

慧眼运行与科学成果

——慧眼观天四年记

贾淑梅 张 澍 屈进禄

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1. 慧眼卫星简介

“慧眼”硬 X 射线调制望远镜卫星(简称慧眼卫星,英文名称 Insight-HXMT),是我国第一颗 X 射线天文卫星^{①②③},其主要科学目标是:(1) 搜寻银盘面上的新的暂现源,监测已知的变源;(2) 观测 X 射线双星以研究强引力场或强磁场中物质的运动和辐射机制;(3) 监测研究伽马射线暴和引力波电磁对应体。慧眼卫星于 2017 年 6 月 15 日在酒泉卫星发射中心成功发射,至 2021 年 3 月已在轨运行约 3 年 9 个月。

慧眼卫星包含三个主要有效载荷:高能 X 射线望远镜(HE, 20~250 keV^④, 5100 cm²^⑤),中能 X 射线望远镜(ME, 8~35 keV, 952 cm²^{⑥⑦})和低能 X 射线望远镜(LE, 1~12 keV, 384 cm²^{⑧⑨}),具有宽 X 射线能区、硬 X 射线能区的大面积、高时间分辨以及软 X 射线能区的高能量分辨的能力,其伽马射线暴

(GRB)模式可以将能区扩展到 MeV(0.2~3 MeV, ~1000 cm²)并且具有超大的视场(~60%全天)。这些特性使得慧眼卫星独具优势,在观测爆发致密天体时能够“看得更精和更准”,可以给出致密天体基本性质、爆发演化以及辐射机制等方面的详细诊断。

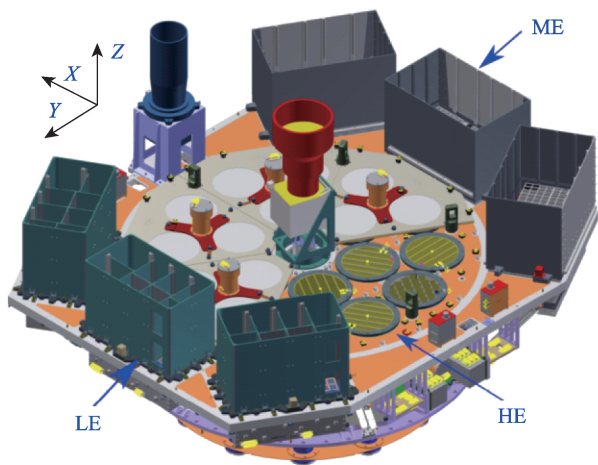


图2 慧眼卫星主要有效载荷



图1 2017年6月15日慧眼卫星发射升空

2. 慧眼卫星运行

慧眼卫星是一颗面向用户的空间科学卫星,它的日常运行与管理工作的慧眼科学中心负责^⑩,主要包括:定期向科学用户征集观测提案(通过慧眼卫星观测可以解决的科学问题);组织提案的技术可行性和科学意义评估,遴选慧眼卫星的观测任务;在满足卫星约束的条件下,制定观测计划,并由地面支撑系统和测控系统将观测指令上注卫星,

1) 1 keV = 1.602 × 10⁻⁹ erg

开展观测;接收卫星下传的观测数据,生成标准的数据产品并向用户发布,同时提供数据分析软件和技术支持服务。科学用户可以到慧眼网站(<http://www.hxmt.cn>)下载观测数据,开展科学研究。

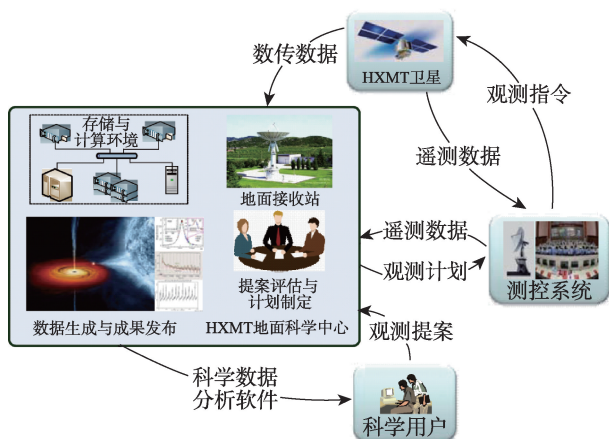


图3 慧眼科学中心运行流程

2.1 提案征集与评估

为充分发挥科学卫星的科学潜力,慧眼科学中心定期面向国内外的科学用户征集观测提案。目前,慧眼卫星已于2016年8~9月²⁾、2019年1~2月和2020年4~5月进行了三轮观测提案的征集,第四轮提案征集也将于2021年4月开始,详见<http://proposal.ihep.ac.cn/proposal/index.jsp>。除国内相关天文研究单位外,欧洲及美国等相关科研单位也提出了利用慧眼进行科学观测的提案,包括利用国内外天文设备进行联合观测的提案,且数量在逐年增加,体现出了慧眼卫星的国际影响力。此外,为加强对临时爆发现象的观测和研究,慧眼科学中心全年接收临时观测提案(即ToO观测提案)的申请。

