

慧眼对热核暴的宽能段观测*

陈玉鹏[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 慧眼卫星(*Insight Hard X-ray Modulation Telescope, Insight-HXMT*)自2017年成功入轨以来,已持续运行超过8 yr,积累了海量观测数据.在针对多个热核暴源的观测中,共探测到200余个热核暴事件.凭借其优异的宽能段探测能力(1–250 keV)和大有有效面积($>5000\text{ cm}^2@20\text{ keV}$),慧眼卫星通过对热核暴能谱和时变特征的深入分析,特别是在硬X射线能段($>20\text{ keV}$)的辐射特征研究,系统揭示了热核暴与吸积环境之间的相互作用机制.具体研究成果包括:首次在单个热核暴事件中观测到热核暴导致的高温冕冷却过程,为研究热核暴与冕的相互作用提供了直接证据;首次发现并证实了中子星表面辐射各向异性与吸积率之间的相关性,为理解中子星表面物理过程提供了重要线索;系统研究了热核暴引发的吸积辐射增强效应,以及吸积盘对热核暴的遮挡作用.这些成果不仅拓展了我们对热核暴物理过程的理解,也为中子星吸积系统的研究提供了新的观测视角.

关键词 X射线: 双星, 暴, 恒星: 中子星, 望远镜: 慧眼
中图分类号: P141; **文献标识码**: A

1 引言

恒星的能量来源为核聚变,同时天体可以通过引力对周围的环境产生影响,通过引力将周围物质吸引至天体并释放引力能的过程称之为吸积(accretion),吸积物理过程被用于解释观测到的X射线双星(X-ray binary)的爆发(outburst)现象.而致密星为中子星的X射线双星中存在能源来源为核聚变的观测现象,即热核暴(thermonuclear X-ray burst),又被称为一型X射线暴(type-I X-ray burst).

热核暴是被吸积到中子星表面的物质(大部分为氢或氦)不断堆积产生的不稳定的核聚变,表现为叠加在爆发光变上突然剧烈的暴发,在几秒钟

内峰值光度可达到爱丁顿极限,其能谱一般为黑体谱,暴发时标在秒至分钟量级,光变轮廓为快上升慢下降,并在流量降低阶段伴随能谱变软.理论上,最亮的热核暴的峰值光度为爱丁顿光度,其光压可致光球半径膨胀(photospheric radius expansion, PRE).其辐射的面积为中子星的表面积,可根据观测到的热核暴给出该中子星的质量、半径、距离和自旋等信息.同时,热核暴与周围的吸积环境产生相互影响,可利用热核暴做为探针研究吸积盘、冕等吸积环境.

热核暴自1975年在3A 1820–30首次探测到以来,截止2024年11月15日,已观测到有120个河内X射线双星产生热核暴¹;这些暴是X射线望远镜的主要观测目标之一,例如RXTE (Rossi X-ray

2024-10-11收到原稿, 2025-01-20收到修改稿

*国家重点研发计划(2021YFA0718500)资助

[†]chenyp@ihep.ac.cn

¹<https://personal.sron.nl/~jeanz/bursterlist.html>

Timing Explorer), NICER (Neutron star Interior Composition Explorer)和慧眼(Insight Hard X-ray Modulation Telescope, *Insight-HXMT*).

热核暴的暴发间隔为小时至天量级,在此间隔时间里的吸积爆发能与热核暴释能之比 α 为40–200. 假设没有外流(outflow),所有的吸积物质均落到中子星表面参与热核暴, α 值即引力能与核能辐射效率之比. $\alpha > 40$ 一直作为判定热核暴的依据之一,同时可以判断核聚变的物质组成(氢和氦的核聚变能量转换效率不同),并与二型X射线暴(Type-II X-ray burst)区分开来. 由于热核暴发现得早,二型X射线暴发现得比较晚,所以这两种X射线暴分别被称为一型X射线暴和二型X射线暴. 二型X射线暴光变轮廓与热核暴类似,但暴与暴的间隔较小,最短可达几十秒,且能谱为非热谱,暴前和暴后往往有连续谱的减少,形成类似双星爆发凹陷(dip)的结构,一般认为来源于吸积不稳定性. 目前河内仅有两个源被观测到二型X射线暴,即Rapid Burster (MXB 1730–335)和Bursting Pulsar (GRO J1744–28),目前已经发现了来自这两个二型X射线暴源中数千个二型X射线暴. 其中前者被观测到有热核暴,后者没有,可能的原因是后者的磁场更强($\sim 5.3 \times 10^{11}$ Gs).

绝大多数热核暴持续时间约为10–100 s. 根据其暴发总能量和核聚变能量转换效率,得出半径为10 km的中子星表面的点燃柱密度为 $y \sim 10^8$ g·cm². 由于氦的核聚变速度更快,一般认为短的上升时标(1 s左右)为氦的核聚变,长的上升时标(10 s左右)为氢的核聚变,到达峰值流量后,缓慢降低,衰减时标约10–100 s. 峰值黑体温度可达3 keV,衰减时伴随着黑体温度的降低,直至降到暴前的温度水平;但有些强源的热核暴在结束阶段未观测到黑体温度的降低,例如Cyg X–2,可能与其所在的吸积率比较高导致热核暴光子被冕散射有关.

