

慧眼-HXMT卫星的在轨运行和标定*

李小波[†] 宋黎明 贾淑梅 郑世界 赵海升

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 “慧眼”硬X射线调制望远镜(简称慧眼卫星, 英文名为Insight Hard X-ray Modulation Telescope, 简称Insight-HXMT或HXMT), 于2017年6月15日发射升空, 标志着我国自主研发的首个天文台级X射线望远镜的诞生. 慧眼卫星凭借其大面积、宽波段、高时间分辨率和高能量分辨率的综合优势, 为黑洞与中子星系统的硬X射线快速变化和宽波段能谱研究领域开辟了新的研究窗口. 超出设计寿命的慧眼卫星已稳定运行超过8 yr, 目前状态良好, 且有望进一步延长其在轨服务时间. 截至2024年10月, 慧眼卫星已7次向全球科学界公开征集观测提案, 共收到334份有效的观测提案, 并据此制定了2368个观测计划. 此外, 慧眼卫星已向公众发布数据13批次, 累计数据量达到40 TB, 数据公开比率高达94%. 慧眼卫星还向用户提供了不同版本的数据分析软件和标定数据库, 在轨标定精度在2%左右, 满足科学分析的要求. 来自全球17家及国内36家研究机构的学者使用慧眼数据开展了科学研究, 发表了约300多篇高质量学术论文, 累计引用次数约7300次.

关键词 仪器: 探测器, 方法: 数据分析, 天文数据库

中图分类号: P172; **文献标识码**: A

1 引言

“慧眼”硬X射线调制望远镜(简称慧眼卫星, 英文名Insight Hard X-ray Modulation Telescope, 简称Insight-HXMT或HXMT)是我国自主研制的第一颗天文台级X射线天文卫星^[1], 它于2017年6月15日在酒泉卫星发射中心成功发射, 轨道高度550 km, 轨道倾角43°. 慧眼卫星既可以开展宽波段、大视场X射线巡天, 发现新的高能变源和已知天体的新活动; 又能够定点观测黑洞、中子星等高能天体的短时标光变和能谱, 理解黑洞和中子星的活动和演化机制; 同时具备 γ 射线暴全天监视能力.

慧眼卫星上搭载了3个主要科学载荷: 高能X射线望远镜^[2-3](High Energy X-ray Telescope,

简称 HE, 工作能区: 20–250 keV, 几何面积: 5100 cm²), 中能X射线望远镜^[4-5](Medium Energy X-ray Telescope, 简称 ME, 工作能区: 8–35 keV, 几何面积: 952 cm²)和低能X射线望远镜^[6-7](Low Energy X-ray Telescope, 简称 LE, 工作能区: 1–10 keV, 几何面积: 384 cm²), 如图1所示. 这样的探测器配置使“慧眼”具有宽X射线探测能区且在20–250 keV探测面积大的特性. 同时, 3个载荷具有高时间和高能量分辨率、探测死时间小; 低能载荷在软X射线能区无光子堆积效应等系列优点. 这也使得“慧眼”具有独特的研究天体多能段X射线快速光变的能力, 可以探索比以往更靠近黑洞视界或中子星表面的区域, 从而开启了研究黑洞、中子星快速光变和能谱特性的新窗口.

2024-10-11收到原稿, 2024-12-06收到修改稿

* 国家自然科学基金项目(12273043)、中国科学院空间科学战略性先导科技专项(E02212A02S)资助

[†] lixb@ihep.ac.cn

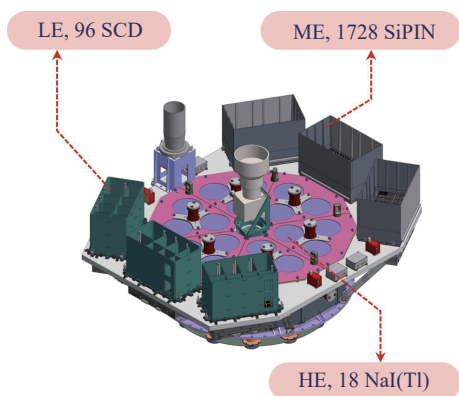


图 1 慧眼卫星上的3个主要载荷, 覆盖1–250 keV的宽能段, 其中HE采用18个掺铊的碘化钠晶体探测器NaI (Tl), ME使用了1728个SiPIN (Silicon Positive-Intrinsic-Negative)探测器, LE使用了96个扫式电荷器件(Swept Charge Devices, SCD).

Fig. 1 HXMT carries three main payloads that cover a wide energy range of 1–250 keV. HE employs 18 thallium-doped sodium iodide (NaI (Tl)) crystal detectors. ME utilizes an array of 1728 SiPIN detectors, while LE is equipped with 96 SCDs.

