



慧眼 - $H X M T$

慧眼卫星科学观测提案征集白皮书 (第四轮)

中国科学院高能物理研究所

2021 年 3 月 25 日

目录

慧眼卫星科学观测提案征集白皮书	1
1 概述	8
1.1 简介	8
1.2 观测提案时间节点	9
1.3 观测时间分配策略及数据政策	9
1.4 常用链接	11
1.5 白皮书架构	12
2 慧眼卫星科学研究模式及核心科学团队	14
2.1 科学研究模式	14
2.2 核心科学研究团队	14
2.2.1 慧眼卫星项目组核心科学研究团队成员	15
2.2.2 国内学术界核心科学研究团队成员	15
2.2.3 国际学术界核心科学研究团队成员	16
3 慧眼卫星和载荷	17
3.1 慧眼卫星及有效载荷简介	17
3.2 高能 X 射线望远镜 (HE)	22
3.2.1 HE 望远镜简介	22
3.2.2 HE 主探测器的增益模式	25
3.2.3 HE 主探测器的观测方式	26
3.3 中能 X 射线望远镜 (ME)	35
3.4 低能 X 射线望远镜 (LE)	40
3.5 空间环境监测器 (SEM)	45
3.6 望远镜主要技术指标	46
4 核心科学方向	50

4.1	概述	50
4.2	科学研究的主要内容	50
4.2.1	银道面扫描巡天和监测	50
4.2.2	黑洞和中子星系统频测	61
4.2.3	黑洞和中子星系统高统计量观测	75
4.2.4	空间及地面协同和后随观测	90
5	观测模式	94
5.1	简介	94
5.2	定点观测模式	94
5.3	小天区扫描观测模式	94
6	本底	96
6.1	在轨本底估计方法	96
6.2	本底成分模拟研究	96
6.3	在轨实测本底分析	98
6.4	在轨本底模型	99
7	探测器响应	103
7.1	在轨增益和能量分辨率的标定	103
7.2	有效面积的标定	110
7.3	PSF 的标定	111
7.4	时间精度的标定	112
8	地面应用系统	114
8.1	简介	114
8.2	用户支持和服务	115
8.3	观测计划制定	116
9	提案征集与处理流程	117
9.1	提案分类	117

9.2	提案征集	118
9.3	提案处理流程	118
9.4	提案评估	121
10	提案准备工具	123
10.1	观测提案基本要求	123
10.2	源可见度估计工具 (Target Visibility Predictor)	124
10.3	观测有效曝光估计 (Observation Time Estimator)	125
10.4	视场附近亮源情况估计 (Bright source warning tool)	126
10.5	能谱模拟方法及示例	127
10.6	提案提交工具	130
10.6.1	提案征集页面	130
10.6.2	账号管理及权限	131
10.6.3	提案提交	131
11	参考文献	133
12	慧眼卫星发表文章列表	138
12.1	已发表文章列表	138
12.2	已接收文章列表	142
12.3	已投稿文章列表	143
12.4	中国科学 (物理学力学天文学) 慧眼卫星专刊文章	144
12.5	JHEAp 慧眼专辑	145
13	第三轮提案执行情况总结	149

术语和缩写

ACD: Anti-Coincidence Detector, 高能望远镜的反符合屏蔽探测器, 也称 HVT

ARF: Ancillary Response File, 辅助响应文件

ASIC: Application Specific Integrated Circuit, 专用集成电路

Atel: Astronomy Telegram, 天文电报

AXP: Abnormal X-ray Pulsar, 反常 X 射线脉冲星

CALDB: Calibration database, 标定数据库

CCD: Charge Coupled Device, 电荷耦合器件

CRP_D: Cosmic Ray Proton-induced Delayed background, 宇宙高能质子造成的延时本底

CRP_P: Cosmic Ray Proton-induced Prompt background, 宇宙高能质子造成的瞬时本底

CsI: Cesium Iodide, 碘化铯, 高能望远镜主探测器的两种探测器晶体之一

CXB: Cosmic X-ray Background, 宇宙 X 射线背景

CXB_A: CXB-induced Aperture background, 孔径入射的宇宙弥散 X 射线背景

CXB_N: CXB-induced Non-aperture background, 非孔径入射的宇宙弥散 X 射线背景

FOV: Field of View, 视场

FWHM: Full Width at Half Maximum, 半高全宽

GCN: The Gamma-ray Coordinates Network, 伽马暴坐标网络

Geant4: GEometry ANd Tracking, 几何和跟踪模拟软件包

Glitch: 脉冲星周期跳变

GPS: Global Positioning System, 全球定位系统

GRB: Gamma-Ray Burst, 伽马射线暴 (简称: 伽马暴)

GW: Gravitational Wave, 引力波 (事件)

GWEM: Gravitational Wave Electromagnetic counterpart, 引力波电磁对应体

HE: High Energy X-ray Telescope, 高能 X 射线望远镜 (简称高能望远镜)

HDPC: HXMT high level Data Production Processing and Calibration, 慧眼卫星高级数据产品生成与标定分系统

HMXB: High Mass X-ray Binary, 大质量 X 射线双星

HSOC: HXMT Science Operation Center, 慧眼卫星科学运行分系统

HSSC: HXMT Science Support Center, 慧眼卫星科学研究支撑分系统

HSUC: HXMT Science User Center, 慧眼卫星科学用户分系统

HVT: HE Veto detector, 高能望远镜反符合屏蔽探测器, 也称 ACD

HXMT: Hard X-ray Modulation Telescope, 硬 X 射线调制望远镜 (即慧眼卫星)

Insight-HXMT:

