DOI：10.19789/j.1004-9398.2022.06.004
文献引用：庄千锋．对低质量X射线双星4U 1636-53中mHz QPO中子星表面热辐射的研究[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2022，43（6）：22-26. ZHUANG Q F. Investigation in the surface thermal radiation of neutron-star during mHz QPO in low-mass X-ray binary 4U 1636-53[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2022，43（6）：22-26.

对低质量X射线双星4U 1636-53中mHz QPO中子星表面热辐射的研究

庄　千　锋*

（湘潭大学物理与光电工程学院，湖南　湘潭　411105）

摘要：毫赫兹频率上的准周期震荡（mHz QPO）起源于中子星表面一种特殊模式的核燃烧，现阶段观测上对mHz QPO出现时中子星表面物理环境的研究仍非常有限．本文基于XMM-Newton望远镜对中子星X射线双星4U 1636-53的观测数据，通过能谱分析研究mHz QPO出现前后黑体热辐射成分的性质．研究显示，mHz QPO出现时中子星表面黑体辐射成分的温度降低了0.05 keV，热辐射流量降低了0.31×10^{-10} erg·cm^{-2}·s^{-1}．结果表明此次观测中，mHz QPO出现前燃烧区域的局部吸积率可能高于理论模型中选用的值．另外，mHz QPO发生时中子星表面热辐射流量的降低可能导致表面热辐射区域温度的降低．

关键词：低质量X射线双星；4U 1636-53；mHz QPO；黑体辐射
中图分类号：P141.2

Investigation in the surface thermal radiation of neutron-star during mHz QPO in low-mass X-ray binary 4U 1636-53

ZHUANG Qianfeng*

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

Abstract：The millihertz quasiperiodic oscillations（mHz QPO）originated from a special mode of nuclear burning on the surface of neutron-star，and the observation of the physical environment on the surface of neutron-star is still very limited in the current stage. Based on the observation data of neutron-star X-ray binary 4U 1636-53 by XMM-Newton telescope，the properties of blackbody thermal radiation components in the energy spectrum before and after the emergence of mHz QPO are studied by energy spectrum analysis. The results show that when the mHz QPO appears，the temperature and the surface thermal radiation flux of blackbody radiation component on the surface of neutron-star decreases 0.05 keV and 0.31×10^{-10} erg·cm^{-2}·s^{-1}，respectively. The results show that the local accretion rate in the burning area before the occurrence of mHz QPO in this observation may be higher than the value selected in the theoretical model. In addition，when the mHz QPO occurs，the decrease of the surface thermal radiation flux may lead to the decrease of the temperature in the thermal radiation region on the surface of neutron-star.

Keywords：low mass X-ray binary；4U 1636-53；mHz QPO；blackbody radiation
CLC：P141.2

收稿日期：2022-02-17

* 通信作者：983084762@qq.com

0 引　言

毫赫兹（mHz）频率上的准周期震荡（quasi-periodic oscillations，QPO）信号首先探测于中子星低质量X射线双星4U 1636-53、4U 1608-52和Aql X-1 3个系统[1].mHz QPO的性质与其他类型的QPO不同：只有当双星系统的X射线辐射光度（L）处于2.00～20.00 keV特定范围时，L=(0.5～1.5)×10^{37} ergs/s，mHz QPO才会出现，并且当I型X射线热核暴爆发时，mHz QPO就会立即消失.此外，mHz QPO具有非常低的频率，约为7～9 mHz，其相对均方根（root-mean-square，RMS）振幅随着能量的增加而显著降低[1-2].最新研究表明，在<3.00 keV能段，mHz QPO的RMS振幅随着能量的增加而增加，在>3.00 keV能段其随着能量的增加而降低[3].

目前，理论上认为mHz QPO的起源与中子星表面的核燃烧有关.Revnivtsev等[1]提出mHz QPO可能起源于中子星表面一种特殊模式的核燃烧，随后观测上得到的结果支持了该理论；Yu和Van Der Klis[4]表明4U 1608-52双星系统中mHz QPO出现期间，kHz QPO的频率与2.00～5.00 keV能量上X射线光子计数率呈反相关关系，吸积盘的内边缘受到中子星表面辐射产生的辐射压而向外运动，导致kHz QPO频率降低；Altamirano等[2]证实4U 1636-53中mHz QPO的频率在X射线暴爆发前呈现系统性降低，一旦频率降至<9 mHz，mHz QPO就消失并且出现I型X射线暴，这表明mHz QPO与核燃烧有着紧密联系；Linares等[5]表明随着吸积率的增加，X射线脉冲星IGR J17480-2446中的X射线暴逐渐演化为mHz QPO，反之亦然.这种演化进一步证实了mHz QPO起源于中子星表面的核燃烧.

