型的振幅谱和延迟谱. 左图: C 型 QPO, 中间图: B 型 QPO, 右图: 毫赫兹 QPO. 图中数据来自文献[5, 10–11].

Fig. 2 Representative rms and lag spectra of the different kinds of QPOs observed in black hole X-ray binaries. Left: type-C QPO, middle: type-B QPO, right: mHz QPO. Data adopted from Refs.[5, 10–11].

2.1.2 C型QPO和噪声的关系

拟合黑洞X射线双星的功率谱通常采用多个洛伦兹函数模型, 该模型假设QPO和宽带噪声成分在时域是相加的关系, 即 $f_{\text{tot}}(t) = n(t) + q(t)$, 其中 $n(t)$ 和 $q(t)$ 分别为噪声和QPO成分的光变; 并且假设QPO和噪声是不相关的, 这样在频域上总的功率谱是二者功率的和. 然而, 双谱(bispectrum)研究结果显示QPO和噪声之间存在很强的相位耦合, 在相加关系下无法产生这种非线性的耦合^[16]. Ma等^[3]发现不同功率谱成分的相位延迟与相应的总成分相位延迟存在线性关系, 这表明QPO内禀的相位延迟可以通过线性校正得到. 而传统的QPO和宽带噪声之间的加法模型则不适用于QPO内禀的相位延迟的线性提取. Zhou等^[14]提出了QPO和宽带噪声在时域上是卷积关系的模型, 即 $f_{\text{tot}}(t) = n(t) * q(t)$, 并且在数学上证明了在该模型下可以提取QPO内禀的相位延迟. 根据卷积定理, 在该模型下功率谱需要使用乘法模型进行拟合. 与传统的加法模型相比, 乘法模型拟合得到的QPO中心频率和宽度没有明显的不同, 但是QPO的振幅要略小一些. 这个工作为研究QPO和宽带噪声成分的耦合关系提供了一个新的视角.

2.1.3 C型QPO的物理起源

基于RXTE卫星数据的统计分析发现C型QPO的振幅与倾角的相关性很强^[17], 高倾角系统的QPO振幅明显高于低倾角系统. 基于慧眼卫星观测的相位分解谱分析, Shui等^[18]发现康普顿化成分和反射成分参数随QPO相位的调制非常显著, 而吸积盘参数的调制并不明显. 图3展示了不同能谱参数随QPO相位的变化. 其中, 反射成分和铁线中心能量的调制可以用几何效应很好地解释. 目前用几何效应解释QPO现象最常用的理论模型是Lense-Thirring进动模型^[1], 进动的区域可能是热内流或者小尺度喷流的根部(jet base). 其中, 热内流进动模型基于截断盘假设, 吸积盘和中心天体之间的热内流进动产生了观测到的QPO, 而截断半径的变化导致了QPO性质(频率、振幅和延迟等)随爆发的演化. 但是在MAXI J1820+070中发现QPO频率快速变化期间, 吸积盘内边界并没有显著的变化^[19], 至少在该源中, 热内流进动模型无法解释QPO现象. 基于慧眼对MAXI J1820+

070的研究结果, Ma等^[3]提出了喷流进动模型(示意图见图1), 该模型认为QPO来自于小尺度喷流的进动, 进动过程中的多普勒效应和立体角效应产生了流量的调制, QPO振幅的强弱主要由喷流的速度决定. 不同能量的QPO来自于喷流不同的区域, 高能光子产生于喷流的底部, 而低能光子产生于喷流的顶部. 由于喷流是弯曲的, 在QPO不同的相位处, 喷流不同区域朝向观测者(流量最大), 因此喷流顶部的低能光子相对于喷流底部的高能光子存在相位差. 该模型可以很好地解释慧眼观测到的QPO振幅谱和延迟谱. 此外, 在光学波段发现了和X射线波段同时出现的而且相同频率的QPO现象^[20-21], 光学波段的快速变化很可能来自于喷流, 该结果也支持喷流进动模型.