提案征集完成后,为保障其科学目标的实现,慧眼科学数据中心组织对这些提案进行技术可行性审查和科学意义评估,遴选出符合慧眼卫星观测能力和观测约束的提案,确定慧眼卫星的年度观测任务。

2.2 观测计划制定

综合考虑观测任务的约束如观测时间、观测频

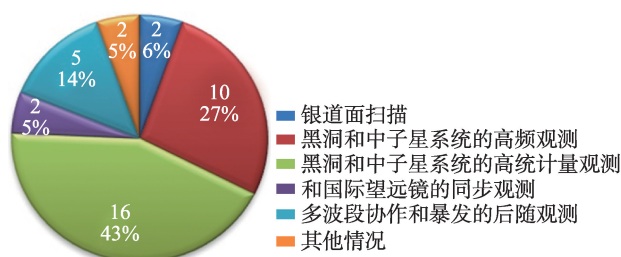


图4 第二轮慧眼卫星提案征集情况统计

次要求、相位依赖关系、提案等级等,以及空间环境的情况如太阳避免角、南大西洋异常区(SAA区)、地球遮挡、月球影响等,慧眼科学中心首先对观测任务进行年度整体规划,以实现卫星观测效率最大化,即为长期观测计划。在具体执行观测任务时,需要在长期观测计划的基础上细化出更为具体的观测活动,如观测起止时间、观测模式、姿态机动、数据存储与下传等,即为短期观测计划。同时,为应对临时情况,慧眼科学中心可以快速响应ToO观测申请,经首席科学家批准后,终止正在进行的观测,启动ToO观测计划。

目前,慧眼科学中心已制定700余个短期观测计划和30余个ToO观测计划(<http://hxmt.cn/ObsPlan.jhtml>),顺利完成了所有观测需求,为慧眼卫星科学目标的实现和科学成果的产出提供了重要保障。

2.3 数据处理与发布

慧眼科学中心接收到经过预处理的观测数据后,将不同探测器、不同观测模式的数据转换为天文数据通用的FITS格式;应用数据分析软件,根据不同探测器的工作状态,生成不同级别的科学数据产品及标定文件;同时,通过科学数据的快视分析对暂现源进行监测,一旦发现暂现源或新源,利用一个或几个轨道的观测数据进行粗略定位,并在必要时启动ToO观测。在数据保护期之后,所有观测数据将通过数据发布网页向国内外用户公开发布(<http://archive.hxmt.cn>),同时向用户提供数据处理软件及技术支持服务(<http://hxmt.cn/UserGuide.jhtml>)。

2) 第一轮提案征集在卫星发射前,以慧眼卫星核心科学为主,执行期2年。

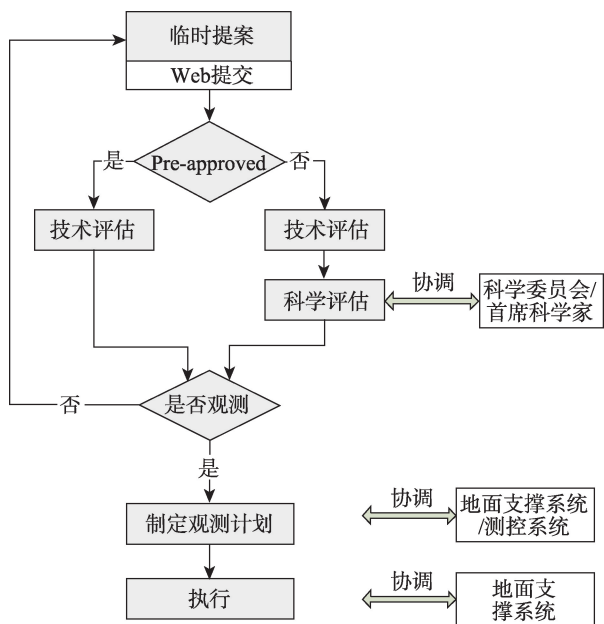


图5 慧眼卫星临时观测计划制定流程

截止2020年12月31日,慧眼卫星共生产标准数据产品4376个,已分5个批次公开发布数据1869个,约10.1 TB。为方便科学家应用卫星观测数据开展科学研究,慧眼科学中心分别于2018年1月、2018年12月和2020年11月组织了三次“慧眼卫星用户大会”,详细介绍慧眼卫星的观测优势及数据分析方法,慧眼卫星的数据得到了广泛的推广和应用。

2.4 有效载荷监测与标定

监测有效载荷工作状态,及时发现有效载荷性能变化和工作异常,保证载荷安全运行是慧眼科学中心的主要工作之一。同时,针对有效载荷在轨性

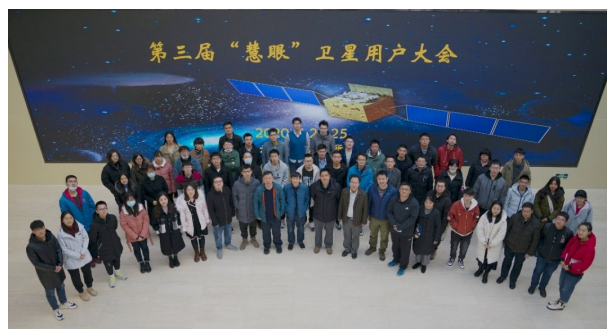


图6 第三次慧眼卫星用户大会合影

能的变化,慧眼科学中心需要定期开展在轨标定,并与模拟工作相结合建立响应模型、确定模型参数,得到不同探测器能量与能道关系、能量分辨率、探测效率等,进而生成不同能量光子的有效探测面积和能量响应矩阵文件等。慧眼科学中心根据载荷性能的实际情况及及时更新标定数据库(<http://hxmt.cn/caldb.jhtml>)^⑧。