作为一个面向国际天文界的开放观测平台,“慧眼”卫星的日常运行和管理由“慧眼”科学中心负责. 科学中心全面支持卫星的多目标、多模式、多约束的观测需求, 提供了一系列关键服务, 包括观测任务的高效规划、科学数据产品的标准化生产与发布、有效载荷的性能标定、空间本底模型的构建以及用户数据分析专用软件的维护和更新^[8–10]. 截至2024年10月, 科学中心已面向国内外科学用户公开征集了7轮观测提案, 累计收到334份有效观测申请, 制定了2368个观测计划, 公开发布了13批次的数据产品, 总计40 TB, 数据公开率达到94%, 为国内36家高校和研究所及国外17家研究机构的500多位研究人员提供了观测和数

据服务. 通过国内外用户使用的多种分析工具的兼容性检验以及与其他卫星数据结果的交叉比对, 验证了“慧眼”数据产品和用户数据分析软件的可靠性和正确性. 基于这些数据和软件, 研究人员取得了多项原创和有显示度的成果: 参与监测了首个双中子星并合引力波事件(GW170817)的电磁对应体, 并对该引力波事件在MeV能段的辐射给出了最严格的限制^[11–12]; 多次刷新宇宙最强磁场的直接测量记录^[13–14]; 发现了黑洞双星系统最高能量的准周期振荡现象^[15]; 首次证认快速射电暴起源于磁陀星^[16]; 与极目望远镜共同精确探测到了迄今最亮的伽马暴等^[17].

2 慧眼卫星在轨运行

2.1 观测提案的征集和评估

为了充分利用慧眼卫星的数据并推动科学成果的产出, 慧眼科学中心定期向全球天文用户公开征集观测提案. 每轮提案征集都会在慧眼门户网站上发布公告(Announcement of Opportunity, AO). 我们的提案征集不仅涵盖年度观测提案, 还通过提案征集网站(<http://proposal.ihep.ac.cn/proposal/index.jsp>)长期接收机遇观测(Target of Opportunity, ToO)提案, 以便对突发天文事件作出快速响应或观测临时出现的重要科学目标.

截至目前, 慧眼卫星已成功开展了7轮提案征集. 每轮提案的征集时间、收到的有效提案数量、观测申请个数、分配的观测时间以及机遇观测的源数量等详细信息记录在表1中. 7轮提案征集累计收到334份提案, 这些提案来自不同的研究机构, 其分布情况如图2所示.

表 1 慧眼卫星的每轮提案征集汇总
Table 1 Summary of each proposal call for the *Insight-HXMT* satellite

Cycle	AO time	Number of Proposals	Observation Requests	Observation Time	ToO
AO01	2016-08-09	90	517	2017-11—2019-06	39
AO02	2019-01-02	35	349	2019-07—2020-07	26
AO03	2020-04-05	34	329	2020-08—2021-07	16
AO04	2021-04-05	33	333	2021-08—2022-08	30

表1 续
Table 1 Continued

Cycle	AO time	Number of Proposals	Observation Requests	Observation Time	ToO
AO05	2021-04-05	43	339	2022-09—2023-08	30
AO06	2023-04-06	50	337	2023-09—2024-08	31
AO07	2024-04-06	49	330	2024-09—2025-08	/

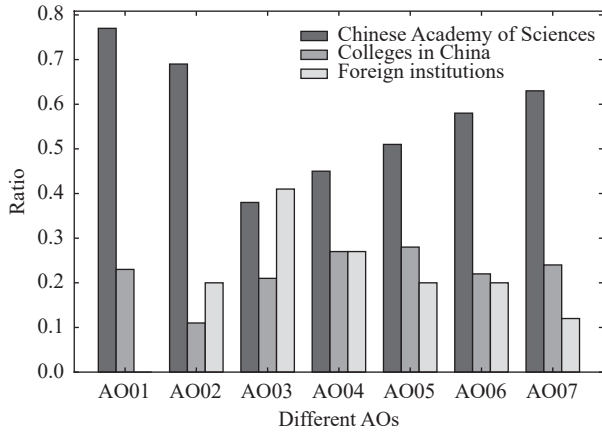


图2 每轮提案中来自中科院、国内其他科研单位及国外单位的比例

Fig. 2 The proportion of proposals from the Chinese Academy of Sciences (CAS), colleges in China, and foreign institutions in each proposal round

提案征集截止后,科学中心将对所有提交的提案进行技术可行性评估,并邀请专家团队对提案进行科学评审,以确保选出的提案既符合慧眼卫星的观测能力,也满足观测的约束条件。经过细致的评审过程,优选出的提案将进行评级排序。

为了提供更好的用户服务和透明度,一旦提案评级完成,所有的评审结果将会在提案征集网站上公布,以便申请者及时查询自己的提案状态。

2.2 观测计划制定

为了优化慧眼卫星的观测方案并满足用户需求,慧眼科学中心必须在确保卫星安全运行的基础上,考虑多种影响因素,制定和执行观测规划。慧眼卫星的观测目标主要来自国际学术界的公开观测提案征集或即时天体活动。这些观测需求包括多种类型,例如小天区扫描、短期监测、联合观测、指定时间观测以及机遇观测等。

