# 利用NICER卫星数据探测与研究低质量X射线双星4U 1608-52中的mHz QPO信号

费　珍　燕

(湘潭大学物理与光电工程学院，湖南 湘潭　411105)

**摘要**:首次在NICER对中子星双星系统4U 1608-52的观测中,探测到毫赫兹频率上的准周期振荡(mHz QPO)信号,该信号非常显著且具有倍频谐波成分.进一步研究了mHz QPO信号的均方根振幅随能量的分布关系,结果显示,其均方根(rms)振幅-能量关系与在双星系统4U 1636-53中得到的结果一致,表明rms振幅-能量关系可能是这类mHz QPO信号的一种本质属性.

**关键词**:低质量X射线双星4U 1608−52;mHz QPO;均方根振幅-能量关系

**中图分类号**:P141.2　　**DOI**:10.19789/j.1004−9398.2021.06.006

## 0　引　言

低质量X射线双星系统是目前天文研究的前沿领域之一,其中包含了丰富的物理过程.2001年,Revnivtsev等[1]在中子星低质量X射线双星4U 1656-53、4U 1608-52和Aql X-1中探测到毫赫兹(mHz)频率上的准周期振荡(quasi-periodic oscillation,QPO)信号.这类mHz QPO信号和其他类型的准周期振荡信号有所不同,其物理性质较为独特[1−3].mHz QPO是发生于中子星表面一定位置深度的活动,其可以对中子星内部活动以及吸积盘和中子星表面活动之间的相互作用产生更深刻的认识.目前,已经建立简单的燃烧模型对mHz QPO进行说明,在观测上对mHz QPO特性进行了初步了解,但还无法对其起源进行确定,需要进行更多的研究,进一步推动mHz QPO理论结果的完善.

本文基于中子星内部构成探测器(neutron star interior composition explorer,NICER)的观测数据,首次在另一颗低质量X射线双星4U 1608-52中观测并研究mHz QPO信号.结果显示,在4U 1608-52的数据中存在明显的mHz QPO信号,其均方根(root-mean-square,rms)振幅-能量关系与在双星系统4U 1636-53中得到的结果一致.

## 1　理论部分

### 1.1　mHz QPO

目前观测到mHz QPO的特性为[1−3]:(1)mHz QPO信号的振荡频率较低,<14 mHz;(2)只有当双星系统在2.0~20.0 keV能段上的X射线光度($L$)处于$5\times10^{36}$~$11\times10^{36}$ ergs/s时,mHz QPO信号才可能出现;(3)mHz QPO信号只出现在<5.0 keV的软X射线能段;(4)mHz QPO和I型X射线暴存在紧密关系,当I型X射线暴出现时,之前存在的mHz QPO就会马上消失.

Heger等[4]表明当中子星表面的核反应介于稳定和不稳定的核燃烧之间的亚稳态过程时,就会形成mHz QPO.但是在模拟中显示,只有当双星系统吸积率接近1个爱丁顿吸积率时才会产生mHz QPO,而观测上基于mHz QPO出现时,双星系统流量推测出的吸积率却<20%爱丁顿吸积率.为了解决这一矛盾,Heger等[4]认为mHz QPO形成区域的局部吸积率可能高于整个中子星表面的平均吸积率;Keek等[5]表明在中子星自转的影响下,中子星表面的燃料将会被充分混合到表面较深的区域进行燃烧,如果进一步考虑从中子星表面流入的热量,就能够在观测推导的吸积率上模拟出mHz QPO;Keek等[6]研究表明,仅仅改变核燃料和核反应速率并不能在观测推导的吸积率附近形成mHz QPO.

mHz QPO起源于中子星表面核燃烧的理论得到了观测结果的支持.观测上显示,当4U 1608-52中出现mHz QPO时,千赫兹(kHz)频率准周期震荡(kHz QPO)信号的频率与2.0~5.0 keV能量范围内光子的数率呈现反相关[7].目前,一般认为kHz QPO的形成与吸积盘有关,其频率能够反映吸积盘内半

收稿日期:2021-03-03

径的位置.因此,其支持mHz QPO来源于中子星的物理图像:mHz QPO出现时,中子星表面的辐射压增大向外推动吸积盘,使得kHz QPO的频率随之改变.2008年,Altamirano等[2]认为4U 1636-53中mHz QPO的频率在I型X射线暴爆发之前系统性地降低,且QPO在X射线暴出现时消失.2019年,Mancuso等[8]在另一个mHz QPO源EXO 0748-676中发现了相同的现象.这些mHz QPO遇到X射线暴立即消失的现象表明mHz QPO与中子星表面的核燃烧密切相关.此外,在双星系统IGR J17480-2446中出现了mHz QPO和X射线暴之间的相互演化:随着吸积率的增加,X射线暴逐渐演变为mHz QPO;当吸积率降低时,mHz QPO演化成为一系列I型X射线暴[9].