对于流量最强的热核暴,其光度可达爱丁顿光度,光压会将中子星表面的光球层吹离中子星表面,引起光球层的扩展,即为光球扩展暴,其光球层可达几十千米的高度,并伴随暴能谱变软,黑体温度降低. 光变曲线上表现为:软X射线波段为单峰,硬X射线波段为双峰;能谱演化上表现为:

黑体温度双峰,即在光球扩展的开始和结束时黑体温度最高,可达3 keV,在光球扩展的中期光球半径最大,温度可降至1 keV以下. 光球扩展暴占热核暴总数的20%左右. 理论上,在吸积物质成分确定的情况下,爱丁顿光度仅与中子星质量有关,因此可以根据观测到的暴流量计算中子星质量,同时根据测到的黑体面积计算中子星的半径,以此限制中子星质能方程或状态方程(equation of state). 最近研究表明,热核暴的出射谱除了黑体成分外,还有和吸积环境相关的辐射,需要扣除该辐射后才能用于中子星质量等参数的测量.

理论上,中子星双星的吸积盘在靠近中子星表面时,由于吸积盘内区的开普勒速度远大于中子星表面的自转速度,吸积物质会在该区域减速,在中子星赤道区域形成一个过渡区域,被称为扩张层(spreading layer)或者边界层(boundary layer). 该区域温度可达几keV,高度可达几千米,和冕一起被认为是高软态(香蕉态)的非热成分的来源. 而对于冕,根据中子星双星爆发能谱拟合结果,并和黑洞双星类比,一般认为其温度在几keV至上百keV,光深 τ 为1–10,但其具体形态有几种说法:覆盖在盘上的盘冕,覆盖中子星表面的球冕,悬在中子星两极的“灯塔”(lamppost)模型,相对论的喷流(jet),或者上述几种的混合模型等. 但其具体形态仍不清楚.

在分析吸积盘的内半径时,使用Xspec中的diskbb模型进行拟合会受到视线方向上吸收的影响,尤其是在盘温度较低且望远镜有效面积的最低能量较高的情况下. 同时吸积盘辐射受到非热的冕或者边界层的影响,得到的吸积盘内半径需要进行修正. 既然热核暴发生在中子星表面,那么就会和周围的吸积盘、冕、边界层等吸积环境相互影响. 在热核暴被发现后,上世纪80年代就有理论工作者预言了这些相互作用^[1],例如吸积盘对热核暴的反射、热核暴辐射导致吸积率的增加等. 但由于当时望远镜的有效面积较小,只有几十到几百平方厘米,直至在近20 yr后具有约6000 cm²有效面积的RXTE卫星上天后才观测到这些相互作用.

热核暴和吸积环境相互影响包括:

1. 热核暴辐射导致冕温度的降低^[2-7], 同时被冕内的高温电子散射形成康普顿散射谱^[6, 8-9].

2. 热核暴辐射通过坡印亭-罗伯逊效应(Poynting-Robertson drag)导致吸积盘内区吸积物质减速导致吸积率增加^[10-13], 由于吸积盘内区已经落到中子星表面, 而粘滞作用来不及填满之前吸积盘的空隙, 导致热核暴后吸积流量减小;

3. 热核暴辐射的光压将吸积盘、冕吹离, 导致吸积辐射的减小, 同时吸积盘对热核暴辐射的遮挡发生变化^[14-15];

4. 热核暴辐射在吸积盘上的反射形成反射谱, 例如铁的荧光线^[16-19].

观测上, 最早发现热核暴和吸积环境相互作用是在持续时标为小时量级的超暴中. 一般来说, 热核暴的持续时间为秒至分钟量级. 而对于持续时间在几分钟至40 min量级的暴为中型(intermediate)热核暴, 持续时间在几小时的热核暴为超暴(superburst), 这两种罕见的长暴一般认为是来自氢或碳的突然核聚变. 对于持续时间在几十秒量级的热核暴中吸积流量的变化, RXTE和Chandra对来自于吸积毫秒脉冲星SAX J1808.4-3658的最强热核暴的观测中发现: 除了中子星表面的黑体辐射以外, 还有一个成分. 该成分的谱形和爆发谱形一致, 但爆发流量相对于暴前增加了20倍, 其能谱模型为blackbody+ $f_a * F_{\text{per}}$, 其中 f_a 为吸积谱增加量, F_{per} 为吸积谱形, 也就是说热核暴期间吸积流量增加了20倍, 吸积流量增加值相当于暴峰值流量的60%. 以上模型也被称为 f_a 模型, 该模型是解释热核暴期间偏离黑体谱的主流模型. 该观测现象与文献[20]在1989年理论预言的一致, 即热核暴的辐射通过坡印亭-罗伯逊效应(Poynting-Robertson drag)导致吸积率增加, 假设吸积盘内区紧贴中子星表面, 热核暴导致的吸积率增加的光度 $L_{\text{PR}} = 8\eta L/3(1 - \eta)$, 其中, L 为热核暴流量, η 为吸积物质从无限远落到中子星表面的能量转换效率. 取中子星半径为10 km, 即 $\eta=0.2$, 得 $L_{\text{PR}} = 0.6L$. 该模型和观测到的流量增加量相符合, 但没有观测到该模型预言的热核暴末期吸积率的减小. 另外一种可能为这种暴期间流量的增加来源于暴被吸积盘反射后的辐射再被冕散射, 即暴的辐射