另外值得注意的是, 基于慧眼卫星数据的小波分析结果^[22-24]显示, QPO在短时标上存在显著的强弱变化, 在MAXI J1820+070中QPO显著存在的时标一般为5个QPO周期, 该时间长度与QPO的品质因子相关. QPO显著存在时期与QPO较弱时期的能谱没有显著的区别. QPO短时标上的强弱变化可能是由喷流速度的变化导致, 而喷流速度的调制也可以产生宽带噪声成分.

此外, QPO可以作为探针研究吸积几何演化. 基于对时间平均谱、QPO的振幅谱和延迟谱的同时拟合, Zhang等^[25]发现在MAXI J1535-571的中间态存在延展热冕逐渐向径向喷流演化的证据, 对应着射电喷流从稳态到暂现态的转变.

2.2 B型低频QPO现象

2.2.1 高能QPO的观测特征

慧眼卫星在MAXI J1348-630、GX 339-4等源中观测到了B型QPO, QPO的中心频率集中在4-6 Hz范围内, 单次爆发中出现的B型QPO性质十分相似. 其中, 在MAXI J1348-630中观测到了能量超过100 keV的B型QPO, 这是迄今为止探测到的能量最高的B型QPO现象^[5, 26]. B型QPO的中心频率不随能量变化, QPO的振幅谱与谱态转换前硬中间态的C型QPO类似: 小于~10 keV, QPO的振幅随能量的升高而增加; 大于~10 keV, QPO的振幅基本不随能量变化, 高能段的振幅可达15%^[5].

B型QPO的延迟谱通常呈现“V”形状, 低能量(<2 keV)和高能量(>3 keV)的光子均延迟于2–3 keV附近的光子; 在高分段7 keV处, 延迟谱存在明显拐折(见图2).

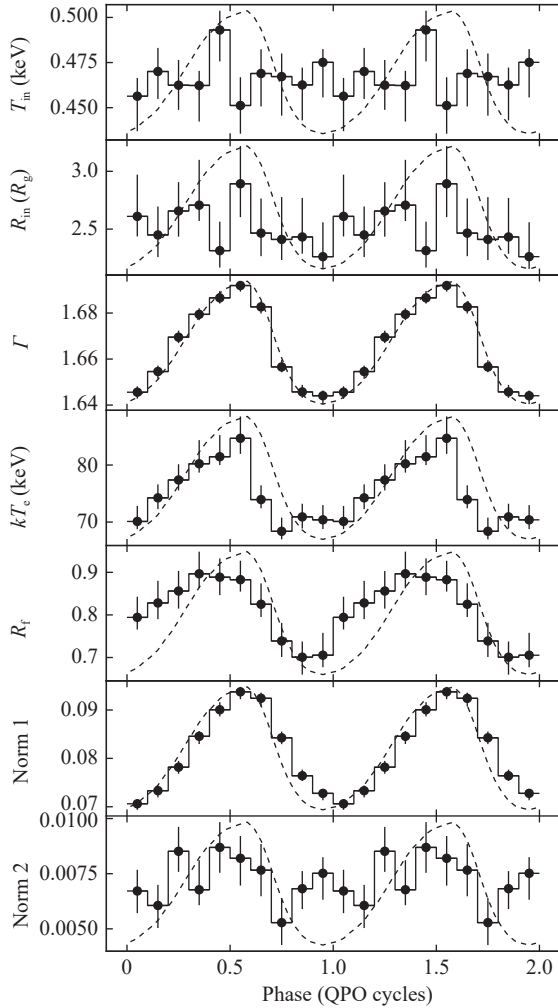


图 3 能谱参数随QPO相位的演化, 拟合模型为 $\text{TBABS} * (\text{DISKBB} + \text{RELXILLCP} + \text{XILLVERCP})$. 从上到下分别为内盘温度(T_{in}), 内盘半径(R_{in}), 能谱指数(Γ), 电子温度(kT_e), 反射比例(R_f), RELXILLCP和XILLVERCP的归一化因子. 图引自Shui等^[18].