慧眼观测提案分为A、B、C 3个等级,在观测规划上优先安排高等级,同等级优先考虑联合观测和指定时间观测;观测计划制定时,在满足卫星观测约束(太阳避免角大于 70°)的前提下,综合考虑提案需求、南大西洋异常区、地球遮挡、数据接收等因素,尽可能保证观测效率最大化;提案执行期间,确保A级提案观测安排,因故未执行的自动顺延至下一周期,B级和C级提案尽量安排,未执行的不顺延。基于上述考虑,慧眼科学中心首先进行年度观测任务的整体规划。在具体执行观测任务时,进一步细化为每2 d一次的短期观测计划^[10]。此外,为了能够快速响应突发天体事件,建立了快速响应机制以处理这类特殊的观测申请(ToO观测)。

截至2024年9月30日,慧眼已经制定了1346个短期观测计划,65个ToO计划,244个参数更新计划,713个伽马暴计划,并顺利完成了所有的观测需求。表2展示了慧眼已观测的天体源统计情况,包括不同源的数目,观测次数,曝光时间信息。慧眼大部分定点观测时间主要用于对黑洞和中子星X射线双星的观测,这两类天体源也是慧眼科学产出最丰富的领域。

2.3 数据产品的生产和发布

针对慧眼卫星的观测由国际天文用户主导并且深度参与数据分析的特点,科学中心在完成观测的前提下,将卫星上原始数据和辅助数据转换为标准的数据产品,将仪器响应等以标定数据库的形式提供给用户,同时设计标准的数据分析流程和算法,使用户在不深入理解仪器工作原理和模式的前提下,专注于科学分析。

慧眼卫星的数据产品设计兼顾了科学研究、工程监测和科学快视等需求,形成了13个级别的

高级数据产品, 共计700多种. 项目设计开发了“数据模板库软件”, 保证了数据产品文件的一致性和可追溯性. 科学中心每年产生超过60 TB, 约200多万个各级各类数据产品文件, 期间应科学研究需要灵活扩展100多种产品文件. 根据慧眼卫星的数据管理政策, 已经超过保护期的数据需要对所有用户开放下载. 用户可通过慧眼卫星网站([http://](http://archive.hxmt.cn/proposal)

archive.hxmt.cn/proposal)获取. 截至2024年10月, 面向科学用户的一级数据产品公开发布13批次, 共计40 TB, 数据公开率达到94%, 剩下6%未发布的数据主要是处于保护期内的数据. 各轮提案的数据发布情况可以参考图3, 其中也显示了每轮提案中ToO观测号的数量.

表 2 慧眼已观测的天体源统计(截至到2024年9月30日)
Table 2 Statistics of celestial sources observed by *Insight-HXMT* (as of September 30, 2024)

Observation Type	Source Type	Number of Sources	Observation Times	Exposure Time/ks
Pointed Observation	Supernova Remnant	2	93	7170
	Isolated Pulsar	9	259	9830
	Black Hole X-ray Binary	20	1240	23550
	Neutron Star X-ray Binary	60	1789	56240
	Extragalactic Object	22	147	1850
	Blank Sky Field	21	778	8050
	Others	35	321	9925
Small Area Scan	Crab Region	1	152	3660
	Vela Region	1	3	70
	Cygnus Region	1	2	50
	Galactic Plane Scan	89	3654	20380
	Lobster Eye Imager for Astronomy	18	172	1160
	Joint Observation			
	Einstein Probe Joint Observation	13	189	1040

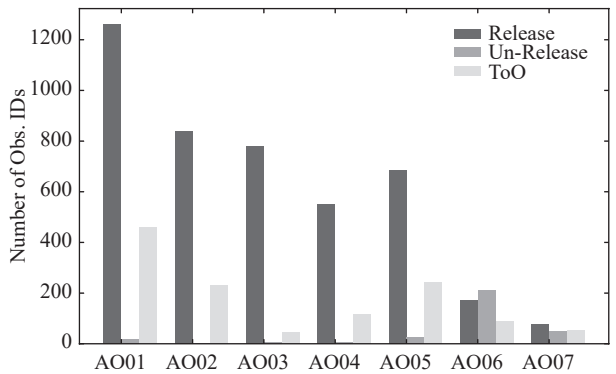


图 3 慧眼每轮提案的数据产品发布情况

Fig. 3 The data product release status for each cycle of *Insight-HXMT* proposals

2.4 用户数据分析软件HXMTDAS

慧眼数据分析软件(*Insight-HXMT* Data Analysis Software package, HXMTDAS)的开发是在深入研究慧眼卫星的数据分析流程、算法和数据产品之后进行的, 旨在提供一个与国际通用HEAsoft软件包高度兼容的数据处理工具. HXMTDAS针对高能粒子事件引起的毛刺现象、多像素打火、仪器辐射损伤以及空间环境的剧烈变化, 开发了高效的智能数据识别算法. 这些算法能够自动识别高质量数据, 修正仪器响应并自动匹配仪器本底, 大幅提升了数据处理的自动化水平和准确性.