首先被光学厚的吸积盘反射, 被反射出来的光子能量大部分 <0.5 keV, 该反射光子再被光学薄的冕散射. 利用RXTE、NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array)、NICER、AstroSat和慧眼卫星的数据也发现了类似的暴期间软X射线的超出, 例如Aql X-1、4U 1608-52、4U 1636-536、4U 1730-22、MAXI J1816-195等. 以上综述参见文献[19].

在慧眼卫星观测中, 我们从对近10颗吸积中子星的观测中发现了大约200个暴的样本, 如表1. 得益于慧眼卫星的大探测面积和宽能段, 我们给出了暴的能谱演化, 并研究了它们与吸积环境的相互作用.

表 1 慧眼卫星观测到的热核暴
Table 1 The thermonuclear bursts detected by
Insight-HXMT

Source	Burst number
4U 1608-52	~20
4U 1636-536	45
4U 1728-34	~10
4U 1730-22	10
Aql X-1	~40
Cyg X-2	~10
EXO 0748-676	1
MAXI J1816-195	73
SAX J1808.4-3685	1
SRGA J144459.2-60420	60

2 暴辐射对吸积辐射的影响: 暴期间吸积辐射中硬X射线的缺失和缺失的饱和

对于持续时间在几十秒量级的热核暴, 最早发现热核暴和吸积环境相互作用是在2003年, RXTE观测到Aql X-1的一个热核暴期间30-60

keV光变曲线上有流量的减少^[21],但显著性仅有 2σ . 2005年,通过合并Chandra和RXTE观测到的来自GS 1826–238的多个热核暴的数据,通过拟合0.5–40 keV暴期间的能谱发现其吸积辐射的冕的温度从20 keV降至3 keV^[22]. 2012年,我们通过合并IGR J17473–2721的几十个热核暴数据,在RXTE/PCA 30–50 keV的光变曲线上,发现暴期间存在显著性 $> 5\sigma$ 的缺失,缺失幅度在50%左右. 之后在更多的热核暴源中,若该源的吸积辐射的硬X射线辐射足够亮,例如Swift/BAT流量 > 100 mCrab,那么在热核暴中都能看到硬X射线辐射的缺失,利用RXTE、INGERGRAL、NuSTAR和慧眼的数据也发现了类似的硬X射线辐射的缺失,例如IGR J17473–2721^[2, 23]、Aql X–1^[3, 21]、4U 1636–536^[24–25]、GS 1826–238^[26–27]、KS 1731–260^[28]、4U 1705–44^[28]、4U 1728–34^[29]以及4U 1724–30^[30]. 如表2所示.

在慧眼卫星之前的X射线望远镜在硬X射线波段的探测面积相对较小,导致在单个暴中很难观测到 5σ 的缺失,因此硬X射线缺失的显著性是通过堆叠数十甚至数百次暴来获得的. 例如,对于4U 1636–536,硬X射线缺失是基于RXTE/PCA观测得出的36个暴叠加的结果.

慧眼上天后,在慧眼卫星探测到的4U 1636–536的一个暴中,我们就发现了硬X射线的缺失,如图1所示. 这是在2018年爆发期间出现的单个短的热核暴观测到的^[4]. 在40–70 keV能段中硬X射线辐射的缺失以 6.2σ 的显著性被观测到,与之前利用RXTE/PCA在一系列4U 1636–536的爆发中堆叠大量暴得出的结果一致. 此外,我们利用慧眼卫星首次对暴进行宽能段能谱拟合,并研究暴对吸积辐射的影响. 能谱拟合结果表明硬X射线的缺失出现在大于40 keV的吸积辐射谱中.

表 2 热核暴期间的硬X射线缺失
Table 2 The hard X-ray deficit detected during bursts

Source	n	Energy band /keV	Significance/ σ	F_{per} / (cts·s ⁻¹)	F_{b} / (cts·s ⁻¹)	Lag/s	Instrument
Aql X–1	1	30–60	2	10	5	–	RXTE/HEXTE
	21	40–50	6	0.4	–0.5	1.8±1.5	RXTE/PCA
	10	30–100	~40	~100	~50	~1	<i>Insight</i> -HXMT/HE
IGR 17473–2721	40	30–50	6	2	1	0.7±0.5	RXTE/PCA
4U 1636–536	114	30–50	3	1.5	0.6	2.5±1.5	RXTE/PCA
	1	40–70	6	15	–1	1.6±1.2	<i>Insight</i> -HXMT/HE
	7	30–79	–	~1	~0.5	–	NuSTAR
	18	30–100	16	–	–	–	<i>Insight</i> -HXMT/HE
GS 1826–238	43	30–50	21	1.7	0.8	3.6±1.2	RXTE/PCA
	90	35–70	–	10	0	–	INTEGRAL/ISGRI
KS 1731–260	16	40–50	4.5	0.3	–0.6	0.9±2.1	RXTE/PCA
4U 1705–44	30	40–50	4.7	0.3	–0.3	2.5±2.0	RXTE/PCA