2.5 已观测源及天区分布汇总

慧眼卫星已开展3年多的科学观测,包括:全银道面扫描、脉冲星、超新星遗迹、黑洞双星、中子星双星、河外天体源和空天区等。表1为慧眼卫星2017年6月15日至2021年2月28日的观测统计情况。

3. 科学成果

慧眼卫星的科学成果涵盖很多方面^{⑨⑩}(参见2020年发表的JHEAp慧眼专辑),如:X射线双星爆发演化,中子星和黑洞的基本性质,银道面扫描及X射线源的监测,以及X射线脉冲星导航在轨验证



图7 有效载荷性能监测

(a) 对高、中、低能望远镜探测模块的监测; (b) 对高能望远镜18个探测模块计数率的监测

表1 慧眼卫星观测源信息统计(20170615-20210228)

观测类型	源类型	源数目	观测次数	曝光时间(ks)
定点观测	超新星遗迹	2	39	3300
	孤立脉冲星	4	153	4090
	黑洞X射线双星	14	745	12860
	中子星X射线双星	43	982	21380
	河外天体	16	99	1540
	空天区	21	373	3880
	其他	14	83	3170
小天区扫描	Crab天区	1	92	4390
	Vela天区	1	3	130
	Cygnus天区	1	2	90
	银道面扫描	89	2241	25020

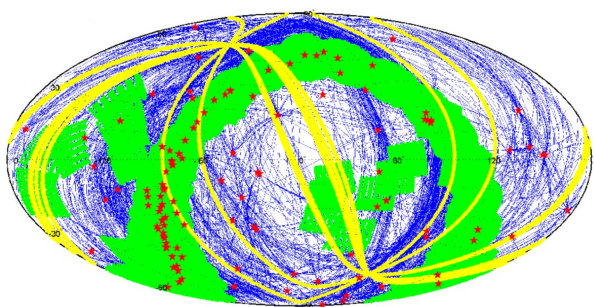


图8 慧眼卫星已观测源在天空上的分布
红星代表定点观测的源,绿色区域为小天区扫描区域,黄色带代表全天扫描扫过的天区,蓝色线为卫星姿态机动的路线。



图9 慧眼卫星学术论文展板

等³⁾。目前,已经投稿和发表了约80篇学术论文。

3.1 X射线双星爆发演化方面

X射线双星按照伴星质量大小分为大质量和小质量X射线双星,按照致密星的性质分为黑洞和中子星X射线双星。X射线双星的爆发一般源于伴星物质的吸积,爆发经历吸积盘,热冕,喷流以及

外流等复杂的物理过程和演化。对于低质量黑洞X射线双星来说,由于其致密星黑洞的无毛和奇点特性,使得其爆发成为研究极端条件下物理规律的理想实验室,与此相关的中国后续大型卫星项目为增强型时变和偏振望远镜(eXTP)¹⁵⁾¹⁶⁾。慧眼卫星在黑洞X射线双星爆发研究方面已经取得了一系列重要进展。

慧眼卫星在新发现的黑洞X射线双星系统MAXIJ1820+070中,首次发现当黑洞X射线双星的爆发演化处于中间态期间,低频准周期震荡(QPO)可以达到200 keV以上的能量,不同能段的时间延迟在秒量级,远大于以前观测到的典型的时间差,难以通过流行的辐射转移或者冕的Lense-Thirring进动模型来解释,由此慧眼团队构造出了准周期震荡的喷流进动模型,描绘出了距离黑洞上百千米(几倍史瓦西半径)的相对论喷流在螺旋进动中冷却,其产生的准周期振荡随着能量呈现出较大时间尺度的延迟结构¹⁷⁾,这是迄今观测到的距离黑洞最近的相对论喷流。武汉大学学者和慧眼团队合作在研究该系统的爆发中,采用改进的盘反射模型对慧眼数据进行能谱分析,发现在爆发演化阶段,冕在随着流量的增加而收缩降低的同时,喷流向外加速运动¹⁸⁾。一般认为,在爆发演化的硬中间态阶段存在喷流,而在软态存在盘风的结构。慧眼卫星观测EXO 1846-031在2019年的爆发时,发现盘风和喷流可以同时存在于硬中间态,而软态期间照亮吸积盘的光源可能来自弯曲的内盘¹⁹⁾。慧眼卫星观测微类星体GRS 1915+105的短时标耀发时,发现喷流和盘风都可能和盘吸积参与的大尺度磁场的快速演化有关,喷流可以在千秒的时标向盘风快速演化²⁰⁾。这些结果对爆发期间辐射区及其几何演化给出了重要的观测限制。慧眼卫星将继续观测黑洞X射线双星的爆发演化,给出宽能区高统计、高频度的观测结果,完善爆发演化中致密星附近有关辐射区物理的深度刻画。