Heger等[6]提出一个关于mHz QPO的理论模型，认为mHz QPO起源于吸积中子星表面的亚稳态核燃烧过程，相关模拟结果表明，当质量吸积率接近稳定核燃烧和不稳定燃烧之间的临界值时，中子星表面的核燃烧将出现震荡模式，震荡周期约为100 s，与观测到的mHz QPO频率一致.此外，该模型还能够解释mHz QPO仅出现在非常窄的X射线亮度范围内的现象.但是模型中触发mHz QPO的吸积率接近Eddington吸积率，比观测上从光度推导出的吸积率大了约一个数量级.为了解释模型和观测之间的差异，Heger等[6]认为燃烧区域的局部吸积率可能高于整个中子星表面的整体平均吸积率.随后，Keek等[7]提出如果中子星表面化学燃料充分混合，同时有更多热量流入燃烧区域，则可以在较低的吸积率上触发mHz QPO.

观测上对mHz QPO出现时能谱中黑体成分的温度进行了研究.Lyu等[8]表明mHz QPO能谱中黑体成分的温度与QPO频率之间不存在显著的相关性；Stiele等[9]表明4U 1636-53系统中的mHz QPO信号并不是来自于能谱中黑体成分的温度变化；Strohmayer等[10]认为GS 1826-238系统中mHz QPO信号可能与能谱中黑体成分的温度变化相关；Hsieh和Chou[11]表明4U 1636-53系统中mHz QPO信号与能谱中黑体成分的温度不存在显著的相关性.

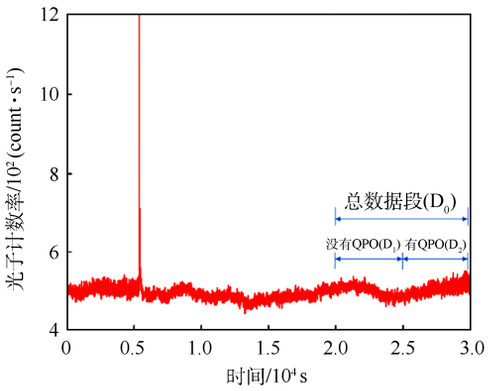
近年来，观测上对mHz QPO本身特征进行了较为广泛的研究[3,8-18]，但是对mHz QPO出现时中子星表面的物理环境仍缺乏足够认识.鉴于此，本文将关注mHz QPO出现前后中子星表面热辐射可能存在的差异.通过对X射线双星4U 1636-53中mHz QPO相关的能谱进行分析，研究此次mHz QPO出现与中子星表面热辐射之间可能存在的联系.

1 研究过程

1.1 XMM-Newton卫星数据处理与分析

分析欧洲XMM-Newton望远镜对4U 1636-53的一次观测数据，观测号为0500350301，数据获取于高能网数据库（https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl）.已有研究成果表明此次观测中存在mHz QPO信号，且其在I型X射线暴后重新出现[8].使用最新的处理软件SAS 19.1.0对原始的观测数据进行处理.应用命令epproc得到校准后timing观测模式下的事件文件，使用命令barycen将光子到达时间从卫星本地参考系转换到太阳系中心参考系，应用epatplot命令测试此次观测，结果显示存在较明显的pileup现象.为了消除其不利因素，在抽取光变曲线及能谱时，剔除了中央最亮的一列数据[8].同时根据XMM-Newton望远镜处理手册上的建议，只选取了单个和双个事件（PATTERN≤4）用于提取光变曲线和能谱，生成的光变曲线如图1所示.根据已发表的结果，在25 000 s左右时mHz QPO重新出现[8].因此，选取了观测开始20 000～30 000 s的总数据段（D_0），其中20 000～25 000 s数据段（D_1）内没有mHz QPO信号，25 000～30 000 s数据段（D_2）内有显著的mHz QPO信号.