表2 续
Table 2 Continued

Source	n	Energy band /keV	Significance/ σ	F_{per} /($\text{cts}\cdot\text{s}^{-1}$)	F_{b} /($\text{cts}\cdot\text{s}^{-1}$)	Lag/s	Instrument
4U 1728–34	123	40–50	3.4	~ 3	~ 0	–	INTEGRAL/ISGRI
4U 1724–30	1	30–80	–	100	80	–	AstroSat/LAXPC
MAXI 1816–195	66	30–100	15.7	40	28	~ 1	<i>Insight</i> -HXMT/HE
4U 1608–52	8	30–100	22.1	59	29	~ 1	<i>Insight</i> -HXMT/HE
SRGA J144459.2–604207	70	40–70	4	~ 5	-1 ± 1.5	0.81 ± 0.58	<i>Insight</i> -HXMT/HE

Note: the columns denote the source/burster name, number of bursts n used for the derived hard X-ray deficit, the X-ray energy band used for hard X-ray deficit, the significance of the deficit, the persistent/pre-burst count rate (F_{per}), the count rate during burst (F_{b}), the time lag of the hard X-ray deficit, and the telescope used for the deficit detection^[7], respectively.

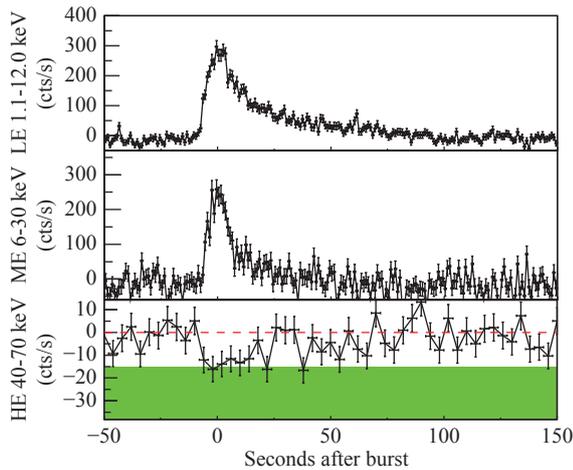


图1 慧眼卫星观测到来自4U 1636–536的一个热核暴的光变曲线。从上往下,依次为低能、中能和高能望远镜的光变曲线,能量范围分别为1.1–12 keV、6–30 keV和40–70 keV.低能、中能和高能望远镜的光变曲线的时间间隔分别为1 s、1 s和4 s.绿色区域为高能望远镜的本底水平^[4].

Fig. 1 The lightcurves of the burst from 4U 1636–536 observed by *Insight*-HXMT. The top, middle and bottom panels are the LE, ME and HE lightcurves in 1.1–12 keV, 6–30 keV and 40–70 keV, respectively. The time-bin for LE & ME is 1 s and HE is 4 s, the green zone in bottom panel indicates the background level for HE detectors^[4].

理论上,在吸积辐射的冕被暴从较高温度冷却至较低温度的情况下,硬X射线缺失比例在更高能量应该具有更大的值.例如,假设在爆发期间,辐射区域的温度冷却幅度为10%(从10.8 keV降至9.7 keV),则50–60 keV和30–40 keV的流量将分别下降50%和30%.以上估算与MAXI J1816–195的观测结果一致.通过叠加慧眼卫星观测到的MAXI J1816–195暴的光变曲线,我们观测到30–100 keV能段中硬X射线的缺失,显著性为 15.7σ ^[5].正如预期的那样,缺失的比例和能量相关:在更高能段(40–50 keV)中更大.我们还注意到,硬X射线缺失的比例在 >50 keV处稳定在50%左右.这可能与另一个硬X射线产生区域有关,即处在中子星两极的吸积柱,该区域的硬X射线产生不受暴的影响.此外,在4U 1636–536^[31]、4U 1608–52^[7](如图2所示)和Aql X–1中均发现硬X射线缺失的饱和.

硬X射线缺失饱和的现象表明,热核暴只能影响一部分的硬X射线产生,即除了高温冕以外,还存在一个多层的冕(例如,由稀疏的冕和致密的冕组成,热核仅影响前者)或者是喷流.考虑到该源的吸积毫秒脉冲星属性,我们更倾向于认为是喷流产生了这部分不受暴影响的硬X射线辐射.与

4U 1608–52不同, MAXI J1816–195是吸积毫秒脉冲星. 那么热核暴对产生于极冠处的脉冲信号是否有影响? 我们可以叠加MAXI J1816–195的热核暴的硬X射线数据, 而这项工作在以往的RXTE时代较难进行, 因为没有硬X射线强源存在那么多一型暴, 同时RXTE比较优势的软X波段容易受到暴本身的干扰, 例如热核暴导致死时间的增大. 通过慧眼的观测, 我们发现在热核暴期间, 依然能探测到来自极冠区的吸积供能的脉冲信号, 并且信号强度和热核暴发生之前相当, 没有观测到脉冲相位的漂移现象^[32]. 该结果表明脉冲辐射基本不受热核暴的影响, 即吸积辐射中有一半的硬X射线辐射来源于高温冕, 另一半来源于极冠处的脉冲辐射(喷流). 通过热核暴的观测将吸积辐射的两种硬X射线成分成功解耦. 这种硬X射线缺失的饱和也在4U 1608–52和4U 1636–536中被观测到, 而两者均不是吸积毫秒脉冲星, 在爆发光变和能谱中未发现脉冲成分, 可能说明吸积辐射中两种硬X射线成分的普适性.

