DOI:10.19789/j.1004-9398.2026.01.007　　**Open Access**
文献引用:臧珊珊.低质量X射线双星4U 1608-52能谱性质的研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2026,47(1):56-63. ZANG S S. The spectral properties of the low-mass X-ray binary 4U 1608-52[J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition),2026,47(1):56-63.

低质量X射线双星4U 1608-52能谱性质的研究

臧　珊　珊*

(湘潭大学物理与光电工程学院,湖南 湘潭　411105)

摘要:基于Suzaku卫星的观测数据研究低质量X射线双星4U 1608-52在不同能谱态下的能谱性质。本文应用最新的反射模型表明这些观测中存在显著的反射成分,研究显示吸积系统的物理参数在不同能谱态间的演化趋势与经典理论预测的趋势相同。当吸积盘为冕提供种子光子时,硬能谱态下超过50%吸积盘光子会进入冕中被散射,而在软态只有大约5%的吸积盘光子会进入冕。研究表明冕应该处于离中央中子星较近的区域,支持目前流行的冕的灯柱几何、喷流底部物理图像和中子星边界层模型。

关键词:低质量X射线双星4U 1608-52;反射;冕;吸积盘
中图分类号:P141.2　　**文献标志码**:A

The spectral properties of the low-mass X-ray binary 4U 1608-52

ZANG Shanshan*

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan　411105)

Abstract: The spectral properties of the neutron-star low-mass X-ray binary 4U 1608-52 under different spectral states were studied based on observation data from Suzaku satellite. This article applied the latest reflection model to indicate the presence of significant reflection components in these observations, which is inconsistent with previous work that did not find obvious reflection features. In addition, the results show that the evolution trend of the physical parameters of the accretion system between different spectral states is the same as the one predicted by classical theory. When the accretion disk provides seed photons to the corona, over 50% of the accretion disk photons will enter the corona and be scattered in the hard spectral state, while only about 5% of the accretion disk photons will enter the corona in the soft state. The study suggests that the corona should be located in a region closer to the central neutron star, supporting the current popular coronal lamp post geometry, physical images of jet bottoms, and neutron star boundary layer models.

Keywords: low-mass X-ray binary 4U 1608-52; reflection; corona; accretion disk
CLC: P141.2　　**DC**: A

0　引　言

低质量X射线双星(low mass X-ray binary, LMXB)是一个中央致密体(中子星或黑洞)和质量小于1个太阳质量的伴星组成。主星通过洛希瓣从伴星吸积物质,并主要以X射线辐射的形式释放

收稿日期:2025-01-11
*通信作者:zss2536450835@163.com

大量能量。基于双星系统在双色图和硬度-强度图中演化的轨迹，LMXB可以分为2类[1-3]：Z源和环礁源。Z源非常明亮，通常高于或接近爱丁顿亮度，其演化轨迹由水平分支、正常分支以及扩展分支构成。环礁源的亮度低于Z源[2-4]，一般分布在0.001~0.500个爱丁顿亮度[5]。环礁源根据其在硬度-强度图上的轨迹可以分为极端岛状分支、岛状分支以及香蕉状分支，对应的能谱态从硬态逐渐向软态转变。

LMXB中X射线的辐射主要来自几何薄、光学厚的吸积盘、中子星及其边界层和冕3个方面。吸积盘会发出热辐射，一般用多色黑体成分来描述，而中子星及边界层发出的热辐射近似为一个单色黑体成分。冕中含有大量高能电子，能够与进入其中的低能热光子发生逆康普顿散射最终形成非热的抛落成分出射。此外，从冕中出射的抛落成分光子和中子星表面辐射的热光子都有可能照射吸积盘，电离其表层物质并形成反射能谱。

LMXB 4U 1608-52是一个环礁源，距离约为3.6 kpc[5]。LMXB 4U 1608-52是一个暂现源，爆发时标一般在80 d到几年[5]，系统内中子星的旋转频率约为620.0 Hz[6]。观测上显示这颗源中铁发射线的强度与双星系统的2.0~20.0 keV的辐射强度呈现弱相关。Degenaar等[7]基于NuSTAR卫星的观测能谱显示在7.0 keV能量附近存在宽Fe-kα发射线，同时在20.0~30.0 keV附近存在显著的康普顿峰；Eijnden等[8]在NICER和NuSTAR的观测中发现了显著的反射特征并限制其倾斜角大约为56°；Padilla等[9]基于2010年3月期间Suzaku卫星LMXB 4U 1608-52的4次观测数据，表明能谱中的铁发射线特征并不显著，认为有可能是能谱中没有反射成分，亦可能是铁反射线受连续谱成分影响没有被有效探测到。鉴于此，本工作拟使用最新的反射模型重新分析这4次Suzaku的能谱。由于这4次观测较好地覆盖了这款源不同的能谱态，因此对其研究有望加深对该吸积系统在不同能谱态下物理几何性质演化方面的认识。