### 1.2 4U 1608-52

4U 1608-52是一颗暂现低质量X射线双星系统,离地球的距离约为2.9~4.5 kpc[10-11].自1972年被发现以来,4U 1608-52每隔一段时间都会进入一次爆发期,统计表明,其2次爆发间隔的时间大约为85 d~2 a[10,12].1976年,首次在该双星系统中探测到I型X射线暴[13],从而证实了其中央致密体是一颗中子星.该系统中I型X射线暴的暴频震荡信号的震荡频率为619 Hz[10,14],表明4U 1608-52系统中的中子星以非常快的速度进行自转.2001年,Revnivtsev等[1]首次在这颗源中探测到mHz QPO信号.

## 2 研究过程

### 2.1 NICER数据处理

NICER安装于国际空间站(international space station,ISS),专门用于0.2~12.0 keV内X射线天文研究.目前,NICER探测器在双星系统4U 1636-53和GS 1826-238中已经探测到mHz QPO信号.

本文使用NICER数据处理软件和HEASoft 6.25版本的软件对原始观测数据进行处理.根据标准的NICER探测器处理流程,使用数据校准工具niceral对原始数据进行校准,使用数据筛选工具nimaketime进一步对数据进行筛选,剔除质量不好的数据段.使用工具Xselect从数据中生成能量为0.2~5.0 keV、时间分辨率为1 s的光变曲线.此外,分别生成能量为0.2~1.0、1.0~1.8、1.8~2.6、2.6~3.4、3.4~4.2和4.2~5.0 keV的光变曲线.

### 2.2 数据分析与结果

#### 2.2.1 mHz QPO的发现

对光变曲线进行处理,使用Lomb-Scargle周期图[15-16]搜索光变曲线中可能存在的mHz QPO信号,并设置3σ置信水平作为探测mHz QPO信号的标准.显示在4U 1608-52的观测数据中存在mHz QPO信号,其中在观测号为1050070129的观测中存在mHz QPO信号持续时间较长(约为800 s)、振幅较大且稳定,适合进行进一步的研究.因此,挑选出此次观测中的mHz QPO信号进行分析研究.此次观测位于4U 1608-52,探测2018年6月19日—7月11日期间一次爆发过程的衰退阶段,爆发期间2.0~20.0 keV的峰值强度约为1.6 photons·cm$^{2}$·s$^{-1}$. NICER对4U 1608-52的观测中存在mHz QPO信号的部分光变曲线如图1所示.能量范围为0.2~5.0 keV,持续时间约为830 s,时间分辨率为18 s. mHz QPO信号出现时对应的5.0 keV以下能段的光子数率平均值为110 count/s.

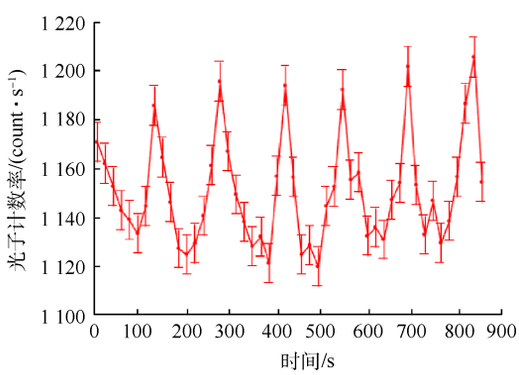
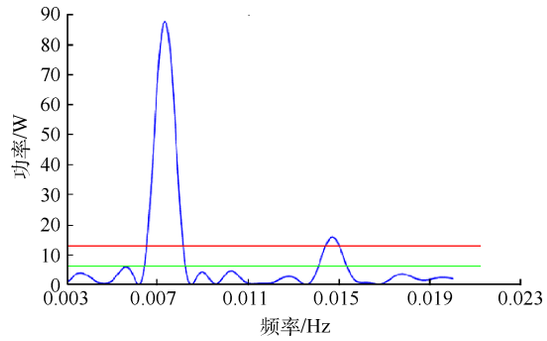



**图1 mHz QPO信号的部分光变曲线**

基于mHz QPO信号数据生成的Lomb-Scargle周期如图2所示.在7.3 mHz附近存在一个功率非常强的信号成分,也就是mHz QPO信号.这个信号成分的功率远大于Lomb-Scargle方法给出的3σ探测水平(图2中红线所示),说明mHz QPO信号非常显著.此外,在频率为14.6 mHz附近还存在另外一个功率较强的信号成分,由于其信号频率恰好为mHz QPO信号频率的2倍,可知该信号为mHz QPO信号的倍频谐波成分.其谐波成分超过了对应的3σ探测线(图2中绿色所示),其信号特征也非常显著.