Fig. 3 Phase dependence of the spectral parameters. The fitting model is $\text{TBABS} * (\text{DISKBB} + \text{RELXILLCP} + \text{XILLVERCP})$. From top to bottom are the temperature of the inner disc (T_{in}), inner disc radius (R_{in}), spectral index (Γ), electron temperature (kT_e), reflection fraction (R_f), and the normalizations of RELXILLCP and XILLVERCP. Figure adopted from Shui et al.^[18].

2.2.2 B型QPO的暂现性

B型QPO的一个典型特征是其突然消失/重现的现象, 而且这一转换时标非常短, 通常在几十秒内完成. 慧眼卫星在MAXI J1348–630中观测到了多次QPO突然消失/重现的现象, 宽波段能谱比较结果显示QPO存在和消失时期的能谱存在明显差异^[5, 26]. 在QPO出现期间, 高能段康普顿化成分的流量明显增加, 而低能段吸积盘成分显著变弱. Yang等^[26]对3个源中B型QPO的暂现现象进行了系统性研究, 发现转换期间0.5–10 keV范围内吸积盘成分流量的变化与康普顿化成分流量的变化存在明显的反相关, 说明QPO暂现现象的本质是吸积能量在吸积盘和康普顿化区域的重新分配: 当更多的吸积能量注入到康普顿化区域时, QPO出现; 而当更多的吸积能量注入到吸积盘时, QPO消失. 同时研究发现只有当康普顿化流量的占比(康普顿化成分流量/总流量)超过某一临界值时B型QPO才出现, 不同源中这个临界值并不相同, 该临界值由哪些因素决定还需要进一步研究. 图4展示了B型QPO存在与消失期间能谱的比值以及转换期间康普顿化成分流量变化与吸积盘成分流量变化之间的关系.

2.2.3 B型QPO的物理起源

在一次爆发中, B型QPO首次出现的时刻与大尺度暂现喷流喷出的时刻十分接近, 因此人们认为B型QPO的产生与大尺度喷流有关^[27]. 通过拟合QPO的振幅谱和延迟谱, García等^[28]发现QPO的变化谱需要两个物理相关的康普顿区域描述, 其中一个小尺度区域(尺寸约为 $25 R_g$)对吸积盘的反馈作用较大, 可能对应延展的热冕; 而另一个大尺度区域(尺寸约为 $1500 R_g$)对吸积盘的反馈作用较小, 可能对应径向的喷流. Yang等^[26]提出B型QPO可能来自于延展的热冕和喷流的共同进动, 而QPO的突然消失可能是Bardeen-Petterson效应使得内吸积流的法线方向与黑洞自转轴平行而无法进动所导致的.

2.3 毫赫兹QPO现象

在黑洞系统中, 毫赫兹QPO极为罕见, 通常出现在能谱较硬的吸积态. RXTE时期观测到过毫赫

兹QPO和C型低频QPO同时出现,说明毫赫兹QPO和低频QPO的物理起源不同^[29]. 慧眼卫星在黑洞候选体4U 1630-47的2021年爆发的上升阶段观测到了频率为60 mHz的QPO. 利用慧眼卫星高能段、大有效面积的优势, Yang等^[11]首次将对黑洞毫赫兹QPO的研究扩展到了100 keV. 研究发现该毫赫兹QPO的振幅随着能量的增加而增加, 在100 keV附近达到20%, 高能段较大的振幅说明QPO的调制来自于热冕. 此外, 观测还显示QPO

的时延为软光子滞后硬光子, 时延的尺度随着能量的增加而变长(见图2). 能谱分析表明, 毫赫兹QPO出现期间热冕的光深减小, 可能是热冕尺寸的变大导致. 热冕尺寸的变大会导致其与吸积盘之间的耦合作用增强. 观测到的毫赫兹QPO可能产生于热冕与吸积盘之间相互耦合触发的不稳定性过程. 慧眼只在特定的光度范围内观测到了毫赫兹QPO现象, 说明该不稳定性的产生与吸积率的变化有关.