中子星极冠附近的吸积物理和辐射几何是未

3) 本文仅介绍慧眼卫星部分主要研究成果,其他成果请参考本专辑其他文章。

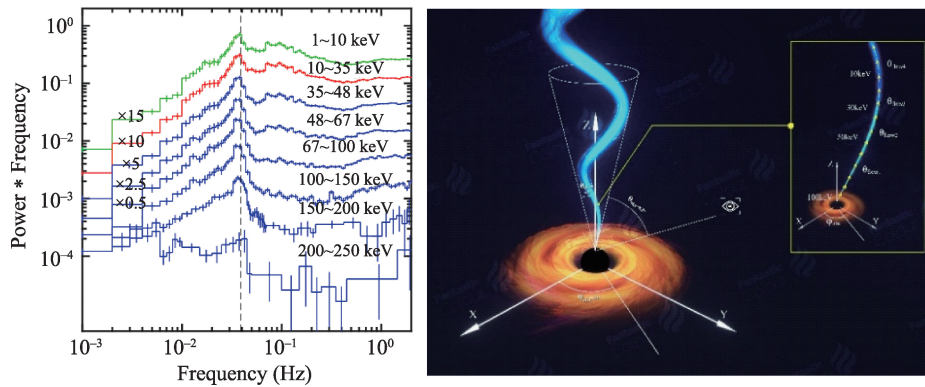


图10 慧眼在MAXIJ1820+070中探测到1~250 keV的准周期震荡,并由此构造喷流流动模型^⑧

来研究极端致密条件下中子星物态的关键问题之一。也即,对于吸积脉冲星,从其伴星吸积的物质经过吸积盘流向脉冲星的两个极冠区,导致吸积盘的形态、极冠区的辐射性质都和物质的吸积率相关。慧眼卫星对大质量X射线双星在宽能区的高频度、高统计观测研究取得新的重要进展。Swift J0243.6+6124是目前观测到的第一个河内超亮X射

线源,慧眼卫星对该源的爆发观测发现,在低物质吸积率向高吸积率转化的情况下,吸积盘的物质形态从气体压主导的薄盘变为辐射压主导的厚盘,导致了反应极冠区变化的脉冲轮廓和反应吸积盘结构变化的功率谱在高吸积率的演化。首次观测到的这种现象,验证了半个多世纪前提出的吸积理论^⑨。进一步细致的能谱分析,清晰地观测到了爆发辐射

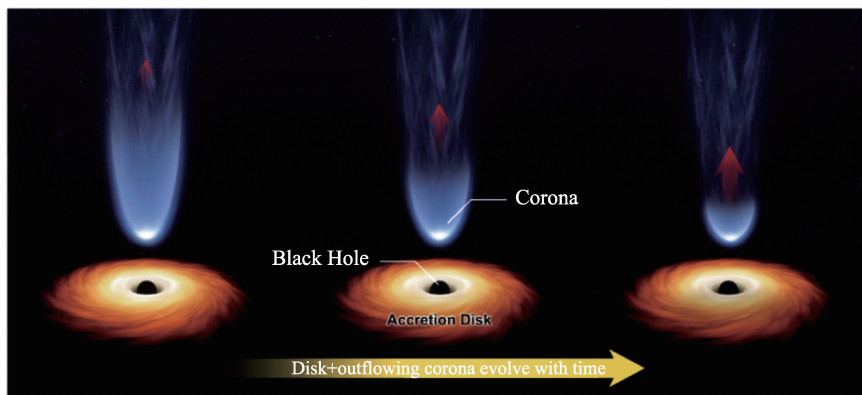
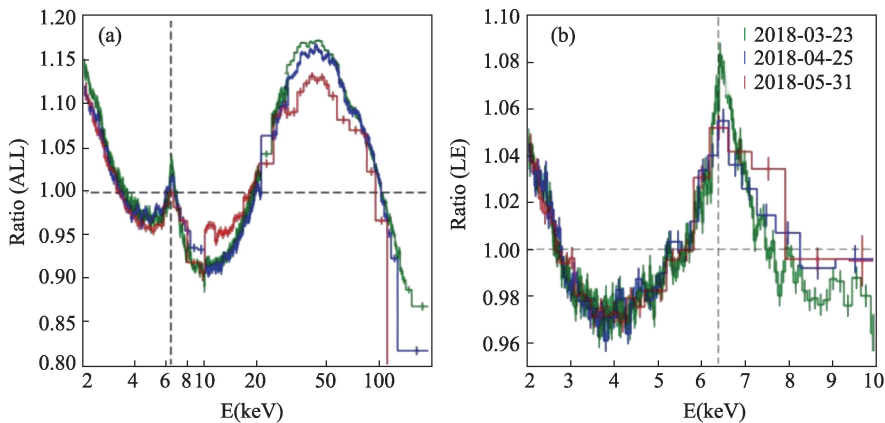