3 吸积辐射对暴的影响: 被冕散射的暴光子

对于低/硬态或高/软态低质量X射线双星的吸积辐射, 其能谱可以用一个经吸收的热康普顿化模型(种子光子为diskbb)进行拟合, 该模型可在XSPEC中使用thcomp (nthcomp的更精确版本)进行描述^[33], 其中包括光深 τ 、电子温度 kT_e 和散射/覆盖分数 f_{sc} .

由于暴光子也可能受到吸积辐射区域的影响, 因此我们研究吸积辐射中使用的模型是否也能用于暴的能谱拟合. 通过将暴前的辐射视为背景辐射, 我们使用模型tbabs*thcomp*bb来拟合暴能谱, 其中tbabs为视线上的中性氢造成的吸收, 而thcomp的参数被固定为吸积辐射拟合得到的参数. 因此, 热康普顿化模型和黑体模型有着相同的自由度, 并且比 f_a 模型具有更多的自由度. 其中bb和thcomp分别代表来自中子星光球的暴辐射和吸积辐射区域对暴辐射的影响. 该模型使我们能够

评估来自吸积辐射区域被冕散射的光子和直接来自中子星表面的光子(未被冕散射)的贡献.

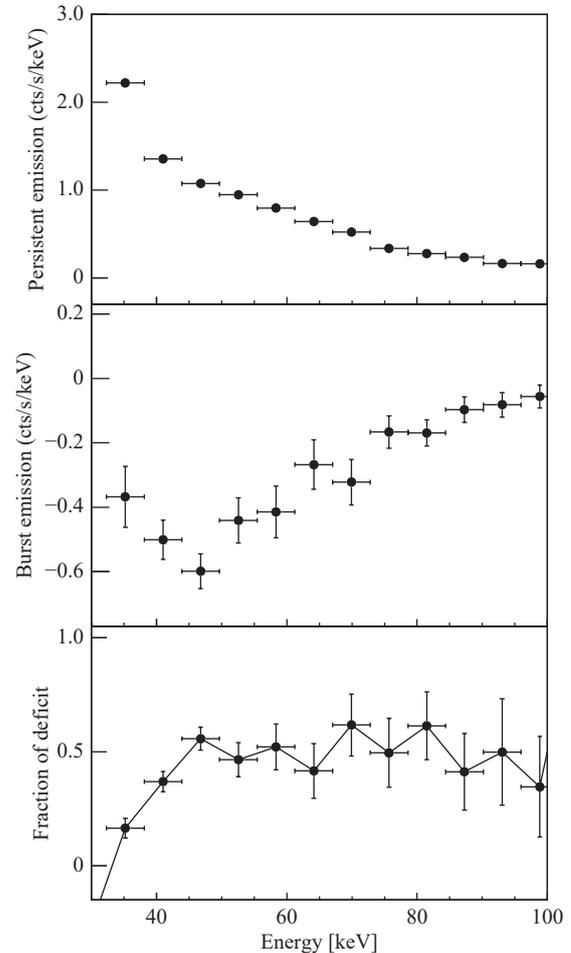


图 2 慧眼卫星观测到的来自于4U 1608–52的热核暴能谱结果^[7]. 上图: 吸积辐射谱, 中图: 暴期间的能谱, 下图: 缺失比例和能量的关系.

Fig. 2 The spectra of bursts detected from 4U 1608–52 by Insight-HXMT^[7]. Top panel: the spectrum of the persistent emission by HE. Middle panel: the detected spectrum of the bursts. Bottom panel: deficit fraction VS energy during the bursts.

在4U 1608–52^[6, 8]和4U 1730–22^[9]的光球扩展阶段, 该模型提供了最佳拟合结果, 并给出了物理上可接受的能谱参数. 我们发现, 这种卷积热康普顿化模型与 f_a 模型提供了同样好的结果, 但具有更多的自由度, 并且在光球扩展阶段(具有最低的黑体温度)统计上优于 f_a 模型, 如图3所示.