1　观测和数据处理

本文分析了2010年3月Suzaku卫星对LMXB 4U 1608-52的4次观测数据。Suzaku卫星由X射线成像光谱仪（X-ray imaging spectrometer，XIS）[10]和硬X射线探测器[11]2种望远镜组成。XIS有4个X射线探测器[12]，包括3个前照成像X射线敏感电荷耦合器件（charge coupled device，CCD）探测器和1个后照成像CCD探测器，探测的能量范围为0.2~12.0 keV。硬X射线探测器由PIN探测器（hard X-ray detectors-PIN，HXD-PIN）和GS0闪烁体探测器（GSO scintillators，HXD-GSO）组成，分别覆盖10.0~70.0和300.0~600.0 keV能量段。在此次工作中分析处理了Suzaku观测的XIS数据和HXD-PIN数据，相关观测信息见表1。

表1　卫星Suzaku 4U 1608-52的4次观测信息

Table 1　information from four observations of the satellite Suzaku 4U 1608-52

观测号	观测时间	曝光时间/ks
404044010	2010-03-11，01：51：49	4.6（FI）；28（HXD）
404044020	2010-03-15，16：39：01	4.4（FI）；25（HXD）
404044030	2010-03-18，23：58：05	15.8（FI）；14.1（HXD）
404044040	2010-03-22，23：45：23	31.8（FI）；14.5（HXD）

注：FI表示前照射能谱XIS0和XIS3的2个探测器的数据；HXD表示硬X射线探测器部分的能谱数据。

依据Suzaku数据标准处理流程对原始数据进行处理。首先应用Aepipeline工具基于最新版本的校准文件校准了Suzaku中的XIS和HXD数据，剔除不良像素并进行标准良好时间区间（good time interval，GTI）的选择，在Xselect工具中抽取原始光变曲线并去掉X射线暴；其次以源为中心从半径为100"圆形区域提取源能谱，同时从远离源的地方选取半径为50"的圆形区域提取背景谱，分析显示在4次观测中光子堆积效应并不显著，分别应用Xisrmfgen和Xissiarfgen工具生成再分配矩阵文件和辅助响应文件；最后使用Addascaspec命令将XIS0和XIS3数据进行组合形成前照射能谱（front illuminated，FI）文件，由于FI文件和后照射能谱（back illuminated，BI）存在一定的差异，采取和Padilla等[9]工作中相同的处理方法，即只使用FI能谱进行能谱分析。HXD-PIN的源能谱和背景能谱由Hxdpinxbpi命令生成。本文使用了假的事件文件修正了源能谱中的死时间。由于非X射线背景（non-X-ray background，NXB）的计数率比真实背景高10倍，将NXB光谱的曝光时间增加10倍以降低泊松噪声。为了考虑宇宙X射线背景的影响，模拟增加了一个宇宙X射线背景，并将其添加到NXB能谱中来获得总背景能谱。响应文件根据Suzaku数据

处理指导手册的要求直接从线上校准文件数据库(calibration database,CALDB)下载使用。

2 能谱分析及结果

2.1 相关的分析软件及理论模型

使用软件 Xspec 12.12.1[13]来拟合 XIS(1.0~10.0 keV)和 HXD-PIN(10.0~30.0 keV)的能谱。在拟合过程中,由于仪器校准的问题,去除了XIS能谱中1.5~2.3 keV部分。使用模型tbabs来描述视线方向上星际介质的吸收效应,选取了Wilms等[14]的太阳丰度数据和Verner等[15]的散射截面数据。为了描述不同仪器校准上的差异,在拟合中加入了一个常数因子,其中XIS能谱对应的常数因子固定为1。

使用bbodyrad+thcomp*diskbb+relxillCp模型拟合能谱。Bbodyrad模型描述了中子星表面的热辐射,diskbb模型拟合吸积盘出射的多色黑体谱[16-17]。使用thcomp来描述热光子被冕中高能电子散射后形成的非热抛落成分[18],其中进入冕中的热光子假定来自于吸积盘,进入冕中的热光子比例由参数Cov_{frac}表示。模型relxillCp用来拟合能谱中可能存在的相对论反射成分[19-20],对应的模型参数为倾斜角(i)、自旋参数(a)、吸积盘内半径(R_{in})和外半径(R_{out})及对应这2个区域的光子发射率(q_{in}和q_{out})、发射率改变的临界半径值(R_{br})、源的红移(z)、光子指数(Γ)、电离参数log(ξ)、吸积盘的密度log(N)、吸积盘的元素丰度(A_{Fe})、冕的温度(kT_e)、反射比例系数(R_{refl})和归一化常数(Norm)。拟合过程中z=0,$R_{br}=R_{out}$=400 R_g,$q_{in}=q_{out}$=3,a=0.29。由于倾斜角无法被有效限定,将其固定在56°。RelxillCp模型中的Γ和kT_e设为和thcomp模型中相应参数相同的值,另外吸积盘的元素丰度固定在太阳丰度,反射系数设为-1。最后,在Xspec中应用马尔科夫链蒙特卡洛方法(Markov chain Monte Carlo method,MCMC)计算得到了拟合参数的误差。