#### 2.2.2 mHz QPO的rms振幅与能量关系

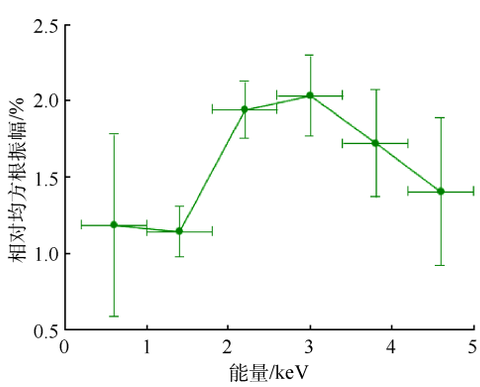
进一步对数据中的mHz QPO信号进行分析来研究其rms振幅-能量关系.使用模型contant+sine$_1$+sine$_2$来拟合0.2~5.0 keV能量上的光变曲线,其中constant模型用来描述光变曲线中的稳定流量成分,sine$_1$和sine$_2$分别用来拟合QPO的基波和谐波成分.从拟合的结果中获取mHz QPO的震荡周期.根据mHz QPO的震荡周期,使用HEAsoft软件中的




注：红色和绿色实线分别表示对mHz QPO倍频谐波成分的3σ探测线.

**图2　Lomb-Scargle周期**

eFold工具折叠不同能段上的光变曲线获得mHz QPO在不同能量上的平均轮廓.最后，使用同样的模型contant+sine$_1$+sine$_2$拟合不同能段上的mHz QPO轮廓.在拟合过程中，由于mHz QPO已经按其周期进行了折叠，所以，将模型中sine$_1$和sine$_2$成分的周期($T$)分别固定为1.0和0.5.基于拟合得到的结果，进一步计算不同能量下mHz QPO的rms振幅.使用公式rms$_1$=$A_1$/($2^{0.5}$×$C$)和rms$_2$=$A_2$/($2^{0.5}$×$C$)得到每个轮廓中mHz QPO和谐波成分对应的振幅rms$_1$和rms$_2$.其中$A_1$是sine$_1$函数的振幅，$A_2$是sine$_2$函数的振幅，$C$是常数分量的值.研究表明，NICER探测器的背景光子强度非常低，对rms振幅的影响可以忽略[17]，所以在计算rms振幅的过程中，也不考虑背景光子的影响.由于本次探测到的mHz QPOs信号数据段只有800 s左右，曝光时间较短，从而导致探测




注：数据点的横坐标表示对应能段的中心值，其误差棒表示所覆盖的能量范围.

**图3　不同能段上mHz QPO信号的rms振幅随能量的分布**

器收集到的光子数较为有限，最终计算得到的rms振幅误差较大(图3).总体来说，mHz QPO信号的rms振幅分布在0.5%～2.5%，在1.8～2.6 keV和2.6～3.4 keV上mHz QPO的rms振幅较大，详情请见表1.

**表1　不同能段上的相对均方根振幅**

| 能段/keV | 相对均方根振幅/% | 相对均方根振幅误差/% |
|---|---|---|
| 0.2～1.0 | 1.187 | 0.595 |
| 1.0～1.8 | 1.146 | 0.166 |
| 1.8～2.6 | 1.943 | 0.185 |
| 2.6～3.4 | 2.034 | 0.264 |
| 3.4～4.2 | 1.722 | 0.351 |
| 4.2～5.0 | 1.405 | 0.483 |

## 3　讨论与结论

现阶段关于mHz QPO的研究工作大多基于RXTE(Rossi X-ray timing explorer)卫星的观测数据.RXTE卫星的数据只覆盖了>3.0 keV的有效能段，因此无法用来研究<3.0 keV mHz QPO的rms振幅随能量的分布特点.Lyu等[17]基于NICER卫星的数据分析4U 1636-53中mHz QPO的rms振幅随能量的变化关系，表明mHz QPO的rms振幅<3.0 keV时随能量的上升而增加，>3.0 keV时随能量的升高而降低.为了进一步验证这个关系是否普遍成立，对NICER探测器观测的另外一颗双星系统4U 1608-52中的mHz QPO信号进行了处理分析，显示mHz QPO信号的rms振幅和能量的变化关系与Lyu等[17]在4U 1636-53中得到的关系相一致.

本文在NICER探测器对中子星双星系统4U 1608-52的观测数据中首次搜寻到了mHz QPO天文信号，该信号非常显著，此外，还在数据中探测到明显的倍频谐波成分信号.在4U 1608-52中研究mHz QPO的rms振幅-能量关系满足<3.0 keV时正相关，>3keV时反相关.rms振幅-能量关系很有可能是mHz QPO这类准周期信号的一种本质属性，为亚稳态核燃烧模型的改进提供了进一步的观测限制.mHz QPO的rms振幅-能量关系有望用来认证将来观测上新发现的频率在mHz范围上的QPO信号是否为起源于亚稳态核反应的mHz QPO.