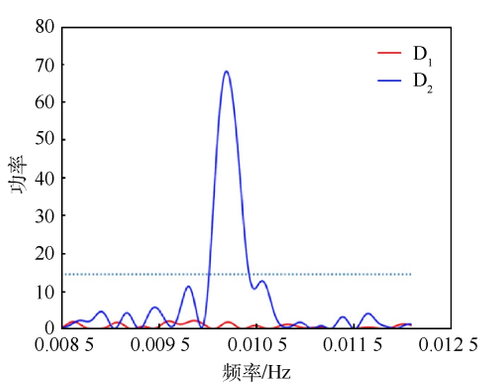
对于这2段数据，分别应用Lomb-Scargle方法



注:QPO为准周期震荡信号.

图1　光变曲线

生成对应的周期如图2所示.在D_1数据段内不存在QPO信号特征,而在D_2数据段内有显著的QPO信号,其震荡频率约为12 mHz.分别提取D_0、D_1和D_2数据对应的能谱.在提取过程中,选取一个以源为中心,宽41列的区域来提取能谱,并去除中央列区域以减小pileup效应.由于整个探测器都充满了源光子,使用XMM-Newton卫星对另一颗源GX 339-4的一次观测(观测号:0085680601)来提取背景能谱[8,19].本次观测中没有显著探测到GX 339-4的辐射,因此适合用来抽取背景谱.最后,使用命令specgroup确保能谱中每个能道内有≥25个光子.



注:虚线为信号的3σ置信水平;D_1表示20 000 ~ 25 000 s数据段信号;D_2表示20 000 ~ 25 000 s数据段信号.

图2　数据段D_1和D_2生成的Lomb-Scargle周期

1.2　能谱分析与结果

首先对D_0的能谱进行拟合.选取0.80 ~ 11.00 eV的能谱进行分析,剔除1.50 ~ 2.50 keV这部分仪器校准不完善的能段.使用黑体辐射模型Bbodyrad拟合从中子星表面出射的热辐射成分,应用多色黑体辐射模型Diskbb拟合从吸积盘生成的热辐射成分[20-21].同时,分别使用Powerlaw和Nthcomp模型[22-23]拟合能谱中的非热辐射成分.在拟合过程中,将吸积盘出射的热光子作为Nthcomp模型中康普顿散射的源光子[8,19],应用Tbabs模型拟合星际介质的吸收效应,其中元素化学丰度和电离截面分别选用Wilms等[24]和Verner等[25]工作中的数据,拟合的系统误差设置为0.5%.研究表明,Nthcomp模型的Γ和kT_e这2个参数无法被很好地限定,可能是由于在12.00 keV以上缺少数据.本文将这2个参数的值分别固定在Lyu等[8]工作中拟合此次观测能谱得到的值.使用Powerlaw模型和Nthcomp模型都能很好地拟合能谱,对应的自由度平均后的卡方值分别为1.06和1.08.

应用同样的模型对D_1和D_2的能谱进行拟合.由于D_1和D_2在时间上先后出现,因此其对应的物理参数应大致相同.在拟合过程中,将Bbodyrad的参数设为自由参数,其他模型参数全部固定等于D_0拟合结果中对应的值.拟合结果分别见表1和2,表中的误差为3σ置信水平.由拟合结果可知,mHz QPO不存在时,使用Powerlaw模型拟合得到的黑体成分的温度为(1.94±0.01) keV,而mHz QPO存在时对应的温度为(1.89±0.01) keV.结果表明,mHz QPO出现时对应的中子星表面温度要略低一些.Nthcomp模型拟合也给出了类似的结果:mHz QPO不存在时温度为(1.94±0.01) keV,而mHz QPO出现时温度降低为(1.89±0.01) keV.本文还计算了0.10 ~ 100.00 keV能量范围D_1和D_2数据段内对应的中子星表面热辐射的流量.在使用Powerlaw模型成分时,mHz QPO出现时D_2黑体辐射成分流量为(11.25±0.07)×10^{-10} erg·cm^{-2}·s^{-1},没有mHz QPO的D_1时期为(11.56±0.07)×10^{-10} erg·cm^{-2}·s^{-1}.在使用Nthcmop模型时,D_2和D_1能谱对应的中子星表面热辐射流量分别为(10.72±0.07)×10^{-10}和(11.03±0.07)×10^{-10} erg·cm^{-2}·s^{-1}.