图11 慧眼观测MAXIJ1820+070爆发期间,喷流内部物质外流加速的现象^⑩

模式从一种(铅笔)模型到另一种(风扇)模型演化期间的能谱参数演化特性,能谱参数的剧烈变化反映了中子星极冠区所堆积的物质形态随吸积率的演化^②。慧眼卫星的观测研究发现,该系统在爆发流量上升和下降期间,中子星自旋脉冲的强度呈现出显著不同的演化特点,表明该系统在上升和下降期间中子星极冠区附近的磁场演化存在差异,而且在爆发的下降期间可能在外流回落吸积的效应^③。未来慧眼卫星通过观测更多大质量X射线双星的爆发,将为完善中子星极冠区域吸积辐射的物理图像提供更为丰富的观测证据。

3.2 致密天体基本性质方面

研究强引力等极端密度条件下的基本物理规律(广义相对论和中子星物态),需要构建黑洞或者中子星附近吸积辐射的实验室,该实验室系统的一个重要的组成部分是冕。而冕本身虽然在X射线双星吸积爆发演化的模型中被广为应用,但是由于其定义为高温辐射低效的等离子体团块,冕本身的性质以及爆发期间的动力学演化一直是未解之谜。中子星表面热核暴对冕的快速冷却效应是研究冕的一个有效探针^④。但是,由于慧眼之前的卫星在硬X射线能区面积小,一般需要累积数十个暴的样本才能捕捉到暴对冕的探针效应。慧眼卫星的运行大大改观了这一研究领域的现状,对

4U 1636-536的观测研究发现,慧眼卫星可以通过观测单个热核暴就能够清晰地看到冕的冷却^⑤。慧眼卫星通过继续积累更多的热核暴观测样本,将给出冕在爆发过程中的演化细节。热核暴的光球半径扩展是指当辐射超过爱丁顿光度后,暴的光球半径会向外扩展,因此通过观测光球半径扩展的爱丁顿光度可以测量中子星的半径和质量,从而研究中子星的物态。热核暴期间,除了暴本身的光度,连续谱的流量也会发生较大的变化,例如反射成分以及连续谱流量的增加等。慧眼卫星的大面积和宽能区使得可以从光球半径扩展能谱中分辨出连续谱的变化,例如慧眼卫星观测4U1808-52的光球半径扩展发现,光球半径扩展期间的连续谱增加的部分来自光球半径扩展的光球层以外的吸积盘区域^⑥。慧眼卫星观测更多的光球半径扩展事例,将有利于改善与中子星物态有关的质量和半径的测量精度。

在研究极端条件下物理规律的X射线双星实验室中,致密天体的基本性质也是关键的一环。慧眼卫星宽能区的能谱,结合Fe线附近的良好能量分辨,使得慧眼卫星可以精确测量黑洞在X射线双星中的自旋。例如,慧眼卫星通过观测CygX-1,得到了该系统黑洞的自旋测量结果^⑦。中子星磁场的直接测量方面,慧眼卫星独具优势,例如,慧眼卫星观测GRO J1008-57,通过分析能谱中的回旋吸收线(CRSF)

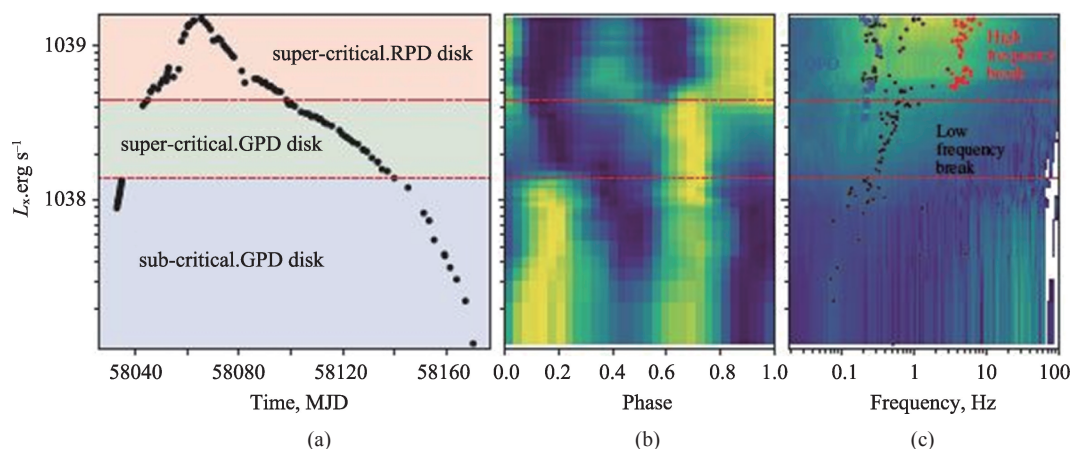


图12 (a) 慧眼卫星对银河系极亮源(ULX)Swift J0243.6+6124完整爆发过程的观测;
(b) 脉冲位相的时间演化;(c) 功率谱拐点的时间演化^⑧