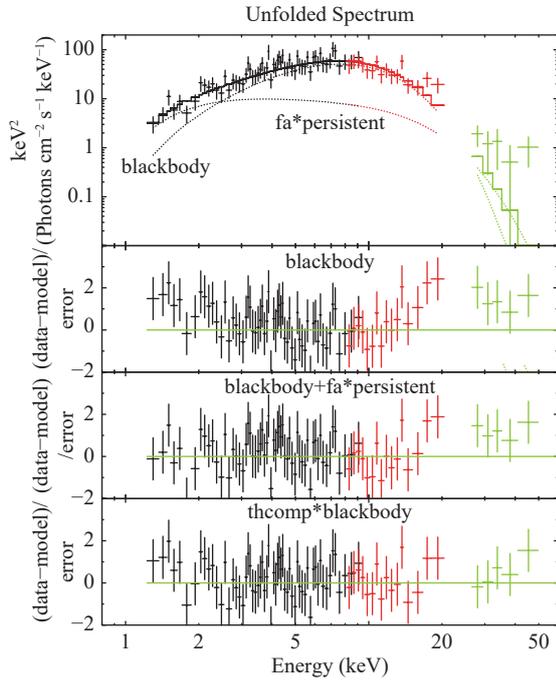


图 3 上图: 慧眼卫星的低能望远镜(黑色)、中能望远镜(红色)和高能望远镜(绿色)观测到的来自于4U 1608-52的热核暴能谱拟合结果(f_a 模型). 下面3图依次为不同模型的残差图: 黑体模型、 f_a 模型和康普顿卷积模型^[8].

Fig. 3 Top panel: the spectral fits results by LE (black), ME (red) and HE (green) of 4U 1608-52 (f_a model). The three panels below: residuals of spectral fits results by an absorbed black-body model (the 2nd panel), f_a model (the 3rd panel) and convolution thermal-Comptonization model (the bottom panel)^[8].

在慧眼对热核暴的观测数据中, 卷积热康普顿化模型可以对发生在软态的热核暴能谱进行较好的拟合, 即假设冕参数在热核暴期间未发生变化, 热核暴光子被冕散射. 但对于更高统计量的观测中, 例如NICER观测到的热核暴, 卷积热康普顿化模型的拟合结果尽管好于黑体模型, 但比 f_a 模型差. 可能的原因是冕参数在暴期间可能存在变化, 例如上节中提到的低硬态中冕的温度 kT_e 在暴期间从几十keV降至几keV, 冕的光深 τ 或者散射/覆盖分数 f_{sc} 可能也存在变化. 上述参数的变化, 将导致热核暴期间的冕在密度和几何的演化. 而上

述参数的变化, 往往需要宽能段且大有效面积的观测才能观测到, 例如NICER和慧眼的联合观测, 但目前缺乏此类观测.

4 吸积辐射对暴辐射的影响: 盘遮挡导致暴辐射各向异性的吸积率相关

在对光球扩展暴的能谱的观测中^[34], 绝大多数峰值流量在接近半径峰值时刻达到(局部)最大值, 这符合理论的预测. 然而, 在由慧眼卫星探测到的4U 1608-52和4U 1730-22的光球扩展暴中, 暴流量在光球刚刚升起和触底时是不同的, 峰值流量时刻也不是光球达到最大半径的时间点. 在光球扩展的上升阶段的流量短缺被认为对应于盘遮挡了中子星表面的部分区域^[6, 8-9, 14-15], 如图4所示. 在没有热核暴时, 吸积盘靠近中子星表面时, 中子星下半球的辐射被吸积盘遮挡, 导致只有中子星上半球的辐射被观测到; 伴随着热核暴的发生, 吸积盘内半径变大, 之前被吸积盘遮挡的中子星下半球才被观测到.

理论上, 暴辐射的各向异性还取决于吸积状态, 因为低/硬态中的吸积盘被认为在更远的距离被截断, 但在2022年之前都没有观测证据支持吸积状态相关的各向异性^[35].

由于低/硬态和高/软态中的爆发具有不同的吸积环境, 例如不同的内盘半径, 因此预期发生在这两种吸积态中的暴辐射应该具有不同的各向异性程度: 在高吸积率状态下应该观测到光球扩张暴的流量缺失, 而在低吸积率状态下不应该观测到吸积盘对热核暴的遮挡. 以上预测在慧眼卫星对4U 1608-52的热核暴观测^[6]中证实. 如图5所示, 高/软态的光球扩展暴存在吸积盘的遮挡, 而低/硬态的光球扩展暴不受吸积盘的遮挡. 然而, 在低/硬态中只有一个光球扩展暴, 这个结论的普适性需要进一步验证.

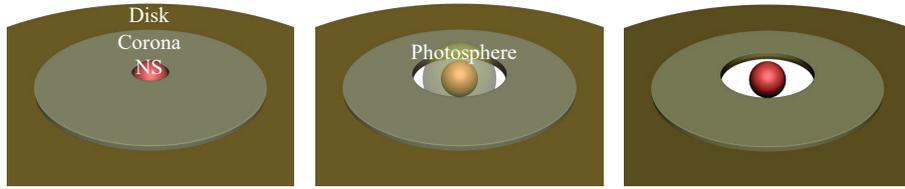


图 4 一个中子星X射线双星的中心区域的示意图, 分别展示了光球扩展阶段之前(左侧)、光球扩展阶段(中间)和光球扩展阶段之后(右侧)的情况. 在光球扩展阶段, 盘的内部被暴的辐射截断^[6].

Fig. 4 Illustration of the central region of an NS XRB before the PRE phase (left), in the PRE phase (middle) and after the PRE phase (right) during a burst, in which the inner part of the disk is swept away by the burst in the PRE phase^[6].