2.2 结果分析

4U 1608-52的4次观测得到的拟合结果见表2。使用bbodyrad+thcomp*diskbb+relxillCp模型能够较好地拟合4次观测数据,相比bbodyrad+thcomp* diskbb模型拟合的结果,加入反射成分relxillCp后,4次观测拟合的开发值分别减小了0.02、0.02、0.05和0.12。拟合结果显示从观测1到观测4,能谱明显从软态向硬态演化,其中观测1和观测2处于软能谱态,观测3和观测4处于较硬的能谱态。在软能谱态时中子星黑体辐射的温度约为2.20 keV,硬能谱态时黑体温度降为0.37 keV左右。吸积盘的温度在软能谱态时约为0.87~1.02 keV,在硬能谱态时降低至0.11 keV。

表2 应用反射模型拟合4U 1608-52的4次观测结果

Table 2 applying the reflection model to fit the four observation results of 4U 1608-52

模型	参数	观测1	观测2	观测3	观测4
tbabs	$NH_2/10^{22}\,cm^{-2}$	1.82 ± 0.05	1.78 ± 0.05	2.01 ± 0.05	1.35 ± 0.04
bbodyrad	kT_{BB}/keV	2.24 ± 0.06	2.21 ± 0.06	0.49 ± 0.02	0.37 ± 0.02
	Norm	$6.47^{+0.88}_{-0.47}$	$5.64^{+1.36}_{-0.31}$	$436.14^{+121.13}_{-38.75}$	$284.67^{+103.77}_{-43.05}$
	Flux /10^{-10} c.g.s	18.00 ± 2.00	$15.30^{+1.40}_{-1.50}$	$2.80^{+0.33}_{-0.51}$	$0.60^{+0.20}_{-0.05}$
thcomp	Cov_{frac}	0.61 ± 0.06	$0.58^{+0.04}_{-0.13}$	0.04 ± 0.01	0.05 ± 0.01
diskbb	kT_{disk}/keV	1.02 ± 0.03	0.87 ± 0.03	0.24 ± 0.01	0.11 ± 0.02
	Norm	$379.00^{+6.00}_{-8.00}$	$440.00^{+22.00}_{-77.00}$	$35\,562.00^{+12\,014.00}_{-3\,696.00}$	$62\,311.00^{+10\,786.00}_{-25\,597.00}$
	Flux/10^{-10} c.g.s	$86.90^{+3.60}_{-0.30}$	$53.50^{+0.30}_{-0.90}$	$18.20^{+2.60}_{-5.90}$	$3.07^{+2.00}_{-2.94}$
relxillCp	R_{in}/R_g	$5.09^{+1.28}_{-0^a}$	$5.09^{+0.39}_{-0^a}$	$12.43^{+3.83}_{-2.12}$	$67.58^{+14.06}_{-36.50}$
	Γ	$2.32^{+0.03}_{-0.07}$	$2.51^{+0.08}_{-0.11}$	$1.95^{+0.02}_{-0.02}$	$1.47^{+0.03}_{-0.03}$
	log(ξ)	$1.93^{+0.07}_{-0.16}$	$1.88^{+0.22}_{-0.03}$	$3.97^{+0.18}_{-0.06}$	$3.70^{+0.11}_{-0.03}$
	kT_e/keV	$3.00^{+0.17}_{-0^a}$	$3.55^{+0.21}_{-0.16}$	$14.82^{+1.91}_{-1.04}$	$8.24^{+0.24}_{-0.15}$
	log(N)/cm^{-3}	$18.33^{+0.51}_{-0.06}$	$18.33^{+0.30}_{-0.48}$	$17.35^{+0.64}_{-1.34}$	$19.00^{+0^a}_{-2.39}$
	Norm/10^{-4}	$179.00^{+1.10}_{-7.00}$	$91.58^{+6.50}_{-10.00}$	$47.19^{+2.61}_{-1.02}$	$11.50^{+1.50}_{-5.00}$
	Flux/10^{-10} c.g.s	$204.00^{+5.00}_{-129.00}$	$131.00^{+3.00}_{-88.00}$	$30.90^{+1.40}_{-2.72}$	$8.37^{+0.58}_{-1.12}$
	$\chi_v^2(\chi^2/dof)$	1.06(1 436.00/1 352.00)	1.18(833.00/705.00)	1.15(205.00/197.00)	1.20(227.00/188.00)
	Flux/10^{-10} c.g.s	$342.00^{+51.00}_{-21.00}$	$221.00^{+13.00}_{-38.00}$	$49.81^{+0.26}_{-1.00}$	$10.50^{+0.10}_{-0.40}$