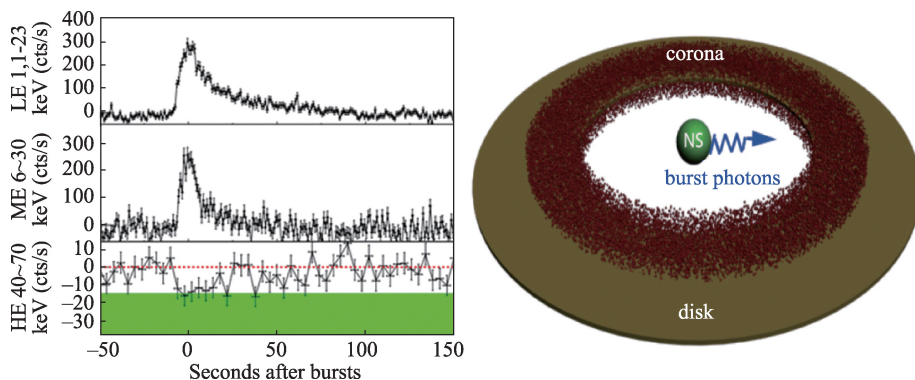


图13 慧眼卫星对4U 1636-536的热核暴观测中发现暴期间冕的冷却, 给出了高温电子冕被冷却和重新加热的时标在1秒左右^⑧

结构,得到回旋吸收线的线心能量为90 keV,这是目前观测到的最高基态能量的电子回旋吸收线,而且显著性超过了20倍的标准偏差,对应于目前直接、可靠地测量的最强中子星磁场^⑨。慧眼卫星的后续观测将给出测量黑洞和中子星基本性质的更多样本。

3.3 银道面扫描巡天及X射线源的监测

慧眼卫星在硬X射线波段(20~250 keV)的大面积和窄视场的设计使其在暗弱变源巡天能力方面好于以往任何硬X射线望远镜。慧眼卫星将对银道进行高频次的巡天扫描,对河内硬X射线变源进行最深和最高频次的普查,获得河内硬X射线辐射源表,并可能发现一批新的硬X射线活动天体或者

硬X射线辐射新现象。包含中子星和黑洞的河内X射线双星系统大部分处于银盘面上和银河系中心方向,而且在X射线波段存在不同时间尺度的活动。历史上每一次银道面和银河系中心方向的巡天和监测都发现了已知源的新活动以及新(类型)的瞬变源,在国际上掀起了多波段、多天文台和天地一体化观测的热潮。慧眼卫星预期将发现已知源的新活动,组织多波段和多天文台协同观测,理解天体高能活动的多样性;发现新的高能变源,并做后续观测证认和研究,这对理解高能天体源的多样性有极其重要的意义。慧眼卫星已经开展了2000余次扫描观测,监测了800个天体的活动(探测到了其中的大约200个天体的X射线信号)。