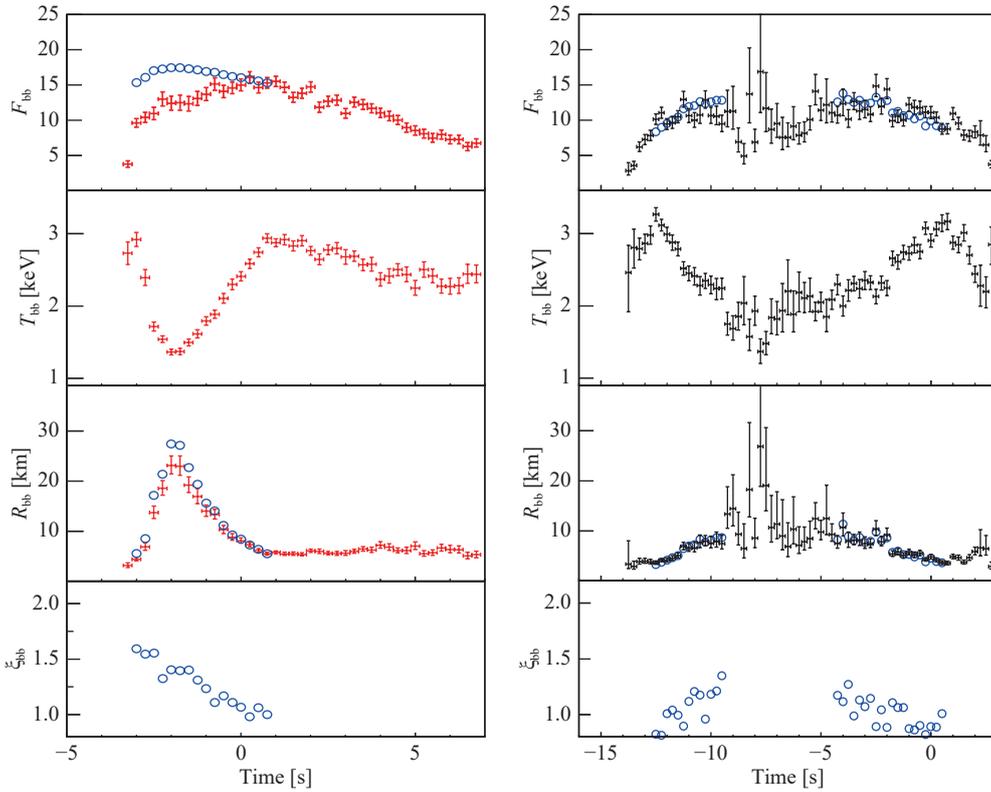


图 5 对于高/软态的暴(左)和低/硬态的暴(右), 模型预测的黑体流量 F_{bb} 、黑体温度 T_{bb} 、4kpc处光球半径 R_{bb} 、各向异性程度 ξ_{bb} 的时间演变, 用蓝色标记; 为了比较, 也给出了相应的观测参数. 对于右图, 由于低能望远镜无好数据, 我们忽略其光球扩展阶段中具有较大误差数据点, 例如温度 < 2 keV的数据点, 因为它们超出了中能望远镜和高能望远镜的能量范围^[6].

Fig. 5 For bursts in the high/soft (left) and the low/hard states (right), we plot the model-predicted temporal evolution of the blackbody bolometric flux F_{bb} , the blackbody temperature T_{bb} , the neutron star photospheric radius R_{bb} at 4 kpc, and the anisotropy parameter ξ_{bb} , which are marked by blue curves. The corresponding observed parameters are overlaid for comparison. For the burst in the low/hard state, due to the absence of the good time interval of LE, we exclude data points with large error bars ($> 30\%$) during the PRE phase where $T_{bb} < 2$ keV, as these fall outside the sensitive bands of the ME and HE detectors^[6].

5 总结与展望

目前慧眼卫星关于热核暴的科学结果主要集中在宽能段能谱的分析, 在热核暴和吸积环境相互作用的研究中给出了许多结果. 对于时域的观测结果, 例如暴频(burst oscillation)和毫赫兹准周期振荡(quasi-periodic oscillation), 虽均有观测, 但观测结果较少. 例如, 慧眼在4U 1608–52的热核暴中, 探测到其614 Hz的暴频, 但其显著性较低. 近两年来, 由于辐照导致慧眼低能望远镜2 keV以下的本底估计和标定的困难, 在天关卫星(爱因斯坦探针-EP)入轨并正常科学观测后, 天关的后随望远镜和慧眼的联合观测将给出0.5–250 keV的宽能段、高统计性的能谱和时变观测结果, 及热核暴领域更多的观测结果.

致谢: 本工作使用了慧眼卫星 (*Insight-HXMT*)的数据和软件, 该任务由中国国家航天局(CNSA)和中国科学院(CAS)支持.