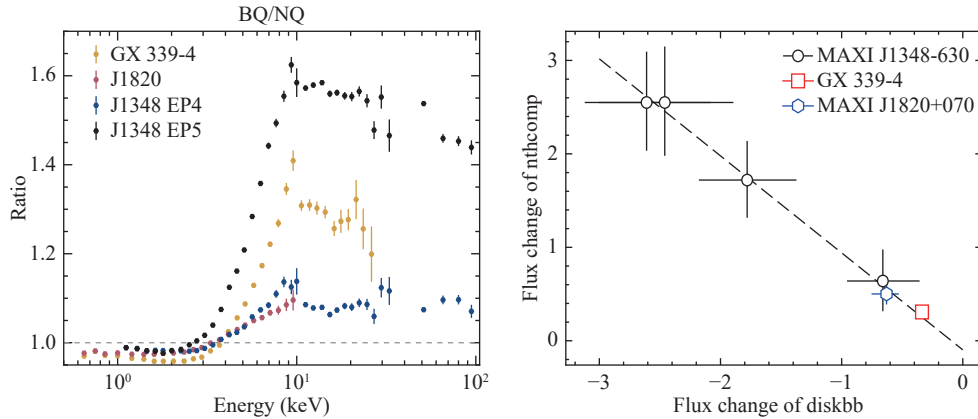


图 4 左图: 不同源中B型QPO存在时期的能谱与QPO消失时期的能谱比值. 右图: B型QPO突然消失/重现转换期间, 康普顿化成分流量变化与吸积盘成分流量变化之间的关系. 吸积盘成分和康普顿化成分分别用diskbb和nthcomp模型拟合. 图引自Yang等^[26].

Fig. 4 Left: ratio between the spectrum with and without the type-B QPO for different sources. Right: the change of the Comptonization component flux as a function of the change of the disc component flux from non-QPO to type-B QPO. The disk and Comptonization components are fitted with diskbb and nthcomp, respectively. Figure adopted from Yang et al.^[26].

3 中子星系统中的QPO现象

3.1 中子星低质量X射线双星中的QPO现象

慧眼卫星对Z源Sco X-1进行了高频次监测, 得到了完整的演化轨迹, 并观测到了不同分支的低频QPO以及千赫兹QPO^[30]. 其中, NBO (~ 6 Hz)和FBO (~ 16 Hz)分别出现在正常分支的末端和耀发分支的起始端, 此时的能谱较软, QPO只在LE和ME数据中被探测到, 而HE数据并没有显著的QPO信号. 另一方面, HBO (~ 40 Hz)和千赫兹QPO (~ 800 Hz)同时出现在水平分支, 此时的能谱较硬, QPO只在ME和HE能段显著. 对于所有类型的QPO, 其中心频率均不随能量变化, 而QPO的振幅随着能量的升高而增加, 这表明QPO的调

制更可能来自于康普顿化过程. 特别值得注意的是, 慧眼卫星首次在20 keV以上的能区观测到Sco X-1的千赫兹QPO. 千赫兹QPO的主流模型认为它起源于吸积盘内边缘, 以热辐射为主, 很难达到这么高的能量, 慧眼的观测结果对主流的千赫兹QPO模型提出了挑战. 通过比较时间平均谱和QPO的振幅谱, Jia等^[31]将上千赫兹QPO的产生区域定位在转换层的内区.

3.2 吸积脉冲星中的QPO现象

慧眼卫星在大质量X射线脉冲星1A 0535+262的2020年爆发中发现了毫赫兹QPO现象, QPO的中心频率在35-95 mHz范围内变化, 并且与源的流强呈正相关^[32-33]. QPO只在25-120 keV范围内被显著探测到, 在50-65 keV能段上的显著性最高.

值得注意的是, 这是天文学家首次在中子星系统中探测到能量超过80 keV的毫赫兹QPO. 研究发现该毫赫兹QPO的振幅随着能量的增加先增大后减小, 在50–65 keV处达到最大值. 此外, 在爆发峰值期间, 毫赫兹QPO展现出双峰结构, 双峰频率的差值约为常数值0.02 Hz, 是该系统中心星自转频率的2倍. 之前用于解释中子星系统中毫赫兹QPO现象的理论模型, 如拍频(Beat Frequency)模型、开普勒频率(Keplerian Frequency)模型和中子星的进动模型等, 均无法解释1A 0535+262中毫赫兹QPO的振幅随能量的演化. 慧眼卫星结果显示毫赫兹QPO的起源可能与非热辐射的变化有关, 吸积柱与吸积盘或中子星之间的共振是一种可能机制.