HXMTDAS采用层次化架构设计, 支持多个载荷共享同一公共底层, 从而具备出色的可扩展

性和继承性. 软件的特点包括低内存消耗、高运算速度和良好的兼容性, 使其可以方便地在不同操作系统的服务器和个人电脑上安装和运行.

自发布以来, 慧眼数据分析软件已稳定运行逾6 yr. 科学中心根据用户的反馈和建议, 不断优化和更新软件, 目前已发布了9个版本, 所有版本均可在慧眼官方网站(<http://hxmtcn.ihep.ac.cn/software.jhtml>)上下载. 该软件获得了国内外用户的广泛认可, 为慧眼项目的科学研究提供了关键的技术支持. 同时, HXMTDAS的框架和部分公共接口也已成功应用于爱因斯坦探针卫星后随望远镜的数据软件开发中, 展现了其在其他天文卫星项目中的应用潜力.

3 在轨标定

监测有效载荷性能并及时更新标定数据库, 是慧眼卫星运行期间科学中心的主要工作之一. 科学中心从载荷工作参数、探测数据快视分析、天体源监测分析等多个层次监测载荷性能, 实现了对探测器性能的高精度监测, 有效保障了卫星的正常观测和运行.

慧眼卫星的探测器有复合晶体(18个)、半导体(1728个)和扫式电荷器件(96个) 3类, 数目众多、响应各不相同, 在轨运行时性能随时间和空间环境发生变化, 为高精度的标定提出挑战. 为应对这些挑战, 建立了用于空间环境剧烈变化、空地结合的高精度探测器性能响应模型. 地面通过构建准确的卫星质量模型、相互作用过程和空间环境模型等手段, 对有效载荷在轨运行和地面标定实验的结果进行大量的模拟和比对, 从而确保有效载荷模拟的有效性. 卫星在轨后, 根据卫星工作参数和探测器实测性能, 建立了随时间、温度等因素变化的探测器响应模型, 并通过联合观测验证标定的参数^[18].

截至目前, HE载荷的18个NaI (Tl)和CsI (Na)复合晶体探测器均正常运行. 然而, 由于空间环境的辐射损伤, ME载荷和LE载荷的一部分热探测器、噪声过大的探测器以及受损探测器已被关闭. 具体而言, ME载荷内共有1728个SiPIN像素, 其中

已关闭298个; LE载荷的96个CCD探测器中关闭了8个. 剩余探测器的数量依然能够满足科学观测的需求.

3.1 载荷的增益和能量分辨率

慧眼卫星的运行为我们提供了宝贵的数据, 帮助我们深入理解探测器性能的变化与发展. 我们曾在《Radiation Detection Technology and Methods》(RDTM)期刊上发表了HXMT 3个载荷在轨5 yr多性能随时间的演化^[3, 5, 7], 本工作中我们将对3个载荷的在轨性能更新情况进行说明.

HE载荷在卫星对空天区观测或者进入地球遮挡区时, 测量能谱上会出现4条由于探测器材料被活化导致的本底谱线^[3, 18], 这些本底谱线可以用来标定HE的增益. 由于NaI (Tl)晶体在地面保存时受到潮解, 所有单体的分辨率均比地面标定时差, 在轨31 keV线谱的宽度可以用来标定和评估18个单体能量分辨率的变化. 同时, 我们还利用在轨携带的²⁴¹Am放射源的59.5 keV的峰位和宽度和191 keV处本底谱线的峰位和宽度来监测在轨每个单体的增益和能量分辨率随时间的变化分别如图4和图5所示, 在轨3个月后所有单体的增益和能量分辨率变化较小. 大部分单体的能量分辨率随时间有逐渐变好的趋势.

ME每个机箱在轨携带了2个²⁴¹Am的放射源, 可以照射8个SiPIN像素. 累积空天区观测时放射源的能谱, 并利用地面标定的增益系数可以获得放射源谱线的中心值和宽度; 未被放射源照射的像素, 可以通过空天区观测时银线峰位(22.5 keV)来标定和监测^[5]. ME的增益和能量分辨率的变化情况分别如图6和图7所示, 可见ME的增益变化不超过1.5%, 能量分辨率变化不超过3%. 这种变化对数据分析非常小, 因此在轨时我们仍然采用地面标定的增益和能量分辨率.

LE利用超新星遗迹Cas A观测的谱线和空天区观测的本底线来检验LE地面标定时增益. 利用欧洲XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission) 卫星上搭载的MOS (Metal Oxide Semiconductor) 探测器对Cas A的观测数据, 获得Cas A各个线谱的理论能量. Cas A的谱线峰位能量如果都用地面

标定时的增益系数, 则增益随时间一直在变小, 如图8所示. 这说明LE上天后由于辐射损伤, 增益一直在下降. 我们用二次函数来描述不同峰位随时间的演化, 因此任意观测时间上的峰位都可以根据演化函数获得. 由于太阳避免角的限制导致Cas

A不能观测时, 我们也可以通过前后观测的值来预测增益的变化. LE能量分辨率的变化同样也可以用Si、S、Fe线的宽度随时间的演化来表征, 如图9所示. 受到辐射损伤影响, LE的能量分辨率一直在变差.