LE: Low Energy X-ray Telescope, 低能 X 射线望远镜

LMXB: Low Mass X-ray Binary, 小质量 X 射线双星

LVDS: Low-Voltage Differential Signaling, 低电压差分信号

ME: Medium Energy X-ray Telescope, 中能 X 射线望远镜

NaI: Sodium Iodide, 碘化钠, 高能望远镜主探测器的两种探测器晶体之一

PHA: Pulse Height Amplitude, 脉冲高度

PI: Pulse Invariant, 脉冲不变量

PM: Particle Monitor, 粒子监测器

PMT: PhotoMultiplier Tube, 光电倍增管

PSD: Pulse Shape Discrimination, 脉冲形状甄别

PSF: Point Spread Function, 点扩展函数

PV: Performance Verification, 性能验证

QPO: Quasi-Periodic Oscillation, 准周期震荡

RMF: Redistribution Matrix File, 响应矩阵

RMS: Root Mean Square, 均方根

SAA: South Atlantic Anomaly, 南大西洋异常区

SCD: Swept Charge Device, 扫式电荷器件

SEM: Space Environment Monitor, 空间环境监测器

SFXT: Supergiant Fast X-ray Transients, 超巨星为伴星的暂现源

SGR: Soft Gamma-ray Repeater, 软伽玛射线重复暴

TGF: Terrestrial Gamma-ray Flash, 地球伽马闪

TOA: Time of Arrival, 到达时间

ToO: Target of Opportunity, 机会目标观测

慧眼卫星科学中心: 在地面应用系统科学应用部分的基础上, 联合科学研究、载荷研制的力量组成, 统筹负责慧眼卫星的科学运行、数据处理、科学研究方面的工作

1 概述

1.1 简介

“慧眼”硬 X 射线调制望远镜 (*Insight-HXMT*) 卫星 (以下简称慧眼卫星) 是我国第一颗空间 X 射线天文卫星, 它既可以实现宽波段、大视场的 X 射线巡天, 又能够研究黑洞、中子星等高能天体的短时标光变和宽波段能谱, 同时也是大视场 ($\sim 60\%$ 全天) 和大面积 ($0.2\text{--}3\text{ MeV}$, $\sim 1000\text{ cm}^2$) 的伽马射线暴全天监视器。它包含三个主要的在轨探测器: 高能 X 射线望远镜 ($20\text{--}250\text{ keV}$, 5100 cm^2) (Liu et al. 2020), 中能 X 射线望远镜 ($8\text{--}35\text{ keV}$, 952 cm^2) (Cao et al. 2020) 以及低能 X 射线望远镜 ($1\text{--}12\text{ keV}$, 384 cm^2) (Chen et al. 2020)。

“慧眼”卫星自 2017 年 6 月 15 日于酒泉卫星发射中心发射升空, 目前已在轨运行 45 个月, 运行良好 (Zhang et al. 2020a)。在此期间, 慧眼卫星获得了银道面扫描巡天、黑洞、中子星、太阳耀发等大量观测数据, 伽马射线暴探测率约 100 个/年。到目前为止, “慧眼”卫星已经取得了多项有显示度的成果: 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; 测量到了超过 80 keV 的中子星磁场回旋吸收线; 发现了高于 200 keV 的黑洞双星系统的准周期振荡; 发现了黑洞双星向外高速运动的等离子体流, 并且首次在黑洞双星中观测到冕的速度演化; 发现了中子星的单个 I 型核爆对吸积盘冕的冷却现象; 首次发现并证认了 FRB 的 X 射线对应体; 对银盘的扫描监测获得了大量 X 射线天体的宽波段爆发活动的监测并且发现了多个新变源的候选体; 完成了国内最高精度的脉冲星导航试验; 还多次参加国际空间和地面联测。这些观测研究表明, “慧眼”卫星不仅能实现其预定的科学目标, 而且有望取得超出预期的重要科学成果。慧眼的主要科学目标有:

- (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”卫星的用户数据分析软件和标定数据库 (CALDB) 不断完善。利用

空天区，Cas A、Crab 星云及脉冲星，Perseus 等的观测数据不断监测载荷性能的变化，持续更新标定数据库。用户数据分析软件会检索适合该次观测的标定文件并产生正确的响应文件。同时，本底模型考虑了更多相关因素，有效提高了本底估计的精度。2020 年 11 月，用户分析软件 V2.04 版本和最新 CALDBV2.04 正式发布，该版本在 HE 毛刺扣除，增益修正方面有改进，标定和本底参数也有所更新。此外，为了方便用户利用慧眼卫星开展伽马暴研究，慧眼卫星的伽马暴观测数据已经发布，伽马暴数据分析软件 beta 1.4 版已于 2020 年 11 月发布。

“慧眼”卫星网站为科学用户提供了 1 级数据产品的下载服务 (<http://archive.hxmt.cn/proposal>)。核心科学组成员可以在线申请保护期内的核心观测数据；客座观测提案 PI 可以下载相应的提案观测数据；临时 ToO 和超过保护期的观测数据可公开下载。截止 2020 年 12 月 31 日，网站已提供 1869 个观测的数据产品以及累计 255 个伽马暴观测数据的公开下载。

慧眼卫星第三轮观测将于 2021 年 7 月 31 日结束，观测提案执行情况如第 13 章所示。本次将开展第四轮提案征集，下面将详细介绍提案征集基本情况、仪器设计与指标、科学能力、科学研究组织、科学观测以及用户支持等。

1.2 观测提案时间节点

观测提案征集开始时间：2021 年 4 月 1 日零时

观测提案征集截止时间：2021 年 4 月 30 日 24 时

观测提案评审结果发布时间：2021 年 6 月 30 日

本轮提案观测开始时间：2021 年 8 月 1 日

本轮提案观测结束时间：2022 年 7 月 31 日

注：以上时间均为北京时间。

1.3 观测时间分配策略及数据政策

(1) 本次共征集 47 兆秒的有效观测时间（也就是对目标的曝光时间，按照 50%观测效率，有效观测时间=曝光时间=实际观测时间/2），核心提案和客座

提案的比例为 2:3。具体时间分配如下表所示，其中非 ToO 观测（非暴发源或暂现源）12 兆秒，ToO 观测 35 兆秒（预估约 10%的爆发几率）。批准的观测时间中 A 类观测占 30%，B 类观测占 50%，C 类观测占 20%，其中 C 类观测将视年度观测执行情况进行，不确保观测。另外，预留出约 2 兆秒用于临时 ToO 观测和临时标定观测。

提案类型	批准曝光时间 (兆秒)	批准曝光时间 (兆秒)	总曝光时间
	非 ToO 观测	ToO 观测	
Core Proposals	4 (2.5 for galactic survey)	14	18
Guest Proposals	6	21	27
Calibration Proposals	2	0	2

(2) 核心观测提案指“慧眼”核心科学组统一提交的观测提案。由各核心科学工作组在组内讨论确定后，由组长统一提交。在数据保护期内，数据使用权在提案所在核心工作组内共享。

(3) 客座观测提案指响应慧眼卫星征集客座观测提案的通知提出的、不与慧眼卫星核心科学目标重叠的观测提案申请。客座观测对全球开放，不限定国别，也没有预先时间分配。核心科学组成员可以个人名义提交观测提案，该提案将按照客座观测提案进行评审和执行。

(4) 涉及到银道面扫描观测的提案为核心观测提案，暂不开放为客座提案。

(5) 多波段联合观测是指慧眼卫星与地面望远镜或者其他在轨卫星联合

观测目标天体。申请人可以申请多波段联合观测的观测提案，并在申请获批后负责协调各个设备的观测时间。

(6) 除非特别说明，本轮观测提案中的非 ToO 观测的数据保护期为 1 年，ToO 观测的数据保护期为 3 个月。

(7) 设置“博士生研究计划”，常规观测中 20% 的数据可申请数据保护，用于博士生毕业论文研究选题。由其博士生导师在提案申请书中提出数据保护申请及保护期限，获批准的数据在保护期内不公开发布。