2　讨　论

现有研究表明,mHz QPO起源于中子星表面的亚稳态核燃烧过程.因此,其出现时中子星表面的物理环境如温度、元素化学丰度等有可能呈现出一些独有的特点.根据Heger等[6]模拟的结果,当吸积率从0.950个爱丁顿吸积率降低到0.925个爱丁顿吸积率时,中子星表面稳定的核燃烧转换为亚稳态核燃烧,进而出现mHz QPO信号.因此,本文中D_1数据段可能对应中子星表面稳定核燃烧阶段,而D_2数据段则对应亚稳态核燃烧过程.亚稳态核燃烧模

表1　使用Powerlaw模型拟合的结果

模型成分	模型参数	总数据段	不存在mHz QPO数据段	存在mHz QPO数据段
TBabs	$N_{\rm H}/10^{22}$	$0.80^{+0.12}_{-0.43}$	0.80	0.80
Bbodyrad	kT/keV	1.92±0.02	1.94±0.01	1.89±0.01
Bbodyrad	Norm	7.84±0.43	7.61±0.13	8.11±0.14
Diskbb	$kT_{\rm in}$/keV	0.82±0.01	0.82	0.82
Diskbb	Norm	162.18±12.24	162.18	162.18
Powerlaw	Γ	$4.52^{+0.42}_{-1.08}$	4.52	4.52
Powerlaw	Norm	$0.55^{+0.19}_{-0.45}$	0.55	0.55

注：Norm为归一化常数.

表2　使用Nthcomp模型拟合的结果

模型成分	模型参数	总数据段	不存在mHz QPO数据段	存在mHz QPO数据段
TBabs	$N_{\rm H}/10^{22}$	$0.24^{+0.02}_{-0.01}$	0.24	0.24
Bbodyrad	kT/keV	$1.92^{+0.02}_{-0.01}$	1.94±0.01	1.89±0.01
Bbodyrad	Norm	$7.47^{+0.67}_{-1.09}$	7.22±0.12	7.76±0.13
Diskbb	$kT_{\rm in}$/keV	$0.81^{+0.02}_{-0.03}$	0.81	0.81
Diskbb	Norm	156.44±8.07	156.44	156.44
NthComp	Γ	2.52	2.52	2.52
NthComp	kT_e/keV	10.00	10.00	10.00
NthComp	Norm/10^{-2}	$1.93^{+5.34}_{-1.93}$	1.93	1.93

型模拟结果显示，稳定核燃烧阶段中子星表面辐射亮度大约为5.00×10^{23} erg·cm^{-2}·s^{-1}，而亚稳态核燃烧时生成的辐射亮度最大为8×10^{23} erg·cm^{-2}·s^{-1}，此时对应mHz QPO的峰值部分.当处于mHz QPO轮廓的底部时，流量最小，约为4.00×10^{23} erg·cm^{-2}·s^{-1}.因此，在mHz QPO出现期间，平均流量估算应为$(5.00\sim6.00)\times10^{23}$ erg·cm^{-2}·s^{-1}，高于mHz QPO不存在时稳定核燃烧期间的流量.这与本文测量出的流量结果不一致：mHz QPO出现时中子星表面热辐射流量比不存在mHz QPO时要低.一种可能是此次观测中不存在mHz QPO的D_1数据段对应的燃烧区域局部吸积率可能高于理论模型模拟时选用的0.950个爱丁顿吸积率，在更高的吸积率下，更多物质会被吸积到燃烧区域并进行稳定的核燃烧，因此能够生成更高的辐射流量.另外，mHz QPO出现时能谱中黑体成分的温度比mHz QPO不存在时略低一点，而拟合中获得的中子星表面黑体辐射的归一化常数(Norm)表明辐射区域的面积在mHz QPO出现时变大.由于mHz QPO出现时中子星表面热辐射流量低于不存在mHz QPO时的流量.因此基于黑体辐射流量与温度之间正相关的关系可知，QPO出现时黑体成分的温度也会低一些，与本文得到的结果一致.