注:[a]表示误差碰到了拟合参数的参数上下限。

冕中电子的温度变化与这2个参数的变化趋势正好相反，电子温度从软能谱态的4.00 keV以下上升到硬能谱态的8.00 keV以上。另外，光子指数从软能谱态的2.40左右下降到硬能谱态的1.50附近。这个结果说明能谱形状的硬化非常明显。吸积盘的电离度log(ξ)在软能谱态时为1.88~1.93，在硬能谱态时增加到约为3.70，表明吸积盘的电离程度由软能谱态的中度电离变成了硬能谱态下的高度电离。最后，拟合结果显示参数Cov_{frac}在软能谱态时为0.58~0.61，而在硬能谱态时这个比例会低很多，为0.04~0.05。

双星系统典型的物理参数随能谱态演化的结果如图1所示。中子星表面的温度(kT_{BB})和吸积盘表面的温度(kT_{dbb})遵循相同的演化趋势，即从软能谱态向硬能谱态过渡时二者逐渐降低。与之相反，冕中的电子温度(kT_e)在硬能谱态时较高，而在软能谱态下则较低。同时，光子指数呈现出逐渐降低的趋势。最后，吸积盘的电离度与进入冕中的热光子比例参数在软能谱态和硬能谱态下都显示出了明显的差异。结果表明冕和吸积盘的性质与双星系统的能谱态紧密相关。

应用反射模型对4次观测拟合得到的拟合能谱如图2所示。图中展示了拟合能谱和各个模型成分，以及以标准差为单位的残差。图(a~d)分别对应第1~4次观测对应的最佳拟合图，其中总拟合数据用灰色实线表示，能谱成分bbodyrad、thcomp*diskbb以及relxillCp分别以蓝色虚线、紫色实线以及玫红色点划线表示。基于这些拟合图可知所使用的模型能够较好地拟合观测能谱的数据点。此外，从各拟合成分的强度分布可知，4次观测中反射成分都比较显著。最后，中子星表面的热辐射成分在软能谱态的2次观测(观测1和观测2)较强，但在硬能谱态(观测3和观测4)中该成分比较弱。

2.3　结果对应的物理意义

本文拟合结果表明在软能谱态大量吸积盘光子都能进入冕中，相比而言，在硬能谱态只有少量的光子能够进入冕中被散射。这个结果与Fei等[21]近期的工作结果相一致。该论文基于NICER和NuSTAR的观测对4U 1636-53、XTE J1739-285和MAXI J1816-195这3个中子星LMXB系统的反射能谱进行了系统性研究。结果表明：对于处于转换能谱态的MAXI J1816-195，约28%的吸积盘光子会进入冕中被散射；而对于处于硬能谱态的4U 1636-53和XTE J1739-285，约只有4%的吸积盘光子会进入冕

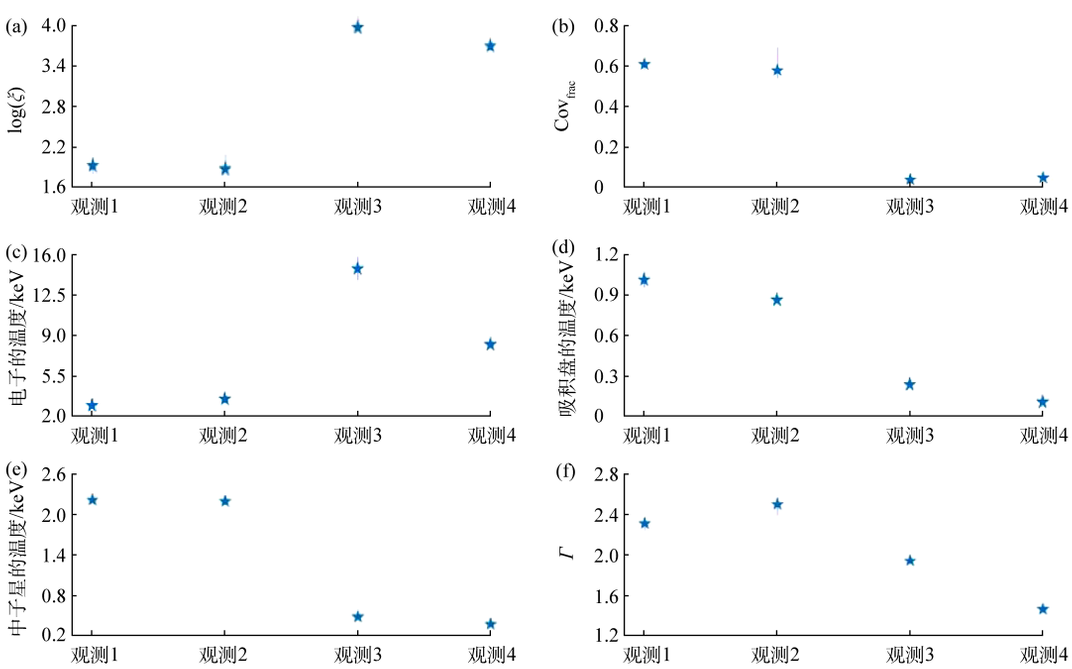


图1　拟合得到的典型参数的4次观测演化

(a)电离参数的对数值；(b)反射分数；(c)电子温度；(d)吸积盘温度；(e)中子星温度；(f)光子指数

Figure 1　the four-time observation evolution of the typical parameters obtained by fitting