(8) 非本轮征集（临时提交）观测提案中的 ToO 观测数据也可申请数据保护，如获批准，数据保护期为 3 个月，否则在完成预处理后立即发布。

(9) 对于第三轮观测提案中获得批准但是尚未实施的观测，除了 A 类非 ToO 观测外，在第四轮中都不保留，需要重新申请。

1.4 常用链接

- 提案提交界面（需要注册）：<http://proposal.ihep.ac.cn/proposal.jspx>
- 提案填写指南：<http://hxmtcn.ihep.ac.cn/doc/170.jhtml>
- 有效曝光时间估计：<http://proposal.ihep.ac.cn/calc/calc.jsp>
- 源可见度估计：<http://proposal.ihep.ac.cn/TargetVisibilityPredictor/>
- 视场附近亮源情况估计：<http://proposal.ihep.ac.cn/soft/soft2.jspx>
- 能谱模拟工具：http://proposal.ihep.ac.cn/soft/user_spec_2020.zip
- 提案及目标源可行性分析模板：<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/doc/281.jhtml>
- 已观测源列表：<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/ObsSrcList.jhtml>
- 慧眼卫星已发表文章列表：<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/papers.jhtml>
- 数据发布与下载：<http://archive.hxmt.cn/proposal>
- HXMT 卫星数据管理办法：<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/policy/83.jhtml>

-
- 慧眼卫星核心科学研究团队的组成、职责及权利，以及论文署名规则：

<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/policy/84.jhtml>

1.5 白皮书架构

提交的观测提案主要内容包括：科学目标、观测天体和观测曝光量等，并需要通过模拟观测数据等手段论述科学目标的可实现性。为了帮助申请人更好地完成观测提案，本白皮书对相关内容进行详细介绍，主要分为三个部分：

第一部分，主要介绍慧眼卫星观测提案征集基本信息，科学团队组建策略，以及科学团队成员所享有的权利以及承担的义务。

第二部分，主要通过对慧眼卫星项目和科学目标等基本情况的介绍，使得提案申请人能够详细了解慧眼卫星科学仪器的特点和性能指标以及科学产出方向。

基于慧眼卫星科学仪器的特点，慧眼卫星团队初步设定了若干个可能有重大科学产出的核心研究方向，申请人可参考这些研究方向结合自身研究兴趣提出科学观测提案，也欢迎申请人基于慧眼卫星的观测能力，提出在上述研究方向之外的观测提案。

第三部分，主要介绍用户准备提案所需要的网络平台和软件工具。网络平台由慧眼卫星地面应用系统（慧眼卫星科学中心）提供，并为用户完成观测提案提供了部分软件工具。

白皮书详细介绍了申请人准备和提交提案需要运行和使用的必要工具，主要包括目标源可见性估计、曝光和灵敏度估计软件、视场附近亮源情况估计，以及能谱模拟分析工具。目标源可见性估计工具给出由于地球遮挡以及太阳避免角等的限制而导致的目标天体的可观测时间窗口；曝光和灵敏度估计工具给出目标源有效曝光和灵敏度的估计；能谱模拟分析工具，可以得到基于一定曝光量的目标天体的模拟能谱。

慧眼卫星科学中心是慧眼卫星观测提案征集、评估以及后期观测安排，数据服务和用户服务的主要机构，申请人可以从本白皮书中了解到慧眼卫星地面应用系统的基本构成和运行特点。观测提案最终需要登录慧眼卫星地面应用系统设置

的网页完成提交。

本白皮书具体章节组织如下：科学研究模式及核心科学团队（第二章），慧眼卫星和载荷（第三章），核心科学方向（第四章），观测模式（第五章），本底（第六章），探测器响应（第七章），地面应用系统（第八章），提案征集与提案准备工具（第九、十章），参考文献和慧眼卫星发射运行以来的学术论文列表（第十一、十二章），以及第二轮提案执行情况总结（第十三章）。

2 慧眼卫星科学研究模式及核心科学团队

2.1 科学研究模式

和国际上大部分其它空间天文卫星一样，慧眼卫星在轨观测、数据分析和相关科学研究工作将主要有两个模式：

1) 围绕慧眼卫星核心科学目标开展的研究工作。慧眼卫星核心科学目标指的是能够充分利用慧眼卫星的优势，需要较多的观测时间，在国际上具有明显的竞争力并且预期能够获得重要科学成果的科学目标。

2) 慧眼卫星客座科学研究工作。这是由全世界科学界学者及其团队响应慧眼卫星征集客座观测提案的通知提出的、不与慧眼卫星核心科学目标重叠的观测提案申请，这些申请将由首席科学家领导的科学委员会组织评审和遴选。遴选通过的观测提案申请将由慧眼卫星地面科学中心安排观测，项目建议团队将在数据的保护期内专享由此产生的观测数据的分析和科学论文的发表。

2.2 核心科学研究团队

慧眼卫星核心科学研究团队将主要由三部分人员组成：

1) 慧眼卫星项目组主要成员

包括项目主要建议人、有效载荷和地面科学中心研制的主要负责人；

2) 国内学术界

包括有关研究方向的骨干并且有兴趣对慧眼卫星的科学研究做出贡献的学者；

3) 国际学术界

包括国际上对慧眼卫星做出过重要贡献的学者个人以及国外单位和部门推荐的学者。

下面对这三部分成员的组成、职责和权利进行简要的描述。

2.2.1 慧眼卫星项目组核心科学研究团队成员

2.2.1.1 主要职责

- 1) 完成慧眼卫星有效载荷研制和性能测试；
- 2) 负责空间运行环境对载荷性能影响等研究工作；
- 3) 配合载荷标定工作；
- 4) 在轨运行期间配合地面科学中心完成应承担的工作。

2.2.1.2 主要权利

- 1) 有权选择在所有使用保护期内的 HXMT 的核心观测计划产生的数据的论文上署名，署名顺序按照慧眼卫星署名规则执行；
- 2) 在经过首席科学家确认之后，可以随时选择加入或者退出任何一个或者若干核心科学目标工作组。

2.2.2 国内学术界核心科学研究团队成员

由国内学术界有关研究方向的骨干并且有兴趣对慧眼卫星的科学研究做出贡献的学者组成，分成若干核心科学目标工作组。慧眼卫星核心科学目标将向国内学术界征集，由首席科学家组织国内外专家组成的遴选委员会对征集到的建议书进行评审和遴选，确定慧眼卫星的核心科学目标和相应的工作组召集人及其成员，分配每个核心科学目标的观测时间。慧眼卫星地面科学中心将对这些核心科学目标制定相应的观测计划。

2.2.2.1 主要职责

- 1) 核心科学目标的论证，包括科学意义、观测模拟、观测时间估计、观测策略制定；
- 2) 完成该科学目标的白皮书并作为科学工作手册的核心内容以及科学论文发表；
- 3) 配合慧眼卫星地面科学中心制定该科学目标的核心观测计划；

-
- 4) 高效率高质量完成该科学目标的数据分析并署名发表科学论文;
 - 5) 在该数据保护期内不得向他方提供该数据;
 - 6) 如果需要使用该数据保护期内的数据参加国内外其它科学研究的合作, 除非已经得到了遴选委员会的授权, 一律需要提请首席科学家批准;
 - 7) 通过各种途径获得完成上述工作所需的各种资源的申请, 包括经费和其它观测和计算设备的使用申请。

2.2.2.2 主要权利

- 1) 在数据保护期内使用该核心观测计划的观测数据, 包括经过遴选委员会或者首席科学家批准之后使用该数据参加国内外其它科学研究的合作;
- 2) 作为骨干成员参加由首席科学家牵头组织的各种大型科学研究计划, 并获得经费的支持;
- 3) 以慧眼卫星核心科学目标为主要研究内容申请科学研究计划, 并获得经费的支持。