3　结论与展望

本文基于一次XMM-Newton卫星的观测数据，对4U 1636-53系统中I型X射线暴后mHz QPO重现前后中子星表面的热辐射进行了研究.结果表明，在该双星系统中mHz QPO出现时中子星表面黑体辐射成分的温度降低了0.05 keV，热辐射流量降低了0.31×10^{-10} erg·cm^{-2}·s^{-1}，而热辐射区域的面积则会增大.这些变化可能与燃烧区域的局部吸积率有关，当mHz QPO出现前局部吸积率大于理论模型选用的值时，核燃烧就会释放更多的能量，因而生成更多的辐射流量和更高的温度.现阶段理论模型对mHz QPO出现时中子星表面物理环境的描述较为有限.因此，有必要从观测上探索相关物理特征.未来需要分析更多观测数据来进一步确认亚稳态核燃烧对中子星表面热辐射的影响.一方面，系统性分析NICER和XMM-Newton望远镜观测中具有mHz QPO的数据，扩大数据样本；另一方面，将其他具有mHz QPO的中子星双星系统也纳入研究样本，从而研究不同双星系统内mHz QPO出现期间中子星表面热辐射的性质和特征.

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 & Astrophysics, 2001, 372(1): 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): L35.
[3] 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.
[4] YU W, 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.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 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 & Astrophysics, 2009, 502(3): 871-881.
[8] 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.
[9] STIELE H, YU W, KONG A K H. Millihertz quasi-periodic oscillations in 4U 1636-536: putting possible constraints on the neutron star size [J]. The Astrophysical Journal, 2016, 831(1): 34.
[10] STROHMAYER T E, GENDREAU K C, ALTAMIRANO D, et al. NICER discovers mHz oscillations in the "clocked" burster GS 1826-238[J]. The Astrophysical Journal, 2018, 865(1): 63.
[11] HSIEH H E, CHOU Y. Phase-resolved analyses of millihertz quasi-periodic oscillations in 4U 1636-53 using the Hilbert-Huang transform [J]. The Astrophysical Journal, 2020, 900(2): 116.
[12] LYU M, MÉNDEZ M, ALTAMIRANO D. Discovery of a correlation between the frequency of the mHz quasi-periodic oscillations and the neutron-star temperature in the low-mass X-ray binary 4U 1636-53 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 445(4): 3659.
[13] LYU M, MÉNDEZ M, ALTAMIRANO D, et al. Millihertz quasi-periodic oscillations in 4U 1636-53 associated with bursts with positive convexity only[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 463(3): 2358-2362.
[14] LYU M, MÉNDEZ M, ALTAMIRANO D, et al. Discovery of an accretion-rate independent absolute RMS amplitude of millihertz quasi-periodic oscillations in 4U 1636-53 [J]. The Astrophysical Journal, 2019, 885(1): 5.
[15] 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): L74-L79.
[16] MANCUSO G C, ALTAMIRANO D, MÉNDEZ M, et al. Drifts of the marginally stable burning frequency in the X-ray binaries 4U 1608-52 and Aql X-1[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 502(2): 1856.
[17] TSE K, GALLOWAY D K, CHOU Y, et al. Detection of millihertz quasi-periodic oscillations in the X-ray binary 1RXS J180408.9−342058[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 500(1): 34-39.
[18] FEI Z Y, LYU M, MÉNDEZ M, et al. The harmonic component of the millihertz quasi-periodic oscillations in 4U 1636-53[J]. The Astrophysical Journal, 2021, 922(2): 119.
[19] SANNA A, HIEMSTRA B, MÉNDEZ M, et al. Broad iron line in the fast spinning neutron-star system 4U 1636-53[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 432(2): 1144-1161.
[20] MITSUDA K, INOUE H, KOYAMA K, et al. Energy spectra of low-mass binary X-ray sources observed from Tenma[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 1984, 36: 741-759
[21] MAKISHIMA K, MAEJIMA Y, MITSUDA K, et al. Simultaneous X-ray and optical observations of GX 339-4 in an X-ray high state[J]. Astrophysical Journal, 1986, 308: 635.
[22] ZDZIARSKI A A, JOHNSON W N, MAGDZIARZ P. Broad-band γ-ray and X-ray spectra of NGC 4151 and their implications for physical processes and geometry [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1996, 283(1): 193.
[23] ZYCKI P T, DONE C, SMITH D A. The 1989 May outburst of the soft X-ray transient GS 2023+338(V404 Cyg) [J]. Monthly Notices, 1999, 309(3): 561-575.
[24] WILMS J, ALLEN A, MCCRAY R. On the absorption of X-rays in the interstellar medium [J]. The Astrophysical Journal, 2000, 542(2): 914-924.
[25] VERNER D A, FERLAND G J, KORISTA K T, et al. Atomic data for astrophysics II new analytic FITS for photoionization cross sections of atoms and ions[J]. Astrophysical Journal, 1996, 465: 487.

(责任编辑:兰丽丽)