## 参 考 文 献

[1] REVNIVTSEV M, CHURAZOV E, GILFANOV M, et al. New class of low frequency QPOs: signature of nuclear burning or accretion disk instabilities[J]. Astronomy and Astrophysics, 2001, 372: 138-144.

[2] ALTAMIRANO D, VAN-DER-KLIS M, WIJNANDS R, et al. Millihertz oscillation frequency drift predicts the occurrence

of type I X-ray bursts[J]. The Astrophysical Journal,2008,673(1):35-38.
[3] LYU M,MÉNDEZ M,ZHANG G B,et al. Spectral and timing analysis of the mHz QPOs in the neutron-star low-mass X-ray binary 4U 1636-53[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,2015,454(1):541-549.
[4] HEGER A,CUMMING A,WOOSLEY S E. Millihertz quasi-periodic oscillations from marginally stable nuclear burning on an accreting neutron star[J]. The Astrophysical Journal,2007,665(2):1311-1320.
[5] KEEK L,LANGER N,IN'T-ZAND J J M. The effect of rotation on the stability of nuclear burning in accreting neutron stars[J]. Astronomy and Astrophysics,2009,502(3):871-881.
[6] KEEK L,CYBURT R H,HEGER A. Reaction rate and composition dependence of the stability of thermonuclear burning on accreting neutron stars[J]. The Astrophysical Journal,2014,787(2):101.
[7] YU W F,VAN-DER-KLIS M. Kilohertz quasi-periodic oscillation frequency anticorrelated with millihertz quasi-periodic oscillation flux in 4U 1608-52[J]. The Astrophysical Journal,2002,567(1):L67-L70.
[8] MANCUSO G C,ALTAMIRANO D,GARCÍA F,et al. Discovery of millihertz quasi-periodic oscillations in the X-ray binary EXO 0748-676[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,2019,486(1):74-79.
[9] LINARES M,ALTAMIRANO D,CHAKRABARTY D,et al. Millihertz quasi-periodic oscillations and thermonuclear bursts from Terzan 5:a showcase of burning regimes[J]. The Astrophysical Journal,2012,748(2):82.
[10] GALLOWAY D K,MUNO M P,HARTMAN J M,et al. Thermonuclear (type I) X-ray bursts observed by the Rossi X-ray timing explorer[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series,2008,179(2):360-422.
[11] POUTANEN J,NÄTTILÄ J,KAJAVA J J E,et al. The effect of accretion on the measurement of neutron star mass and radius in the low-mass X-ray binary 4U 1608-52[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,2014,442(4):3777-3790.
[12] LOCHNER J C,ROUSSEL-DUPRE D. Recurrence times and periodicities in 4U 1608-52 as observed by VELA 5B[J]. The Astrophysical Journal,1994,435(2):840.
[13] TANANBAUM H,CHAISSON L J,FORMAN W,et al. Uhuru observations of 4U 1608-52:the "steady" X-ray source associated with the X-ray burst source in Norma[J]. The Astrophysical Journal,1976,209:125-130.
[14] MUNO M P,CHAKRABARTY D,GALLOWAY D K,et al. Millisecond oscillations and photospheric radius expansion in thermonuclear X-ray bursts[J]. The Astrophysical Journal,2001,553(2):157-160.
[15] LOMB N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data[J]. Astrophysics and Space Science,1976,39(2):447-462.
[16] SCARGLE J D. Studies in astronomical time series analysis Ⅱ:statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data[J]. The Astrophysical Journal,1982,263(2):835-853.
[17] LYU M,ZHANG G B,MÉNDEZ M,et al. XMM-Newton and NICER measurement of the rms spectrum of the millihertz quasiperiodic oscillations in the neutron-star low-mass X-ray binary 4U 1636-53[J]. The Astrophysical Journal,2020,895(2):120.

# Study of mHz QPO signal in low-mass X-ray binary 4U 1608-52

FEI Zhenyan

(Department of Physics and Optoelectronics, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105)

**Abstract:** The quasi-periodic oscillation(QPO)signal at the frequency of millihertz(mHz)was detected in the observation of 4U 1608-52 of neutron star binary system at the NICER for the first time. The mHz QPO signal was very significant and had frequency doubling harmonic component. The distribution of root-mean-square(rms)amplitude with energy of mHz QPO signal was further studied. The result showed that the relation between the amplitude and the energy was consistent with the one reported in another binary system 4U 1636-53, which indicated that the relationship between rms amplitude and energy may be an essential attribute of this kind of mHz QPO signal.

**Keywords:** low-mass X-ray binary 4U 1608-52;mHz QPO;rms amplitude-energy relation

(责任编辑:兰丽丽)