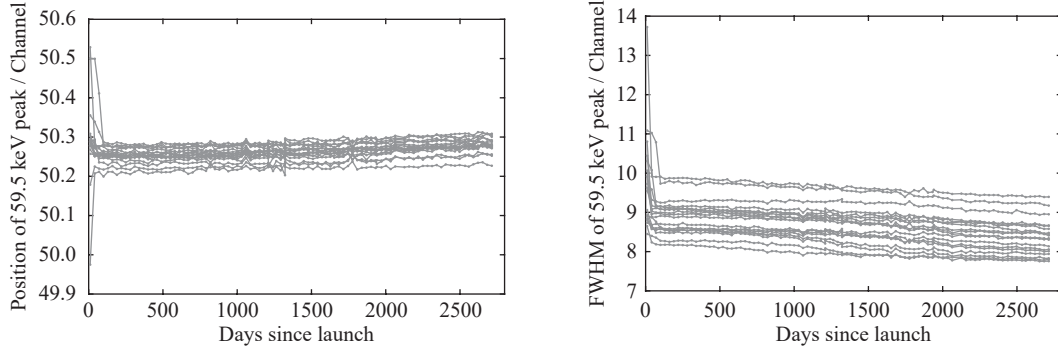


图 4 左图: HE载荷上18个探测器的 ^{241}Am 放射源的59.5 keV的峰位随时间的演化, 右图: ^{241}Am 放射源的59.5 keV的宽度随时间的演化.

Fig. 4 Left panel: the evolution of the peak position of the 59.5 keV line from the ^{241}Am radioactive source on the 18 detectors of HE over time. Right panel: the evolution of the width of the 59.5 keV line from the ^{241}Am radioactive source over time.

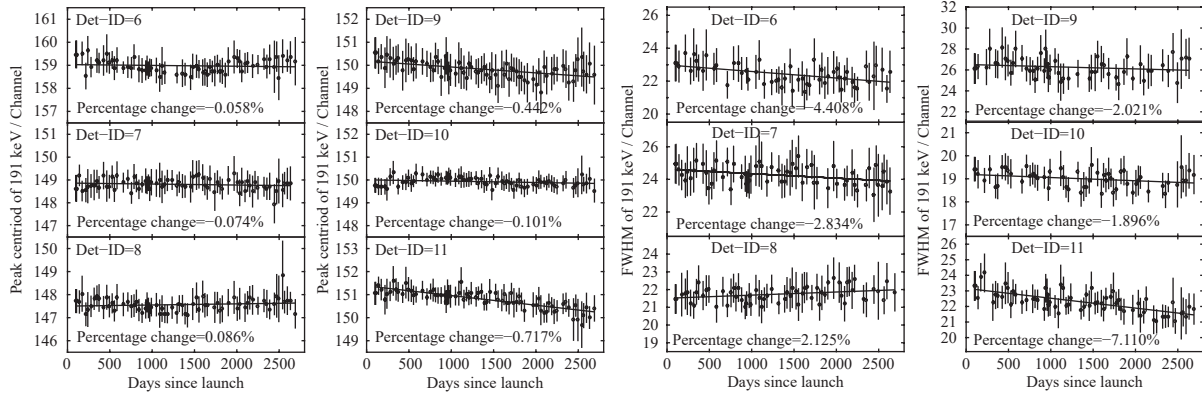


图 5 左图: HE上探测器编号为6至11号的本地谱线中191 keV的峰位随时间的演化. 右图: 191 keV谱线的半高全宽(FWHM)随时间演变的趋势. 变化率的数值代表最后1个数据点相对于第1个数据点的变化率.

Fig. 5 Left panel: temporal evolution of the 191 keV peak position in the background spectra from detectors Nos. 6–11 on the HE. Right panel: time-dependent variation of the full width at half maximum (FWHM) for the 191 keV spectral line. The rate of change values (top) indicates the relative change between the last and first data points.

3.2 能量响应矩阵和有效面积

Crab星云由于它的流量比较稳定、亮度高, 在1–100 keV范围内保持简单的幂律谱, 因此经常被当做硬X射线望远镜的在轨标定源. 慧眼卫星作为准直型望远镜, 由于本底水平较高且探测器没

有堆积效应, 因此也可以使用Crab来标定. 我们扣除在轨本底后^[19–21]得到的能量分辨率如图10所示, 然后利用该结果模拟在轨有效面积. Crab观测得到的3个载荷的净计数如图11所示, 在轨本底的水平如图11的橙色点所示. 最后用经验函数的方

法对模拟的有效面积进行修正, 修正后的数据和模型的比值分布如图11下图所示. 3个载荷在大部分能段的残差都在2%以内, 这个比值的结构表明有效面积的模拟和本底估计的不准确性, 美国

NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) 卫星对Crab的联合观测数据也验证了标定的参数和系统误差.