参考文献

- [1] van Paradijs J, Lewin H G. *A&A*, 1986, 157: L10
- [2] Chen Y P, Zhang S, Zhang S N, et al. *ApJ*, 2012, 752: 34
- [3] Chen Y P, Zhang S, Zhang S N, et al. *ApJ*, 2013, 777: 9
- [4] Chen Y P, Zhang S, Qu J L, et al. *ApJ*, 2018, 864: 30
- [5] Chen Y P, Zhang S, Ji L, et al. *ApJ*, 2022, 936: L12
- [6] Chen Y P, Zhang S, Ji L, et al. *JHEAp*, 2023, 40: 76
- [7] Chen Y P, Zhang S, Ji L, et al. *MNRAS*, 2024, 531: 1756
- [8] Chen Y P, Zhang S, Ji L, et al. *ApJ*, 2022, 936: 46
- [9] Chen Y P, Zhang S, Ji L, et al. *ApJ*, 2023, 942: 97
- [10] Worpel H, Galloway D K, Price D J. *ApJ*, 2013, 772: 94
- [11] Worpel H, Galloway D K, Price D J. *ApJ*, 2015, 801: 60
- [12] Bult P, Altamirano D, Arzoumanian Z, et al. *ApJ*, 2021, 920: 59
- [13] Chen Y P, Zhang S, Zhang S N, et al. *JHEAp*, 2019, 24: 23
- [14] Shaposhnikov N, Titarchuk L, Haberl F. *ApJ*, 2003, 593: L35
- [15] Shaposhnikov N, Titarchuk L. *ApJ*, 2004, 606: L57
- [16] In't Zand J J M, Galloway D K, Marshall H L, et al. *A&A*, 2013, 553: A83
- [17] Ballantyne D R, Strohmayer T E. *ApJ*, 2004, 602: L105
- [18] Keek L, Ballantyne D R, Kuulkers E, et al. *ApJ*, 2014, 797: L23
- [19] Degenaar N, Ballantyne D R, Belloni T, et al. *SSRv*, 2018, 214: 15
- [20] Walker M A, Meszaros P. *ApJ*, 1989, 346: 844
- [21] Maccarone T J, Coppi P S. *A&A*, 2003, 399: 1151
- [22] Thompson T W J, Rothschild R E, Tomsick J A, et al. *ApJ*, 2005, 634: 1261
- [23] Chen Y P, Zhang S, Torres D F, et al. *A&A*, 2011, 510: 81
- [24] Ji L, Zhang S, Chen Y P, et al. *MNRAS*, 2013, 432: 2773
- [25] Güver T, Bostanci F, Boztepe T, et al. *ApJ*, 2022, 935: 154
- [26] Ji L, Zhang S, Chen Y P, et al. *ApJ*, 2014, 791: L39
- [27] Sánchez-Fernández C, Kajava J J E, Poutanen J, et al. *A&A*, 2020, 634: A58
- [28] Ji L, Zhang S, Chen Y P, et al. *A&A*, 2014, 564: A20
- [29] Kajava J J E, Koljonen K I I, Nättilä J, et al. *MNRAS*, 2017, 472: 78
- [30] Kashyap U, Chakraborty M. *MNRAS*, 2022, 512: 6180
- [31] Peng J Q, Zhang S, Chen Y P, et al. *A&A*, 2024, 685: A71
- [32] Ji L, Ge M, Chen Y, et al. *ApJ*, 2024, 966: L3
- [33] Zdziarski A A, Szanecki M, Poutanen J, et al. *MNRAS*, 2020, 492: 5234
- [34] Galloway D K, Muno M P, Hartman J M, et al. *ApJS*, 2008, 179: 360
- [35] Galloway D K, In't Zand J, Chenevez J, et al. *ApJS*, 2020, 249: 32

Broad-band X-ray Observations on Thermonuclear (Type I) X-ray Bursts by *Insight*-HXMT

CHEN Yu-peng

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

ABSTRACT Since its successful launch into orbit in 2017, the Hard X-ray Modulation Telescope (HXMT), also known as *Insight*-HXMT, has been operating continuously for over eight years, accumulating a vast amount of observational data. During its observations of multiple thermonuclear burst sources, it has detected more than 200 thermonuclear burst events. With its outstanding wide energy band detection capability (1–250 keV) and large effective area ($> 5000 \text{ cm}^2@20 \text{ keV}$), the *Insight*-HXMT satellite has conducted in-depth analyses of the energy spectra and time-varying characteristics of thermonuclear bursts, particularly focusing on the radiation features in the hard X-ray band ($> 20 \text{ keV}$), and systematically revealing the interaction mechanisms between thermonuclear bursts and the accretion environment. Specific research achievements include: the first observation of the high-temperature corona cooling process caused by a thermonuclear burst in a single event, providing direct evidence for the study of the interaction between thermonuclear bursts and the corona; the first discovery and confirmation of the correlation between the anisotropy of surface radiation of neutron stars and the accretion rate, offering important clues for understanding the physical processes on the surface of neutron stars; and systematic studies on the enhanced accretion radiation effect triggered by thermonuclear bursts, as well as the obscuring effect of the accretion disk on thermonuclear bursts. These achievements not only expand our understanding of the physical processes of thermonuclear bursts but also provide new observational perspectives for the study of neutron star accretion systems.

Key words X-rays: binaries, bursts, stars: neutron, telescopes: *Insight*-HXMT (Insight Hard X-ray Modulation Telescope)