毫赫兹QPO也在X射线脉冲星Cen X-3中被探测到, 其频率在40 mHz左右^[34]. 与1A 0535+262不同的是, Cen X-3中毫赫兹QPO的频率与X射线流强不相关, 而是随轨道相位变化; QPO在小于20 keV能量范围内出现, 并且QPO的振幅随着能量的增加而逐渐减小. 同样, 拍频和开普勒频率等模型无法解释该毫赫兹QPO频率和振幅的演化, QPO有可能来自于吸积盘截断在共转半径处时产生的不稳定性过程.

RX J0440.9+4431是一颗周期为205 s的大质量X射线脉冲星, 该源在2022年年底经历了有记录以来最明亮的爆发, 峰值流量超过2 Crab. 在超临界吸积状态下, RX J0440.9+4431的高能脉冲轮廓峰值处经常出现短时标的强耀发. 慧眼卫星在5个脉冲轮廓峰值处的耀发中发现了准周期的调制^[35]. 不同脉冲中QPO的频率并不一致, 其在0.2–0.5 Hz范围内变化, 并且与源的流强无关. QPO出现在10–130 keV能量范围内, 在小于10 keV的低能段, QPO并不显著. 此外, QPO的振幅随着能量的增加而增加. 慧眼卫星的观测结果显示脉冲耀发中的QPO可能与吸积流中的不稳定性有关.

4 总结与展望

本文总结了8 yr来慧眼卫星在准周期振荡研究方面取得的重要成果. 慧眼在多个黑洞X射线双

星中发现了能量超过100 keV的QPO现象, 而QPO在高能段的振幅和延迟等性质显示其可能来自于小尺度喷流的进动. 基于慧眼卫星的大有效面积的优势, 可以对QPO短时标变化做精细的能谱和时变分析, 结果显示QPO的暂现现象很可能和吸积能量的重新分配有关. 此外, 慧眼对中子星中QPO现象的观测也对现有模型提出了更严格的挑战. 这些成果凸显了慧眼卫星在研究吸积系统高能辐射方面的优势. 尽管慧眼卫星的观测对QPO现有模型的限制和新理论模型的建立起到了关键作用, 但QPO物理起源的诸多问题仍未完全解决. 例如, 进动模型是否适用于所有类型的QPO? QPO和噪声之间的关系是怎样的? 谐频成分和半频成分是如何产生的?

未来下一代X射线天文卫星, 例如增强型X射线时变与偏振空间天文台(enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission, eXTP), 具有更大的有效面积和更高的能量和时间分辨率, 将以更高的精度检验现有的理论模型. 另一方面, 偏振的测量将会对QPO的物理模型提出更严格的限制, 例如进动模型预言了偏振角和偏振度随着QPO的相位有明显的调制, 但是基于X射线成像偏振探测器(Imaging X-ray Polarimetry Explorer, IXPE)数据的最新研究结果并没有发现这种调制^[36], 该结果对进动模型提出了挑战. 此外, 一些非常规方法的引入(如小波变换、希尔伯特黄变换等)对我们研究QPO的性质, 尤其是短时标的特征, 有很大帮助.

参考文献

- [1] Ingram A, Motta S E. *NewAR*, 2019, 85: 101524
- [2] Huang Y, Qu J L, Zhang S N, et al. *ApJ*, 2018, 866: 122
- [3] Ma X, Tao L, Zhang S N, et al. *NatAs*, 2021, 5: 94
- [4] Bu Q C, Zhang S N, Santangelo A, et al. *ApJ*, 2021, 919: 92
- [5] Liu H X, Huang Y, Bu Q C, et al. *ApJ*, 2022, 938: 108
- [6] Zhu H F, Chen X, Wang W, et al. *MNRAS*, 2023, 523: 4394
- [7] Jin Y J, Wang W, Chen X, et al. *ApJ*, 2023, 953: 33
- [8] Yu W, Bu Q C, Zhang S N, et al. *MNRAS*, 2024, 529: 4624
- [9] Méndez M, Peirano V, García F, et al. *MNRAS*, 2024,