2.2.3 国际学术界核心科学研究团队成员

国际上对 HXMT 做出过重要贡献的学者个人以及部门推荐的学者, 可以申请加入现有的 HXMT 核心科学目标工作组, 或者提出新的 HXMT 核心科学目标建议。经首席科学家领导的评审委员会批准之后, 将在不违反中国有关数据和经费等政策和法规的前提下, 承担和享有国内 HXMT 核心科学目标工作组成员的同样职责和权利。

积极鼓励国际科学家加入慧眼核心科学研究。若要申请与慧眼核心科学组或成员合作, 需要向相关核心组的负责人提出申请 (可在线申请: <http://hxmtweb.ihep.ac.cn/policy/85.jhtml>)。一旦获批, 该成员就可以在授权期内访问相关的数据。

3 慧眼卫星和载荷

3.1 慧眼卫星及有效载荷简介

此处的综述摘自 Zhang et al. (2020a)。图 3-1 为慧眼卫星在轨运行示意图。慧眼卫星采用分舱室式设计，有效载荷（科学探测仪器）位于卫星上部，服务舱以“资源二号”卫星平台为基础，位于卫星下部。卫星总重量 2700 kg，运行在高度 550 km、倾角 43° 的近地圆轨道，设计寿命 4 年。卫星指向精度为 0.1 度 (3σ)，姿态测量精度 0.01 度 (3σ)，姿态稳定度 0.005 度/秒。

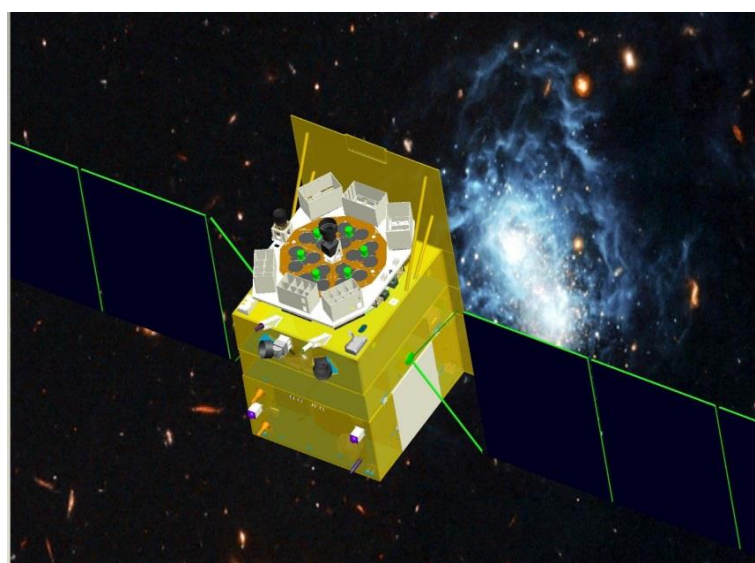


图 3-1 慧眼卫星有效载荷示意图

慧眼卫星上配置了四个有效载荷：高能 X 射线望远镜 (HE)、中能 X 射线望远镜 (ME)、低能 X 射线望远镜 (LE) 和空间环境监测器 (SEM) (见图 3-2)。各个载荷又分别包括多个功能不同的单机设备，表 3-1 列出了慧眼卫星有效载荷的单机设备及功能介绍。图 3-3 是慧眼卫星三个载荷的准直器摆放方向的说明图。这些准直器的视场和方位角见表 3-2。

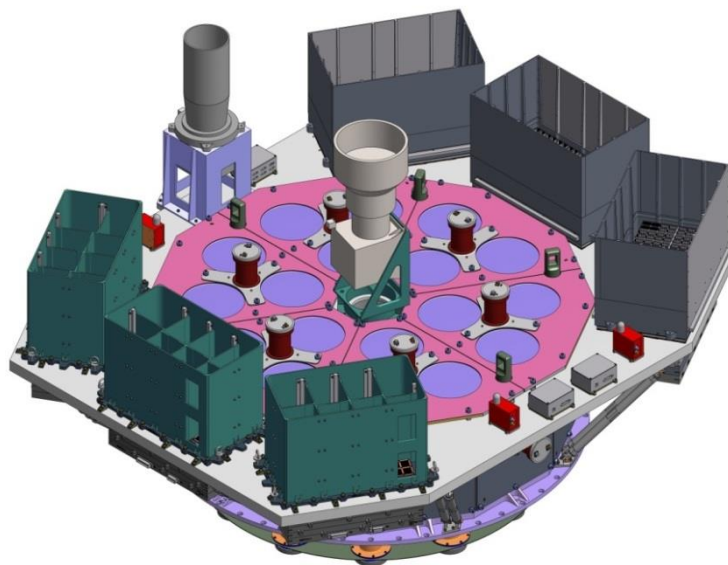


图 3-2 慧眼卫星主有效载荷结构示意图。

左下角墨绿色的三个机箱为低能 X 射线望远镜 LE，中间为高能 X 射线望远镜 HE，右上角灰色的三个机箱为中能 X 射线望远镜 ME。安置在上安装板上的还有两个星敏感器。图中的颜色只是为了区分不同的部件，而并不代表真实的表面颜色。