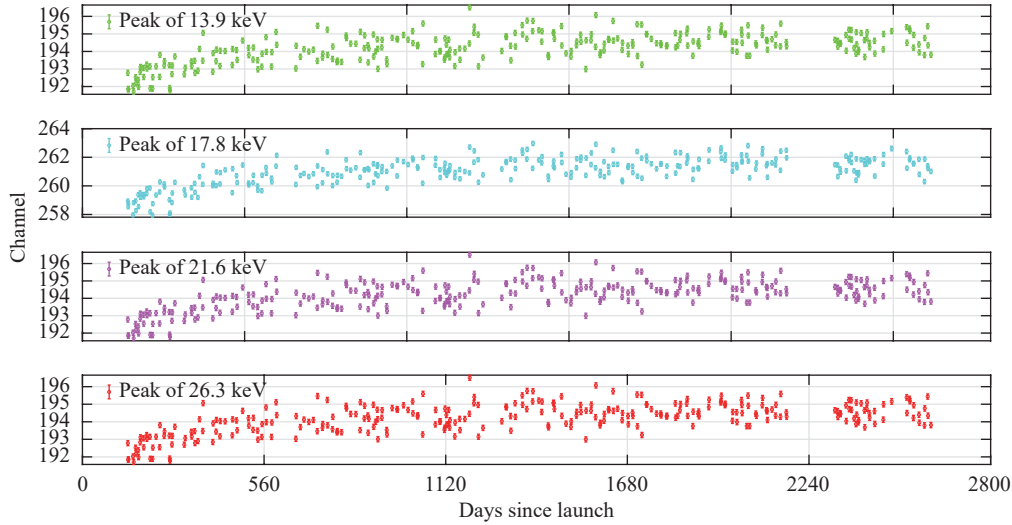


图 6 ME载荷上 ^{241}Am 放射源的不同能量的X射线峰位随时间的演化

Fig. 6 The evolution of the peak position of X-ray lines from the ^{241}Am radioactive source on the ME payload over time

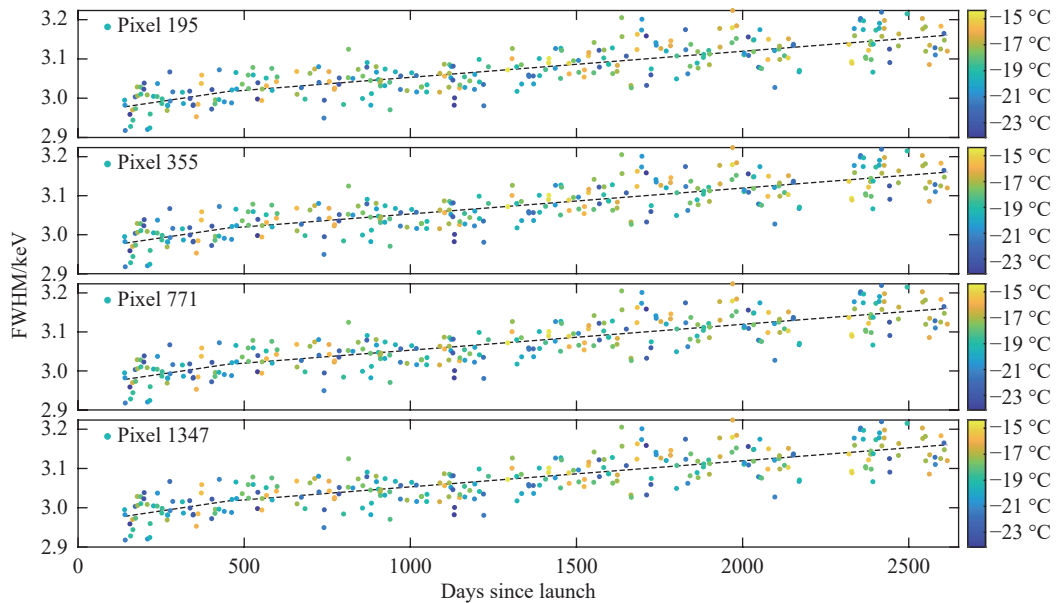


图 7 ME的能量分辨率随时间和温度的变化, 颜色代表不同的温度.

Fig. 7 The energy resolution of the ME varies with time and temperature. The color represents different temperature.

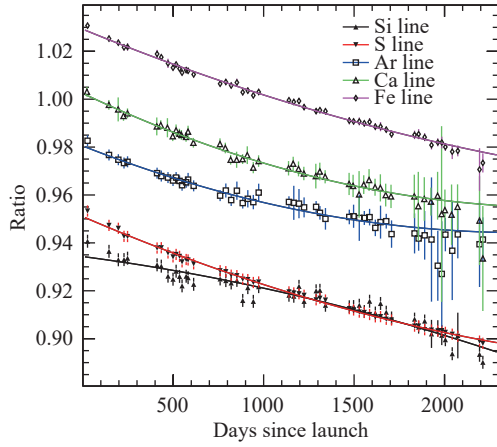


图 8 LE测到的Cas A上的各个线的能量随着时间的演化, 为了显示不同的差异, 不同线的归一化系数不同.