(a)logarithmic values of ionization parameters;(b)reflection fraction;(c)electron's temperature;(d)the temperature of the accretion disk;(e)the temperature of neutron stars;(f)the photon index

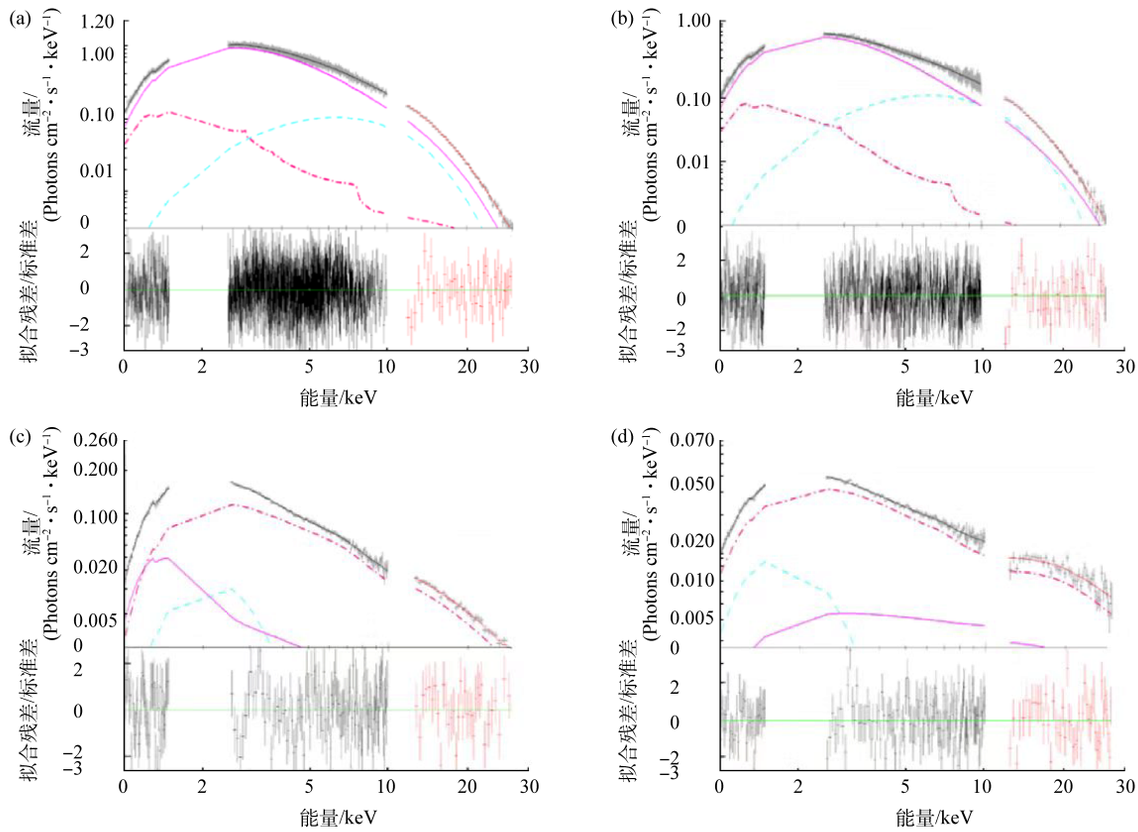


图2　4次Suzaku观测能谱的最佳拟合

(a)第1次;(b)第2次;(c)第3次;(d)第4次

Figure 2　the best fit of the energy spectrum from 4 Suzaku observations

(a)1st;(b)2nd;(c)3rd;(d)4th

中。这些结果能够对吸积系统中冕的几何位置进行一定的限定。

本文拟合的结果表明4U 1608-52吸积盘的电离度在不同能谱态存在显著差异:软能谱态时电离度较低,$\log(\xi)\approx1.9$;硬能谱态相对较高,$\log(\xi)>3.7$。硬能谱态时得到的吸积盘电离度与之前基于NuSTAR数据分析4U 1608-52在硬能谱态时获得的结果相一致:Degenaar等[7]基于relxill模型研究显示吸积盘的$\log(\xi)\approx4.0$;Eijnden等[8]分析NuSTAR和Swift的数据得到$\log(\xi)\approx3.7\sim4.2$。本文得到的软能谱态下吸积盘的电离度与之前其他一些源在软能谱态时的电离度较为接近。如:Mondal等[22]研究Ser X-1证实其软能谱态下吸积盘的电离度约为192.0;Degenaar等[23]证实软能谱态下LMXB系统1RXS J180408.9-342058中吸积盘的电离度约为119.0。软能谱态下吸积盘电离度较低的原因目前并不明朗。一个可能的原因是吸积盘在软能谱态时运动到了离中子星较近的区域,这种情况下照射吸积盘的光子除了来自冕以外,也有可能来自中子星。根据电离度的定义,其正比于照射流量。而中子星辐射的热光子的能量低于冕辐射的抛落成分光子,如果照射吸积盘的光子以中子星光子占主导,则照射吸积盘的流量可能相对较低,因而导致吸积盘的电离度也较低。这是一种可能的物理图像,其真实性还需未来使用品质更好的观测数据通过研究软能谱态时吸积盘的照射源是冕还是中子星来验证。

目前对冕的物理几何形状仍缺乏足够的了解。理论上提出了3种典型的冕的物理模型:(1)不同几何特征的静态冕。这类理论认为冕处于吸积系统某处静止不动[24]。(2)喷流的底部。该理论认为冕可能就是喷流的底部区域,部分吸积盘光子进入喷流底部区域被其中的高能电子散射形成观测上看到的非热抛落成分[25-26]。(3)辐射低效吸积流模型[27-28]。该理论认为冕是吸积流的一部分,通过散射低能光子产生硬X射线成分。此外,中子星吸积系统中中子星的边界层可能也扮演着冕的角色[29-32]。