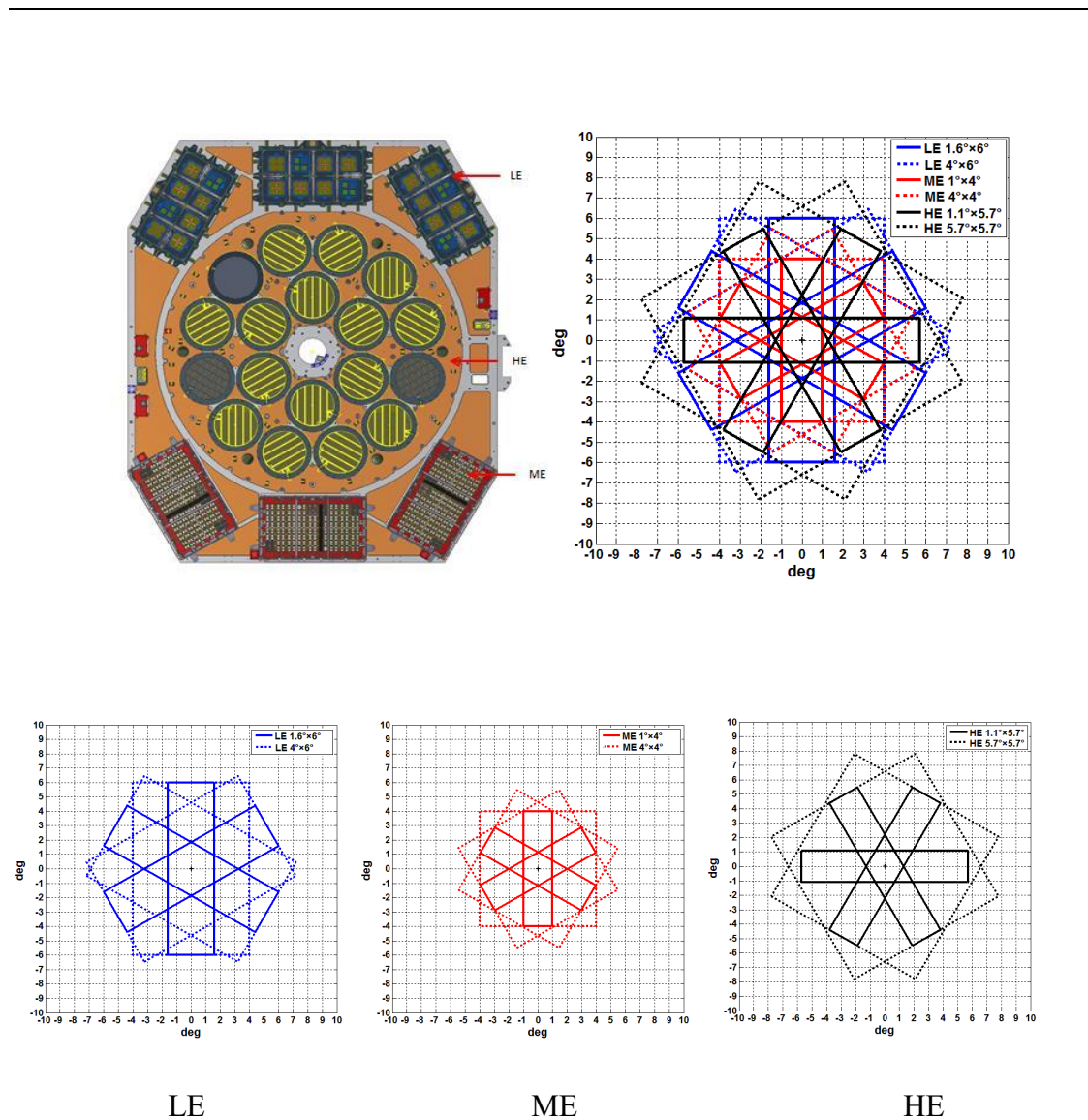


图 3-3 上左图：慧眼卫星三个载荷的准直器摆放的俯视图。上右图和下图为准直器视场。

表 3-1 慧眼卫星有效载荷各分系统及设备功能

序号	分系统名称	设备名称	主要功能
1	高能 X 射线望远镜 HE	高能主探测器	包括 18 个相同的 NaI/CsI 复合探测器，其中 NaI 主要用于探测从准直器视场内入射的 20-250 keV 光子，CsI 主要用于监测全天各方向（除地球遮挡区域）入射的 200-3000 keV 光子。
		高能准直器	18 个准直器单体，提供 $1.1^{\circ} \times 5.7^{\circ}$ （16 个，其中一个全遮挡）

			和 $5.7^{\circ} \times 5.7^{\circ}$ (2 个) 的视场。CsI 全天监测功能的视场为除地球遮挡的所有天区, 不受准直器视场限制。
		反符合屏蔽探测器	探测穿透性荷电粒子, 为主探测器提供反符合信号, 实现主动屏蔽荷电粒子。
		粒子监测器	3 个相同的探测器单体, 连续监测空间高能粒子流量
		在轨标定探测器	用 ^{241}Am 放射源为主探测器提供能量为 59.5 keV 的特征 X 射线光子用于 HE 的在轨增益控制, 同时给出其到达时间的标识信号。
		高能电控箱	实现探测器运行监控、数据采集、数据打包及发送等功能。
		高能配电箱	为电控箱及各探测器供电、并完成测控接口功能。
2	中能 X 射线望远镜 ME	中能探测器	有 3 个相同的探测器机箱组件, 每个探测器机箱组件由 Si-PIN 探测器阵列、读出电子学、准直器和遮光罩等部件构成, 用于探测 5~30 keV 能区光子。
		中能准直器	限制中能望远镜的视场。提供 $1.0^{\circ} \times 4.0^{\circ}$ (48 个, 其中 3 个全遮挡) 和 $4.0^{\circ} \times 4.0^{\circ}$ (6 个) 的视场。
		中能电控箱	完成 ME 分系统的数据管理、测控接口功能, 同时为各探测器机箱供电。
3	低能 X 射线望远镜 LE	低能探测器	有 3 个相同的探测器机箱组件, 每个探测器机箱组件由 SCD 探测器阵列、读出电子学、准直器和遮光罩等部件构成。用于探测 1-15 keV 光子。
		低能准直器	限制低能望远镜的视场。提供 $1.6^{\circ} \times 6.0^{\circ}$ (63 个, 其中 3 个全遮挡)、 $4.0^{\circ} \times 6.0^{\circ}$ (21 个, 其中 3 个全遮挡) 以及 $60^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (6 个大单元) 的视场。
		低能电控箱	实现 LE 分系统的数据管理、测控接口功能, 同时为各探测器机箱供电。

4	空间环境 监测器 SEM	空间环境监 测器	连续监测卫星轨道上荷电粒子的 流量，有一定的方向分辨、能谱分 辨及质子和电子的鉴别功能。
5	整体支撑 结构 SS	主结构	为有效载荷各分系统探测器的安 装提供支撑平台，满足安装精度和 力学环境要求。

表 3-2 HE、ME 和 LE 准直器视场和方位角

望远镜	准直器单元个数	视场方案	方位角
HE	5	$1.1^{\circ} \times 5.7^{\circ}$	0°
	5	$1.1^{\circ} \times 5.7^{\circ}$	60°
	5	$1.1^{\circ} \times 5.7^{\circ}$	-60°
	1	$5.7^{\circ} \times 5.7^{\circ}$	-60°
	1	$5.7^{\circ} \times 5.7^{\circ}$	60°
	1	$1.1^{\circ} \times 5.7^{\circ}$ ，全遮挡	0°
ME	15	$1^{\circ} \times 4^{\circ}$	90°
	15	$1^{\circ} \times 4^{\circ}$	30°
	15	$1^{\circ} \times 4^{\circ}$	-30°
	2	$4^{\circ} \times 4^{\circ}$	90°
	2	$4^{\circ} \times 4^{\circ}$	30°
	2	$4^{\circ} \times 4^{\circ}$	-30°
	1	$1^{\circ} \times 4^{\circ}$ ，全遮挡	90°
	1	$1^{\circ} \times 4^{\circ}$ ，全遮挡	30°
	1	$1^{\circ} \times 4^{\circ}$ ，全遮挡	-30°
LE	20	$1.6^{\circ} \times 6^{\circ}$	90°
	20	$1.6^{\circ} \times 6^{\circ}$	30°
	20	$1.6^{\circ} \times 6^{\circ}$	-30°
	6	$4^{\circ} \times 6^{\circ}$	90°
	6	$4^{\circ} \times 6^{\circ}$	30°