Fig. 8 The energy evolution of various lines detected by LE on Cas A over time. To highlight the differences, the normalization coefficients are adjusted differently for each line.

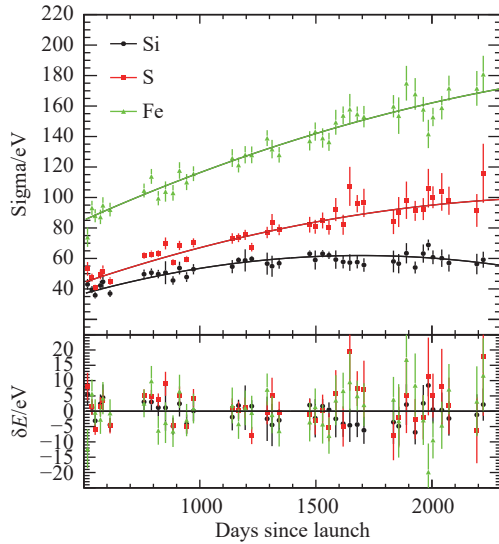


图 9 上图: LE观测到的Cas A的Si、S、Fe线的额外展宽Sigma随时间的演化. 下图: LE的额外展宽利用模型拟合后的残差(δE)分布.

Fig. 9 Top panel: temporal evolution of the additional line width (Sigma) for the Si, S, and Fe lines from Cas A observed by LE. Bottom panel: residual (δE) distribution after model fitting of the additional line width measured by LE.

3.3 时间精度

根据慧眼卫星时间系统设计特点, 利用标准秒信号长期稳定性好、有效载荷守时信号短期稳定性好的特点, 通过长期时间信号和短期时间信

号迭代校准的算法有效提升了探测事例的计时精度. 针对卫星运行期间, 标准秒信号出现了长时间缺失的新问题, 更新了守时算法, 通过脉冲星的观测检验了算法的有效性和系统误差, 形成了星上时间系统、地面算法和天体源校准的整体工作流程. 目前慧眼时间系统的解算精度好于 $16 \mu\text{s}$, 与标定脉冲星的内禀时间稳定度相当^[22]. 表3列出了国际上各个X射线天文卫星时间系统的偏移量和系统误差.

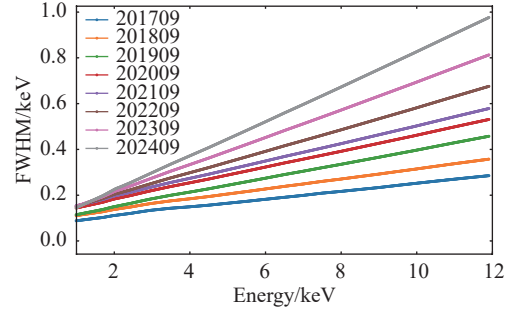


图 10 LE的能量分辨率随时间的演化

Fig. 10 The evolution of LE's energy resolution over time

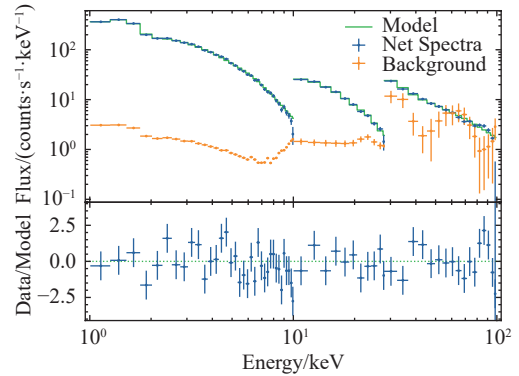


图 11 上图显示了慧眼对Crab观测到的能谱. 绿线是模型, 蓝色的数据点是扣除本底后的净计数率, 橙色的数据点是从本底模型中估计的相应背景计数率. 为了清楚起见, 这些数据点每隔30个PI通道进行一次合并. 下图显示数据(上图中的蓝色点)与模型(上图中的绿色线)的比值.

Fig. 11 The top panel shows the energy spectrum of the Crab Nebula as observed by *Insight-HXMT*. The green line represents the model, the blue data points are the net count rates after background subtraction, and the orange data points are the corresponding background count rates estimated from background model. For clarity, these data points are binned every 30 PI channels. The bottom panel displays the ratio of the data (the blue points in the upper panel) to the model (the green line in the upper panel).