本文获得的结果表明冕可能分布在中子星附近区域。根据经典理论：当吸积率较高时，吸积系统处于软能谱态，这种情况下，吸积盘运动到离中央中子星较近的区域；当吸积流较低时，吸积系统处于硬能谱态，吸积盘远离中央的中子星。结合本工作中的吸积盘光子进入冕中的比例，可以推断冕应该处于离中央中子星较近的区域。这种情况下：在软能谱态，吸积盘离中子星近，亦即离其附近的冕也很近，因而大量吸积盘光子能够进到冕中去；而在硬能谱态，由于吸积盘远离中子星，因而只有少量的吸积盘光子能够进入到中子星附近的冕中去。这个物理图像支持现阶段理论上提出的冕的灯柱几何，即冕位于中子星-吸积盘平面的中央垂线上某个位置。另外，该物理图像同时也支持理论上描述的喷流底部的模型[20,22]。该理论认为喷流的底部能散射吸积盘发出的软X射线光子，最终形成抛落成分出射。由于喷流的底部在几何上也位于中子星-吸积盘平面的中央垂线附近，因此，该物理图像与灯柱几何下的动态冕图像非常类似，不易被区分。最后，在中子星吸积系统中，中子星的边界层散射吸积盘发射过来的热光子也能与本文的结果相吻合。中子星边界层是吸积物质从吸积盘脱落以后减速到中子星表面自转速度过程中所形成的结构，因此边界层位于中子星附近，进入其中的吸积盘光子比例在软能谱态应会高于硬能谱态时的比例。对于运动冕/喷流底部模型和边界层模型，可以基于观测上得到的运动速度去尝试对其进行辨别。对于运动冕/喷流底部，理论研究表明其运动速度都非常高，接近中等相对论性速度[32]。而理论模拟显示中子星边界层的径向扩展速度非常低，一般小于声速[29]。如果将来有品质足够优的观测数据，基于反射模型relxilllpCp就可能估算冕的运动速度，进而从速度的角度对运动冕/喷流底部模型和边界层模型进行辨别。

3　讨　论

Padilla等[9]使用铁发射线模型拟合4次Suzaku的观测数据显示探测到的铁发射线不显著，因此没有进一步研究相关的反射特征。该研究认为能谱中可能没有显著的反射成分，或铁发射线成分被连续谱所掩盖因此无法被有效探测到。铁发射线作为吸积系统中最典型的反射特征，在吸积系统中已经被大规模地探测到。对于4U 1608-52这颗源，之前基于NICER探测器和NuSTAR卫星的数据都报道了显著的反射特征。铁发射线是由于吸积盘表面铁元素电离过程形成的。如果吸积盘未被有效电离，或其被完全电离，则不会形成显著的铁发射线特征。基于本工作中获得的吸积盘电离度可知，4次Suzaku的数据中吸积盘应该处于中度电离和重度电离的状态，因此在能谱中应该可以看到较显著的铁发射线特征。本文工作中2次软能谱态的拟合图中可以看到非常显著且展宽的铁线轮廓，也证明铁发射线应该是存在的。因此，Padilla等[9]的工作中未发现铁发射线应该是由于在拟合中其被模型中的连续成分掩盖了。本文基于最新反射模型relxillCp研究了能谱中的反射特征，即包括铁发射线和反射连续成分一起的辐射成分。当吸积盘被冕中的高能光子照射时，一部分高能光子会与吸积盘表层物质发生光致电离过程，形成包括铁发射线在内的一系列发射线和吸收线。与此同时，仍有大量未被吸收的高能光子会被吸积盘直接反射形成反射成分中的连续成分。反射连续成分的流量一般比较显著，因此需要对其进行单独拟合。Padilla等[9]工作中忽视了反射连续成分，因而会对最终得到的能谱拟合参数产生一定的影响，本文探测整个反射成分能够更加有效地判别能谱中是否存在反射。基于拟合得到的结果认为这4次观测中存在显著的反射成分。