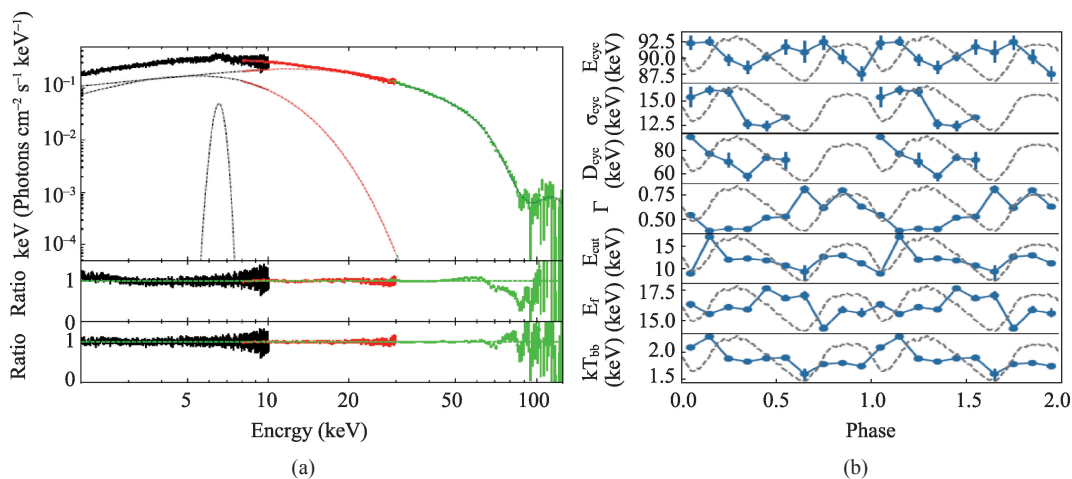


图14 慧眼卫星在GRO J1008-57中探测到90keV回旋吸收线^⑩
(a) 能谱图;(b) 回旋吸收线随脉冲相位的演化

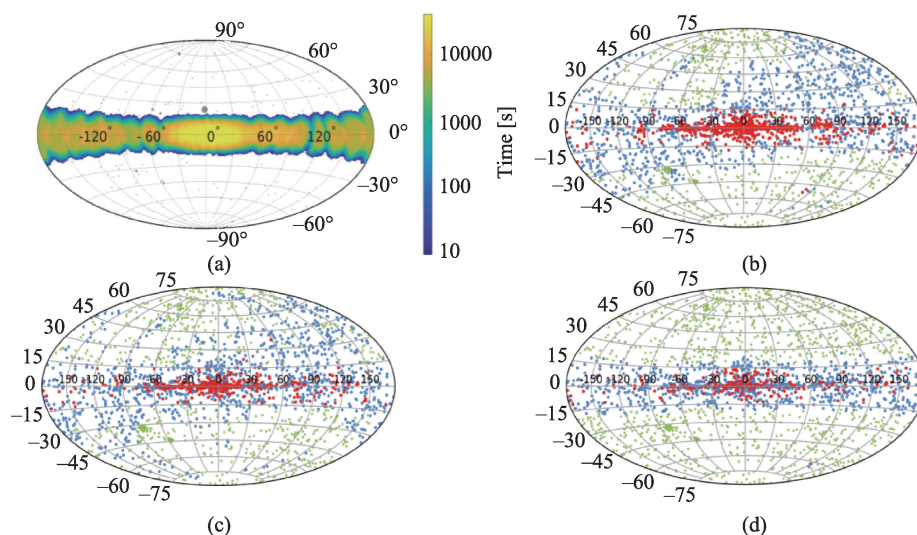


图15 (a) 慧眼卫星银道面扫描观测曝光图(截至2019年10月24日);(b) LE监测源在银道坐标系中的分布;
(c) ME监测源在银道坐标系中的分布;(d) HE监测源在银道坐标系中的分布^③
注:红色点代为信噪比 $>3\sigma$ 的源,蓝色点代表信噪比 $<3\sigma$ 的源,绿色点为Swift、Integral及Maxi的源表。

3.4 X射线脉冲星导航的在轨验证

X射线脉冲星导航是一种新型的自主导航方法,它利用宇宙中遥远的天体——脉冲星发出的精确的周期性脉冲信号为太空中的航天器提供导航和授时服务,因此脉冲星也被称作“宇宙灯塔”或星际旅行中“天然的GPS卫星”。如同地面使用卫星信号进行导航一样,航天器通过观测脉冲星,也可以实现自主导航,即脉冲星导航。通过分析航天器接收到的(不同方向)脉冲星脉冲信号的特性,就可以反推得到航天器在空间的三维位置和速度(或运动轨道)。

2017年8月31日至9月5日,慧眼卫星对蟹状星云脉冲星进行了持续约5天的观测,以试验对卫星自主定位。研究人员提出了一种新的X射线脉冲星导航算法——‘脉冲轮廓显著性与卫星轨道的关联分析’,并将该导航算法分别应用到慧眼卫星上3种望远镜的观测数据,结果显示,均可实现其自主定位;如果综合利用所有望远镜的数据,其定位精度可以达到10千米(3倍标准偏差)^④,与国际上其他导航试验的最高精度相当^⑤,进一步验证了航天器利用脉冲星自主导航的可行性,为未来在深空的实际应用奠定了基础。

4. 总结与展望

2017年6月发射以来,慧眼卫星及有效载荷工作正常,仪器性能无明显变化;慧眼科学中心对慧眼卫星的运行管理及科学研究支持工作不断完善;报道慧眼卫星科学成果的学术论文和引用也在逐年增加。慧眼卫星具有宽X射线能区、大有效面积和高时间分辨的独特优势,将在极端爆发现象、X射线双星系统吸积演化、黑洞和中子星等致密天体基本性质以及河内宽能区巡天等方面开展深入观测和研究,在确认慧眼卫星已有重大发现的同时也



图16 脉冲星导航示意图

将做出新的科学发现,而且长期积累的存档科学数据的研究以及和其他多波段的数据的联合研究也将开始发挥作用,可以预期今后几年科学成果产出和引用将会继续快速增长,这将牢固确立属于慧眼卫星的宽能段光变和能谱研究的新时代。