表 3 X射线卫星时间系统的偏移量及精度¹
Table 3 Timing offset and accuracy of X-ray satellites

Telescope/Payload	Time offset/ μ s	Systematic error/ μ s
NICER (Neutron star Interior Composition Explorer)/ XTI (X-ray Timing Instrument)	304	1.3
NuSTAR/FPM (Focal Plane Module)	10	65
INTEGRAL/SPI (SPectrometer on INTEGRAL)	280	40
Fermi/GBM (Gamma-ray Burst Monitor)	222	57
HXMT/HE	25	12
HXMT/ME	10	9
HXMT/LE	864	16

¹Data from: <https://wikis.mit.edu/confluence/display/iachec/Timing>.

4 总结与展望

作为我国第一颗天文台级空间X射线望远镜,慧眼卫星凭借其大面积、宽波段、高时间分辨率和高能量分辨率的综合优势,开启了黑洞、中子星硬X射线快速光变和能谱研究的新窗口,取得多项重大科学成果,为国内外科学家提供了重要的天体物理研究平台,对我国空间科学和天文学的发展带来了深远影响.自2017年成功发射以来,慧眼卫星已稳定在轨运行8 yr多(设计寿命4 yr),目前状态良好,将继续延寿运行.

慧眼卫星发射运行以来,与国内外空间、地面光学及射电望远镜开展300多次联合观测,促进了多信使天文学的发展,获得了伽马暴、X射线双星系统、超新星等大量高质量的观测数据.联合观测表明慧眼卫星的数据格式正确、标定过程准确、误差估算合理,慧眼的能谱和时变分析结果得到交叉验证.

参考文献

[1] Zhang S N, Li T, Lu F, et al. SCPMA, 2020, 63: 249502

[2] Liu C, Zhang Y, Li X, et al. SCPMA, 2020, 63: 249503
[3] Li X, Liu C, Zhang Y, et al. RDTM, 2023, 7: 3
[4] Cao X, Jiang W, Meng B, et al. SCPMA, 2020, 63: 249504
[5] Tan Y, Cao X, Jiang W, et al. RDTM, 2023, 7: 15
[6] Chen Y, Cui W, Li W, et al. SCPMA, 2020, 63: 249505
[7] Li X, Chen Y, Song L, et al. RDTM, 2023, 7: 25
[8] 郑世界, 宋黎明, 屈进禄, 等. 现代物理知识, 2016, 28: 38
[9] 郑世界, 贾淑梅, 马想, 等. 航天器工程, 2018, 27: 162
[10] 贾淑梅, 黄跃, 马想, 等. 航天器工程, 2018, 27: 168
[11] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. ApJL, 2017, 848: 12
[12] Li T, Xiong S, Zhang S, et al. SCPMA, 2018, 61: 31011
[13] Ge M Y, Ji L, Zhang S N, et al. ApJL, 2020, 899: 19
[14] Kong L D, Zhang S, Ji L, et al. ApJL, 2021, 917: 38
[15] Ma X, Tao L, Zhang S N, et al. NatAs, 2021, 5: 94
[16] Li C K, Lin L, Xiong S L, et al. NatAs, 2021, 5: 378
[17] An Z H, Antier S, Bi X Z, et al. 2023, arXiv: 2303.01203
[18] Li X, Li X, Tan Y, et al. JHEAp, 2020, 27: 64
[19] Liao J Y, Zhang S, Chen Y, et al. JHEAp, 2020, 27: 24
[20] Guo C C, Liao J Y, Zhang S, et al. JHEAp, 2020, 27: 44
[21] Liao J Y, Zhang S, Lu X F, et al. JHEAp, 2020, 27: 14
[22] Tuo Y, Li X, Ge M, et al. ApJS, 2022, 259: 14

The In-orbit Operation and Calibration of the *Insight*-HXMT Satellite

LI Xiao-bo SONG Li-ming JIA Shu-mei ZHENG Shi-jie ZHAO Hai-sheng

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

ABSTRACT The Insight Hard X-ray Modulation Telescope (abbreviated as *Insight*-HXMT or HXMT), launched on June 15, 2017, is China's first astronomical observatory-level X-ray telescope independently developed by China. Combining its comprehensive advantages of large area, broad band, high timing resolution, and high energy resolution, it has opened a new window for the study of rapid optical variability and broadband energy spectra in black hole and neutron star systems in hard X-rays. The *Insight*-HXMT satellite has been in operation for more than eight years, exceeding its designed lifespan of four years, and is currently in good working condition with the capability to extend its service life. As of October 2024, the *Insight*-HXMT satellite has openly collected observation proposals from domestic and international users seven times, receiving 334 valid observation proposals, and has arranged 2368 various observation plans. It has publicly released data 13 times, totaling 40 TB, with a data release rate of 94%. HXMT offers users various versions of data analysis software and calibration databases, with an in-orbit calibration accuracy of around 2%, meeting the requirements for scientific analysis. Scholars from 17 international and 36 domestic research institutions have used *Insight*-HXMT data for scientific research, publishing about 300 high-quality academic papers with nearly 7300 citations in total.

Key words instrumentation: detectors, methods: data analysis, astronomical data bases