4　结　论

本文基于物理上完整的反射模型，对之前未探测到反射特征的4次Suzaku卫星对LMXB 4U 1608-52的观测数据进行了研究。研究得到的结论为：(1)这4次Suzaku观测中应该存在较显著的反射成分，之前工作中没有找到显著反射成分的一个可能原因是所使用的铁发射线模型无法有效描述整个反射成分，有可能被拟合中的连续谱成分所掩盖；(2)拟合的结果表明该双星系统的典型物理参数，如光子指数、中子星表面温度、吸积盘温度、冕中电子温度都与经典吸积盘理论给出的演化趋势一致；(3)在软能谱态时吸积盘的电离度明显低于在硬能谱态时吸积盘的电离度；(4)硬能谱态下>50%的吸积盘光子会进入冕中，而在软能谱态下只有约5%的吸积盘光子能够照射冕，表明冕应该处于离中子星较近的

区域。这个结果支持现阶段理论上提出的灯柱几何、喷流底部模型和中子星边界层物理图像。

未来将对其他低质量中子星X射线双星进行类似的研究,重点关注参数Cov_{frac}在不同能谱态下的取值范围,从而进一步推断冕可能的几何位置和结构。同时,基于曝光时间足够长,数据品质较好的观测,在能谱分析中重点关注冕的运动速度,尝试去分辨运动冕/喷流底部模型和边界层模型。

©The editorial department of Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition) 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参 考 文 献

[1] HASINGER G, VAN DER KLIS M. Two patterns of correlated X-ray timing and spectral behaviour in low-mass X-ray binaries [J]. Astronomy & Astrophysics, 1989, 225: 79-96.

[2] DONE C, GIERLIŃSKI M, KUBOTA A. Modelling the behaiour of accretion flows in X-ray binaries: everything you always wanted to know about accretion but were afraid to ask [J]. The Astronomy and Astrophysics Review, 2007, 15: 1-66. DOI: 10.1007/s00159-007-0006-1.

[3] FORD E C, VAN DER KLIS M, MÉNDEZ M, et al. Simultaneous measurements of X-ray luminosity and kilohertz quasi-periodic oscillations in low-mass X-ray binaries [J]. The Astrophysical Journal, 2000, 537(1): 368-373. DOI: 10.1086/309032.

[4] HOMAN A C, VAN KNIPPENBERG D, VAN KLEEF G A, et al. Bridging faultlines by valuing diversity: diversity beliefs, information elaboration, and performance in diverse work groups [J]. Journal of Applied Psychology, 2007, 92(5): 1189-1199.

[5] NAKAMURA N, DOTANI T, INOUE H, et al. TENMA observation of X-ray bursts from X1608-52 [J]. Astronomical Society of Japan, 1989, 41: 617-639.

[6] 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(3): 157-160. DOI: 10.1086/320682.

[7] DEGENAAR N, MILLER J M, CHAKRABARTY D, et al. A NuSTAR observation of disc reflection from close to the neutron star in 4U 1608-52 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (Letters), 2015, 451(1): 85-89. DOI: 10.1093/mnrasl/slv072.

[8] EIJNDEN J, DEGENAAR N, PINTO C, et al. The very faint X-ray binary IGR J17062-6143: a truncated disc, no pulsations, and a possible outflow [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 475(2): 2027-2044. DOI: 10.1093/mnras/stx3224.

[9] PADILLA M A, UEDA Y, HORI T, et al. Suzaku spectroscopy of the neutron star transient 4U 1608-52 during its outburst decay [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 467(1): 290-297. DOI: 10.1093/mnras/stx020.

[10] KOYAMA K, TSUNEMI H, DOTANI T, et al. X-ray imaging spectrometer (XIS) on board Suzaku [J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2007, 59(1): S23-S33. DOI: 10.1093/pasj/59.sp1. S23.

[11] TAKAHASHI T, ABE K, ENDO M, et al. Hard X-ray detector (HXD) on board Suzaku [J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2007, 59(1): S35-S51. DOI: 10.1093/pasj/59.sp1. S35.

[12] SERLEMITSOS P J, SOONG Y, CHAN K W, et al. The X-ray telescope onboard Suzaku [J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2007, 59(1): S9-S21. DOI: 10.1093/pasj/59.sp1. S9.