	6	$4^{\circ} \times 6^{\circ}$	-30°
	2	$1.6^{\circ} \times 6^{\circ}$, $4^{\circ} \times 6^{\circ}$ 各一个全遮挡	90°
	2	$1.6^{\circ} \times 6^{\circ}$, $4^{\circ} \times 6^{\circ}$ 各一个全遮挡	30°
	2	$1.6^{\circ} \times 6^{\circ}$, $4^{\circ} \times 6^{\circ}$ 各一个全遮挡	-30°
	2 (大单元)	$60^{\circ} \times 2.5^{\circ}$	90°
	2 (大单元)	$60^{\circ} \times 2.5^{\circ}$	30°
	2 (大单元)	$60^{\circ} \times 2.5^{\circ}$	-30°

3.2 高能 X 射线望远镜 (HE)

3.2.1 HE 望远镜简介

此处简介摘自 Liu et al. (2020)。为了优化探测性能，HE 望远镜综合配置了多种仪器：使用主探测器探测天体源的时变和能谱；使用准直器提供视场，且准直器的视场被摆放为 3 个不同的方向（图 3-3），为直接解调成像提供必要的空间调制；使用在轨标定探测器对主探测器进行增益控制；使用反符合屏蔽探测器对空间带电粒子进行主动屏蔽，压低粒子导致的本底；使用粒子监测器监视空间粒子流强，在高流强区域关闭主探测器和反符合屏蔽探测器高压，避免这些探测器受到损害。

HE 主探测器是 HE 望远镜的核心部件，由 18 个探测单元组成，每个探测单元由一个 NaI(Tl)/CsI(Na)复合晶体探测器和一个准直器构成。除主探测器外，HE 望远镜还包含在轨标定探头和在轨标定转接盒、反符合屏蔽探测器 (ACD)、粒子监测器 (PM) 以及相应的机械结构。图 3-4 展示了 HE 各单机的布局。

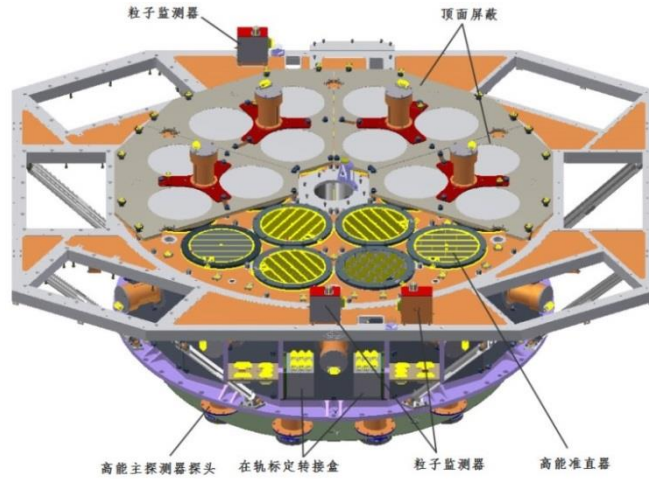


图 3-4 HE 各单机布局图。在轨标定探头位于准直器内、主探测器前端，图中未显示。

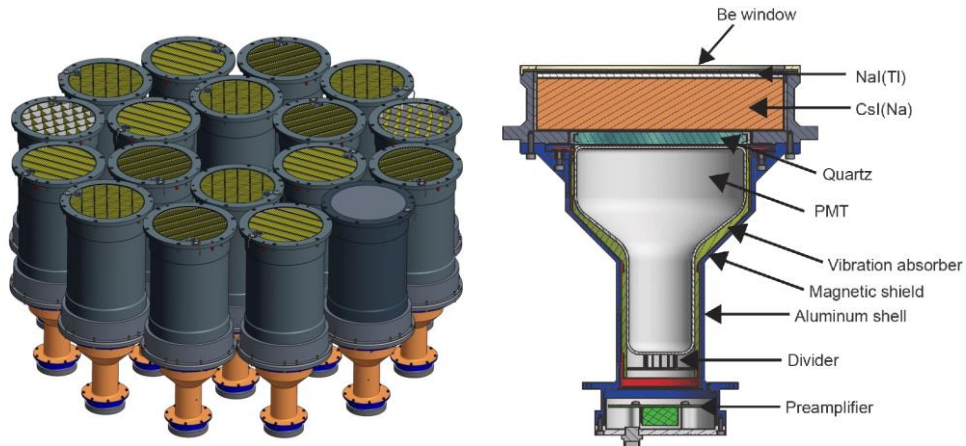


图 3-5 左图：慧眼卫星 HE 主探测器阵列。包括 18 组探测单元，每个探测单元的上部是准直器，中部为 NaI(Tl)/CsI(Na)复合晶，下端为读出 X 射线光子与晶体作用产生荧光的光电倍增管。右图：HE 复合晶体探测器示意图。

每个 HE 高能主探测器是由 18 套复合晶体组成的探测器阵列，每个探测器的直径为 19 cm，面积为 283.5 cm²，总几何面积约 5100 cm²。主探测器采用 NaI(Tl)/CsI(Na)复合晶体做为探测介质，其中 NaI(Tl)（以下简称为 NaI 晶体）为主晶体，利用硬 X 射线光子在 NaI 晶体内发生的光电效应或康普顿散射等作用而沉积能量，实现对硬 X 射线光子的能谱和时间测量。后端的 CsI(Na)晶体（以下简称为 CsI 晶体）作为主动式屏蔽，可以屏蔽来自探测器背面 2π 立体角的本底。此外，CsI 晶体也能探测穿透性的伽马射线光子（0.2-3 MeV），从而实现对

全天伽马射线的监测。NaI 和 CsI 这两种晶体发出的闪烁信号采用同一个光电倍增管（PMT）读出，光电倍增管 PMT 将荧光信号转化为电信号输出，利用脉冲形状甄别（PSD）技术识别区分 NaI 和 CsI 这两类信号。为了消除温度变化对探测器响应的影响，HE 主探晶体盒采用了在轨主动温控措施，使工作温度恒定在 $18\pm2^{\circ}\text{C}$ 。

相应的，准直器也包含 18 个单体，与主探测器单体一一对应。18 个准直器单体分别具有 $1.1^{\circ}\times 5.7^{\circ}$ （16 个，其中一个全遮挡）和 $5.7^{\circ}\times 5.7^{\circ}$ （2 个）的视场。18 个单体准直器视场排列分为 3 组，每组相差 60° ，构成高能望远镜总的视场约为 $5.7^{\circ}\times 5.7^{\circ}$ 。准直器的物理功能是让特定方向的 X 射线通过，阻止其它方向的 X 射线进入探测器，因此，用对 X 射线有强烈吸收衰减能力的材料制造，采用栅格结构。栅孔的几何尺寸确定了准直器的视场角，宽 6 mm、长 30 mm、高 300 mm 的栅孔可形成 $1.1^{\circ}\times 5.7^{\circ}$ 的视场角。18 个 HE 主探测器和准直器的排布见图 3-5。

在轨标定探头是利用 ^{241}Am 放射源和塑料闪烁体探测器实现的。将一个镶嵌于塑料闪烁体内的标定源（ ^{241}Am ， $\sim 200\text{ Bq}$ ）安装在准直器的一个栅格中，并尽量靠近该准直器对应的主探测器入射窗。该标定源因 α 衰变而发出的部分 59.5 keV 的光子被主探测器探测到而产生信号，包裹放射源的塑料闪烁体因探测到 $\sim 5.5\text{ MeV}$ 的 α 粒子也同时产生一个信号，将这两个信号进行符合，标记为标定事例，根据该标定事例（59.5 keV 的光子在主探测器中形成的好事例）的变化，通过高能电控箱调节主探测器光电倍增管的高压，从而使得主探测器的增益保持稳定。