- 527: 9405
- [10] Ma X, Zhang L, Tao L, et al. *ApJ*, 2023, 948: 116
- [11] Yang Z X, Zhang L, Huang Y, et al. *ApJ*, 2022, 937: 33
- [12] Gao C X, Yan Z, Yu W F. *MNRAS*, 2023, 520: 5544
- [13] Kong L D, Zhang S, Chen Y P, et al. *JHEAp*, 2020, 25: 29
- [14] Zhou D K, Zhang S N, Song L M, et al. *MNRAS*, 2022, 515: 1914
- [15] Yu W, Bu Q C, Yang Z X, et al. *ApJ*, 2023, 951: 130
- [16] Ding Q, Ji L, Bu Q C, et al. *RAA*, 2023, 23: 085024
- [17] Motta S E, Casella P, Henze M, et al. *MNRAS*, 2015, 447: 2059
- [18] Shui Q C, Zhang S, Zhang S N, et al. *ApJ*, 2023, 957: 84
- [19] Kara E, Steiner J F, Fabian A C, et al. *Nature*, 2019, 565: 198
- [20] Thomas J K, Buckley D A H, Charles P A, et al. *MNRAS*, 2022, 513: L35
- [21] Mao D M, Yu W F, Zhang J J, et al. *RAA*, 2022, 22: 045009
- [22] Chen X, Wang W, You B, et al. *MNRAS*, 2022, 513: 4875
- [23] Chen X, Wang W, Tian P F, et al. *MNRAS*, 2022, 517: 182
- [24] Zhang P, Soria R, Zhang S, et al. *A&A*, 2023, 677: A178
- [25] Zhang Y X, Méndez M, García F, et al. *MNRAS*, 2022, 512: 2686
- [26] Yang Z X, Zhang L, Zhang S N, et al. *MNRAS*, 2023, 521: 3570
- [27] Homan J, Bright J, Motta S E, et al. *ApJ*, 2020, 891: L29
- [28] García F, Méndez M, Karpouzas K, et al. *MNRAS*, 2021, 501: 3173
- [29] Trudolyubov S P, Borozdin K N, Friedhorsky W C. *MNRAS*, 2001, 322: 309
- [30] Jia S M, Bu Q C, Qu J L, et al. *JHEAp*, 2020, 25: 1
- [31] Jia S M, Qu J L, Lu F J, et al. *ApJ*, 2021, 913: 119
- [32] Ma R C, Tao L, Zhang S N, et al. *MNRAS*, 2022, 517: 1988
- [33] Reig P, Ma R C, Tao L, et al. *A&A*, 2022, 659: A187
- [34] Liu Q, Wang W, Chen X, et al. *MNRAS*, 2022, 516: 5579
- [35] Li P P, Tao L, Ma R C, et al. *MNRAS*, 2024, 529: 1187
- [36] Zhao Q C, Tao L, Li H C, et al. *ApJ*, 2024, 961: L42

Research Progress on Quasi-Periodic Oscillations Based on Observations from *Insight*-HXMT

ZHANG Liang QU Jin-lu ZHANG Shu

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

ABSTRACT Quasi-Periodic Oscillations (QPOs) are commonly observed in the light curves of X-ray binaries, and they are believed to originate from the innermost accretion flow around the compact object. Therefore, QPO can serve as a powerful probe for testing the general relativity effects in strong gravitational fields and studying the evolution of the accretion geometry around compact objects. Prior to the launch of *Insight*-HXMT (*Insight* Hard X-ray Modulation Telescope), research on QPOs primarily focused on the energy range below 30 keV. With its large effective area in the high-energy range, *Insight*-HXMT has opened a new window for studying the high-energy properties of QPOs. In this paper, we review the studies of QPOs in X-ray binaries using the *Insight*-HXMT data, mainly focusing on the high-energy properties of different kinds of QPOs, their physical origin and the evolution of the accretion geometry. We also present our perspectives on the topic.

Key words X-rays: binaries, accretion, accretion disks, black hole physics