参考文献

- ① 卢方军, 徐玉朋, 等. 硬 X 射线调制望远镜卫星及其科学目标. 现代物理知识, 2016, 28(04), 4.
- ② 喻菲, 等.《活捉黑洞》. 科学出版社, 2017 年.
- ③ Shuang-Nan Zhang(张双南), TiPei Li(李惕碛), FangJun Lu(卢方军), et al. Overview to the Hard X-ray Modulation Telescope (Insight-HXMT) Satellite. *Sci. China- Phys. Mech. Astron.*, 2020, 63, 249502.
- ④ CongZhan Liu(刘聪展), YiFei Zhang(张翼飞), XuFang Li(李旭芳), et al. The High Energy X-ray telescope (HE) onboard the Insight-HXMT astronomy satellite. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2020, 63, 249503.
- ⑤ 刘聪展. HXMT/HE 望远镜的设计和建造. 现代物理知识, 2016 年, 28(04), 12.
- ⑥ XueLei Cao(曹学蕾), WeiChun Jiang(姜维春), Bin Meng(孟斌), et al. The Medium Energy X-ray telescope (ME) onboard the Insight-HXMT astronomy satellite. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2020, 63, 249504.
- ⑦ 曹学蕾, 姜维春, 等. HXMT 中能 X 射线望远镜. 现代物理知识, 2016, 28(04), 17.
- ⑧ Yong Chen(陈勇), WeiWei Cui(崔苇苇), Wei Li(李炜), et al. The Low Energy X-ray telescope (LE) onboard the Insight-HXMT astronomy satellite. *Sci. China- Phys. Mech. Astron.*, 2020, 63, 249505.
- ⑨ 陈勇, 崔苇苇. HXMT 卫星低能 X 射线望远镜. 现代物理知识, 2016, 28(04), 25.
- ⑩ 郑世界, 宋黎明, 等. HXMT 卫星的观测规划与数据处理. 现代物理知识, 2016, 28(04), 38.
- ⑪ 郑世界, 贾淑梅, 等. 硬 X 射线调制望远镜卫星地面科学应用部分设计与应用. *航天器工程*, 2018, 27, 162.
- ⑫ XiaoBo Li(李小波), XuFang Li(李旭芳), Ying Tan(谭颖), et al. In-flight calibration of the Insight-Hard X-ray Modulation Telescope. 2020, *JHEAp*, 26, 64.
- ⑬ 贾淑梅, 黄跃, 等. 硬 X 射线调制望远镜卫星科学观测应用初步评价. *航天器工程*, 2018, 27, 168.
- ⑭ 屈进禄. 探索高能 X 射线天空的慧眼卫星. 现代物理知识, 2020, 32(05), 5.
- ⑮ ShuangNan Zhang(张双南), Andera Santangelo, Marco Feroci, et al. The enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission — eXTP. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2019, 62, 029502.
- ⑯ 张澍. 增强型 X 射线时变与偏振(eXTP)空间天文台科学需求分析. 2018.
- ⑰ Xiang Ma(马想), Lian Tao(陶炼), ShuangNan Zhang(张双南), et al. Discovery of the highest energy oscillations in a black hole X-ray binary with Insight-HXMT. 2021, *Nature Astronomy*, 5, 94.
- ⑱ Bei You(游贝), YouLi Tuo(庾攸隶), et al. The jet-like corona in a black hole X-ray binary observed by Insight-HXMT. 2021, *Nature Communications*, 12, 1025,
- ⑲ YaNan Wang(王亚楠), Long Ji(纪龙), J.A. Garcia, et al. A variable ionized disk wind in the black-hole candidate EXO 1846- 031. 2020, *ApJ*, 906, 11.
- ⑳ LingDa Kong(孔令达), Shu Zhang(张澍), YuPeng Chen(陈玉鹏), et al. Two Complete Spectral Transitions of Swift J0243.6+6124 Observed by Insight-HXMT. 2020, *ApJ*, 902, 18.
- ㉑ V. Doroshenko, ShuangNan Zhang(张双南), A. Santangelo, et al. Hot disk of the Swift J0243.6+6124 revealed by Insight-HXMT. 2020, *MNRAS*, 491, 1857
- ㉒ LingDa Kong(孔令达), Shu Zhang(张澍), YuPeng Chen(陈玉鹏), et al. Insight-HXMT Observations of a Possible Fast Transition from the Jet- to Wind-dominated State during a Huge Flare of GRS 1915+105. 2021, *ApJL*, 906, 2.
- ㉓ YuPeng Chen(陈玉鹏), Shu Zhang(张澍), ShuangNan Zhang(张双南), et al. Type-I X-Ray Bursts Reveal a Fast Co-evolving Behavior of the Corona in an X-Ray Binary. 2012, *ApJL*, 752, 34.
- ㉔ YuPeng Chen(陈玉鹏), Shu Zhang(张澍), JinLu Qu(屈进禄), et al. Insight-HXMT observations of 4U 1636-536: Corona cooling revealed with single short type-I X-ray burst. 2018, *ApJL*, 864, 30.
- ㉕ YuPeng Chen(陈玉鹏), Shu Zhang(张澍), ShuangNan Zhang(张双南), et al. Insight-HXMT observation on 4U 1608 - 52: evolving spectral properties of a bright type-I X-ray burst. 2019, *JHEAp*, 24, 23.
- ㉖ XueShan Zhao(赵雪杉), LiJun Gou(苟利军), Y.T. Dong, et al. Confirming the spin parameter of the black hole in Cygnus X-1 using the Insight-HXMT. 2020, *JHEAp*, 26, 53.
- ㉗ MingYu Ge(葛明玉), Long Ji(纪龙), ShuangNan Zhang(张双南), et al. Insight-HXMT Firm Detection of the Highest-energy Fundamental Cyclotron Resonance Scattering Feature in the Spectrum of GRO J1008-57. 2020, *ApJL*, 899, 19.
- ㉘ Na Sai(赛娜), JinYuan Liao(廖进元), ChengKui Li(李承奎), et al. Methodology and performance of the two-year Galactic plane scanning survey of Insight-HXMT. 2020, *JHEAp*, 26, 1.
- ㉙ ShiJie Zheng(郑世界), ShuangNan Zhang(张双南), FangJun Lu(卢方军), et al. In-orbit demonstration of X-ray pulsar navigation with the Insight-HXMT satellite. 2019, *ApJS*, 244, 1.
- ㉚ Wayne H. Yu, Sean R. Semper, et al. NASA SEXTANT Mission Operations Architecture. 2020, *Acta Astronautica*, 176, 531.