粒子监测器用于监测卫星运行中高能质子和高能电子的流强，当流强大于某个设定的阈值时，卫星平台将关闭主探测器和反符合屏蔽探测器的光电倍增管高压，以避免光电倍增管损坏。HE 共配备三台同样的粒子监测器。粒子监测器主要由塑料闪烁体、光电倍增管、高压模块以及电子学电路组成。塑料闪烁体被加工成高 10 mm、直径 10 mm 的圆柱体，其顶面和侧表面涂有反射漆，反射漆外面包有特氟龙（Teflon），外面罩有橡胶闪烁体帽和 1 mm 厚的铝材料，粒子监测

器可探测的带电粒子的最低能量下阈为：1 MeV（电子）和 20 MeV（质子）。荷电粒子撞击塑料闪烁体产生的荧光信号利用相匹配的 0.5 英寸光电倍增管进行探测，经过电子学电路处理后送给 HE 高能电控箱进行处理。由于粒子监测器提供的主探保护功能，HE 在高带电粒子的环境下（如 SAA 区）将不能进行科学观测。

反符合屏蔽探测器（ACD，也称 HVT）包裹在主探测器前方 2π 方向，由 6 片顶面探测器和 12 片侧面探测器组成，作为主动屏蔽探测器，它用于屏蔽这个方位角范围内入射的带电粒子在主探测器上引起的本底。反符合屏蔽探测器的输出信号送至高能电控箱进行统一处理。在每个主探测器的好事例数据包中，有 18 位 BOOL 型数据用来表示该事例发生时，对应的 18 个反符合屏蔽探测器是否同时有信号。这些数据下传到地面进行分析时，可根据情况选择合适的反符合的逻辑。

高能电控箱负责 HE 各探测器信号的处理及控制，并通过 LVDS 和 1553B 总线与卫星数管系统交换数据。为了保证时间的准确性，高能电控箱同时接收来自卫星平台的时间同步信号（GPS 秒脉冲）和 5 MHz 高精度时钟信号。

3.2.2 HE 主探测器的增益模式

HE 主探测器采用光电倍增管（PMT）将入射粒子在 NaI 和 CsI 晶体中因沉积能量而发出的光转换为电信号并进行放大，放大后的电信号由电子学系统进行记录和存储。PMT 的供电高压决定了 PMT 的放大倍数，即增益。通过调整 PMT 的供电高压，使 HE 主探测器具有不同的增益，在电子学道数范围固定的情况下，探测器的记录能量范围也不同。

为了满足不同科学目标对探测能量范围的不同需求，HE 主探测器设置两种增益模式：正常模式（Normal Mode）和低增益模式（Low gain Mode），其对应的探测器记录能量范围如下表。这两种增益模式可以通过地面上传指令进行切换。

表 3-3 HE 主探测器两种增益模式及探测器的记录能量范围。低增益模式主要用于监测伽马暴

等伽马射线源，因此该模式旧称伽马暴模式。引自 C. Z. Liu et al. (2020)。

增益模式	NaI 记录能量范围 (keV)	CsI 记录能量范围 (keV)	备注
正常 (NG)	20 – 250	40 – 600	PMT 正常高压，开启自动增益控制
低增益 (LG)	100 – 1250	200 – 3000	降低 PMT 高压，关闭自动增益控制

请注意：(1)增益模式决定了探测器记录能量范围，因此对定点或扫描观测，以及伽马射线全天监测这两种观测方式（见 3.2.3 节）都有影响。(2)记录能量是指探测器能够记录的光子能量的范围，是光子在探测器中的沉积能量，而非光子的入射能量。沉积能量可能小于入射能量。沉积能量与入射能量的关系由探测器响应矩阵描述。

3.2.3 HE 主探测器的观测方式

HE 望远镜使用主探测器对天体源进行观测，包括如下两种观测方式：

(1) 定点或扫描观测：基于准直器提供的视场，在 20-250 keV 能段对天体源进行定点观测或对一片天区进行扫描观测。定点观测要求卫星在惯性系固定指向，而扫描观测要求卫星在惯性系不断调整指向，因此定点与扫描是互斥关系，不能同时进行。定点或扫描是慧眼卫星的主要观测手段，也适用于 ME 和 LE 望远镜。

(2) 伽马射线全天监测：能量大于约 100-200 keV 的伽马射线光子可穿透望远镜结构材料，并在 CsI 晶体中产生信号（见下图），因此 CsI 可进行伽马射线监测，监测范围是除地球遮挡外的所有天区。这是慧眼卫星扩展的观测手段，仅适用于 HE 望远镜。

请注意：伽马射线全天监测跟定点或扫描观测是同时进行的，不需要对卫星运行进行额外操作，仅受 HE 主探测器增益模式设置的影响，详细描述见 3.2.2 节。

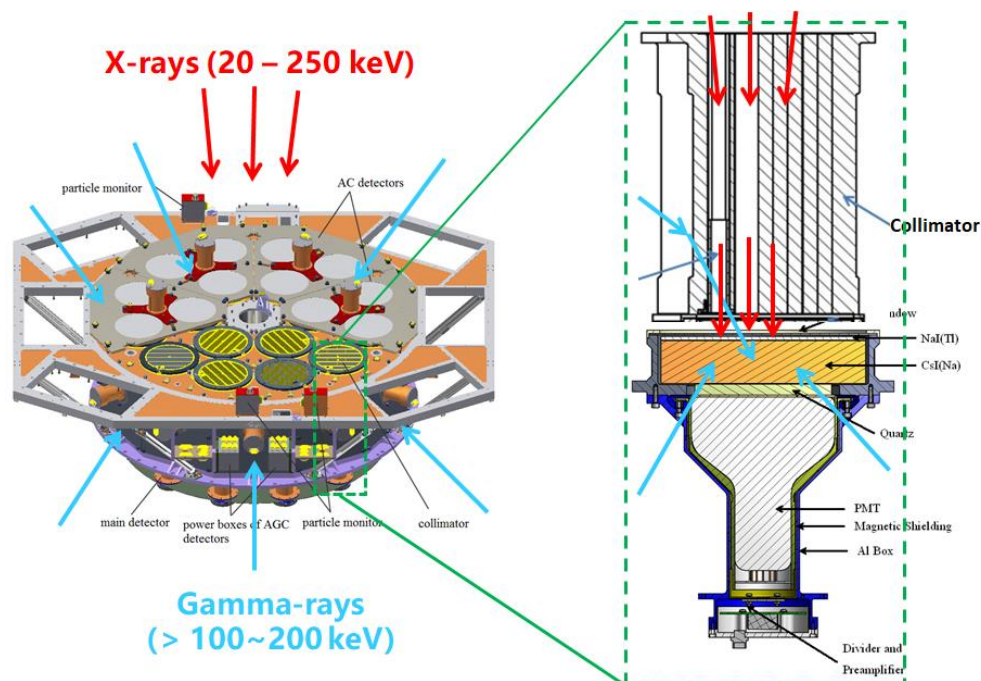


图 3-6 慧眼卫星 HE 主探测器的两种观测方式的示意图。红色箭头代表从准直器视场范围内入射的 X 射线光子，主要由 NaI 晶体探测。蓝色箭头代表各个方向入射的伽马射线，可穿透望远镜的结构材料，主要由 CsI 晶体探测。右侧虚线框是对 HE 主探测单个模块的放大图。顶部是 HE 准直器，中部是 NaI/CsI 复合晶体，底部是用于读出晶体发光的光电倍增管（PMT）。