[13] ARNAUD K A. XSPEC: the first ten years [C]// JACOBY G H, BARNES J. Astronomical data analysis software and systems V. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1996: 17.

[14] WILMS J, ALLEN A, MCCRAY R. On the absorption of X-rays in the interstellar medium [J]. The Astrophysical Journal, 2000, 542: 914-924. DOI: 10.1086/317016.

[15] VERNER D, FERLAND G J, KORISTA K, et al. Atomic data for astrophysics II. New analytic fits for photoionization cross sections of atoms and ions [J]. The Astrophysical Journal, 1996, 465: 487. DOI: 10.1086/177435.

[16] 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]. The Astrophysical Journal, 1986, 308: 635-643. DOI: 10.10861164534.

[17] MITSUDA K, INOUE H, KOYAMA K, et al. Energy spectra of low-mass binary X-ray sources observed from TENMA [J]. Astronomical Society of Japan, 1984, 36: 741-759. DOI: 10.1093/pasj/36.4.741.

[18] ZDZIARSKI A A, SZANECKI M, POUTANEN J, et al. Spectral and temporal properties of Compton scattering by mildly relativistic thermal electrons [J]. Monthly

Notices of the Royal Astronomical Society，2020，492：5234-5246. DOI：10.1093/mnras/staa159.

[19] DAUSER T，GARCÍA J，WILMS J. Relativistic reflection：review and recent developments in modeling [J]. Astronomische Nachrichten，2016，337（5）：362-367. DOI：10.1002/asna.201612314.

[20] GARCÍA J，DAUSER T，LOHFINK A，et al. Improved reflection models of black hole accretion disks：treating the angular distribution of X-rays [J]. The Astrophysical Journal，2014，782（2）：76. DOI；10.1088/0004-637X/782/2/76.

[21] FEI Z，LYU M，ZHANG G，et al. Spectral properties of the neutron star low-mass X-ray binaries 4U 1636-53，XTE J1739-285，and MAXI J1816-195 [J]. Astronomy & Astrophysics，2025，695：A85. DOI：10.1051/0004-6361/202451211.

[22] MONDAL A S，DEWANGAN G C，RAYCHAUDHURI B. On the disc reflection spectroscopy of NS LMXB Serpens X-1：analysis of a recent NuSTAR observation [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society，2020，494（3）：3177-3185. DOI：10.1093/mnras/staa1001.

[23] DEGENAAR N，ALTAMIRANO D，PARKER M，et al. Disc reflection and a possible disc wind during a soft X-ray state in the neutron star low-mass X-ray binary 1RXS J180408.9-342058 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society，2016，461：4049-4058. DOI：10.1093/mnras/stw1593.

[24] HAARDT F，MARASCHI L，GHISELLINI G. A model for the X-ray and UV emission from Seyfert galaxies and galactic black holes [J]. The Astrophysical Journal，1994，432：L95. DOI：10.1086/187520.

[25] MARKOFF S，FALCKE H，FENDER R，et al. A jet model for the broadband spectrum of XTE J1118+ 480-synchrotron emission from radio to X-rays in the low/hard spectral state [J]. Astronomy & Astrophysics，2001，372（2）：L25-L28. DOI：10.1051/0004-6361：20010420.

[26] MARKOFF S，NOWAK M A，WILMS J. Going with the flow：can the base of jets subsume the role of compact accretion disk coronae? [J]. The Astrophysical Journal，2005，635：1203-1216. DOI：10.1086/497628.

[27] FERREIRA J，PETRUCCI P O，HENRI G，et al. A unified accretion-ejection paradigm for black hole X-ray binaries-I. The dynamical constituents [J]. Astronomy & Astrophysics，2006，447：813-825. DOI：10.1051/0004-6361：20052689.

[28] NARAYAN R，YI I. Advection-dominated accretion：underfed black holes and neutron stars [J]. The Astrophysical Journal，1995，452（1）：710-735. DOI：10.1086/176343.

[29] D'AÌA D I，SALVO T，BALLANTYNE D，et al. A self-consistent approach to the hard and soft states of 4U 1705-44 [J]. Astronomy & Astrophysics，2010，516：A36. DOI：10.1051/0004-6361/200913758.

[30] POPHAM R，SUNYAEV R. Accretion disk boundary layers around neutron stars：X-ray production in low-mass X-ray binaries [J]. The Astrophysical Journal，2001，547：355-383. DOI：10.1086/318336.

[31] SAAVEDRA E A，GARCÍA F，FOGANTINI F A，et al. Relativistic X-ray reflection and photoionized absorption in the neutron star low-mass X-ray binary GX 13+ 1 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society，2023，522：3367-3377. DOI：10.1093/mnras/stad1157.

[32] BELOBORODOV A M. Electron-positron outflows from gamma-ray emitting accretion discs [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society，1999，305：181-189. DOI：10.1046/j.1365-8711.1999.02384.x.

（责任编辑：兰丽丽）