3.2.3.1 定点或扫描观测

HE 主要观测方式是利用 HE 主探测器在 20-250 keV 能区对已知天体源进行定点观测，以及对感兴趣的天区进行扫描观测，发现新源或已知源的新暴发。该观测方式主要使用 HE 主探测器的 NaI 晶体的观测数据，而 CsI 晶体作为屏蔽和反符合使用，用来降低 NaI 的本底，从而提高 NaI 的定点或扫描观测灵敏度。图 3-7 和图 3-8 分别展示了 HE 主探测器单体的全能峰探测效率曲线和能量分辨率随能量的变化。

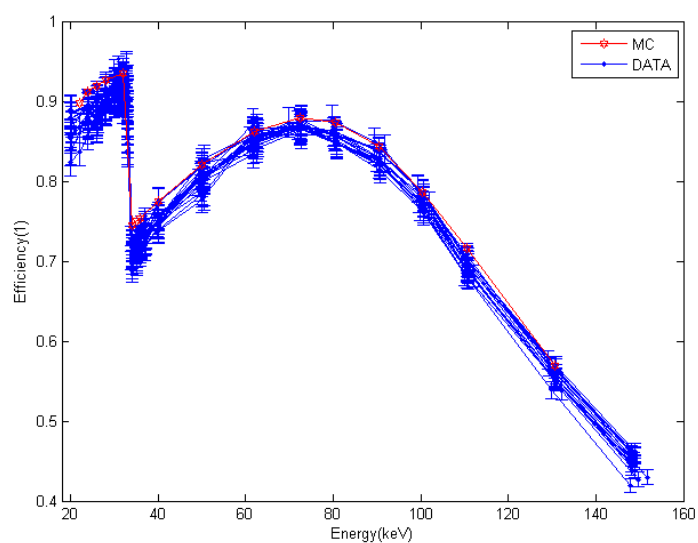


图 3-7 单个 HE 主探测器 NaI 的全能峰探测效率曲线。蓝色数据点是束线实验测量的结果，红色点是模拟结果（Liu et al. 2020）。

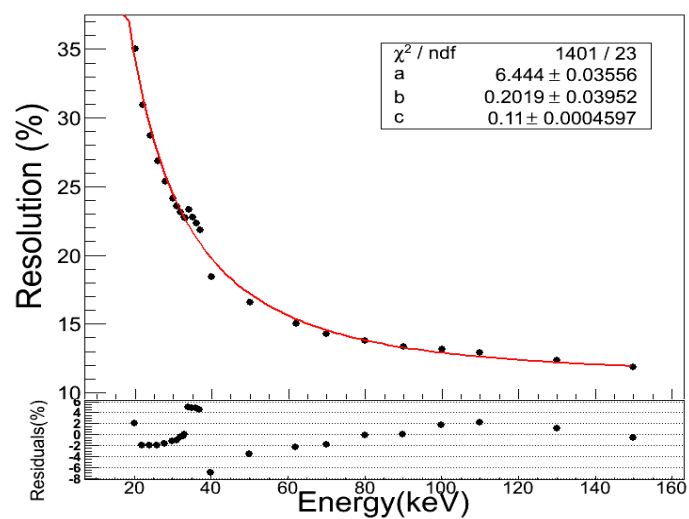


图 3-8 单个 HE 主探测器 NaI 的能量分辨率随能量的变化。数据点是标定束线得到的实验结果，红线是拟合结果。

3.2.3.2 伽马射线全天监测

除了使用 NaI 探测器对准直器视场内的天体源进行定点或扫描观测，HE 主探测器的 CsI 晶体还可探测穿透性的伽马射线光子。光子能量大于 100~200 keV 时，可穿透望远镜的结构材料，并发生复杂的相互作用，最终在主探测器的 CsI 晶体中产生能量沉积，从而被探测和记录。

为了扩大 CsI 对伽马暴的能谱测量范围，HE 主探测器可通过上传指令，从正常增益模式切换至低增益模式（旧称伽马暴模式，见 3.2.2 节）。因为低增益模式时 NaI 探测能力显著下降，该模式仅运行在特定的时间段，比如 NaI 的观测目标被地球遮挡时。

为了描述伽马射线入射慧眼卫星的方向，采用载荷坐标系，入射角度的定义为：从卫星指向天体源的方向矢量跟+Z 轴的夹角定义为 θ ，该方向矢量在 XY 平面的投影且跟+X 的夹角定义为 ϕ （见图 3-9）。

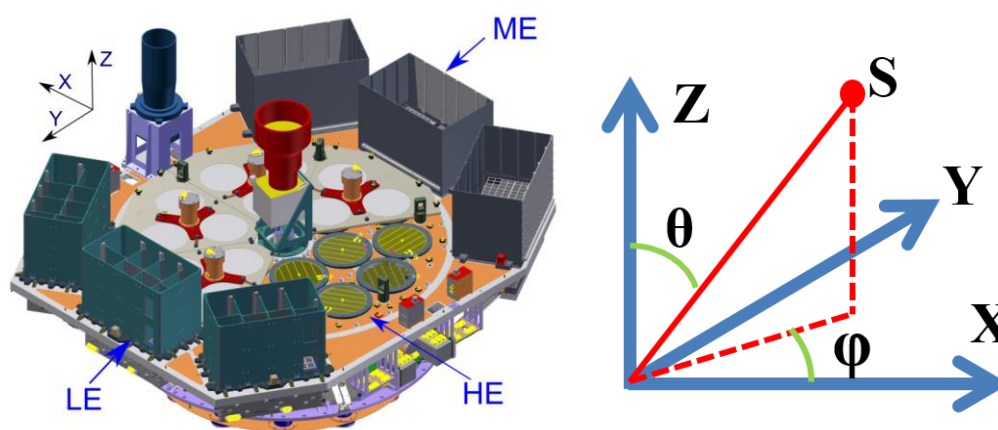


图 3-9 载荷坐标系与入射角定义。左：慧眼卫星载荷坐标系定义。卫星光轴为+Z 轴。请注意载荷坐标系跟卫星坐标系以及各个探测器自身定义的坐标有所区别。右：天体源入射角度定义。S 是天体源位置，XYZ 是载荷坐标系。

HE 主探测器包含 18 个 CsI 晶体探测器（编号分别为 HED-0，HED-1…，HED-17）。18 个探测器的总有效面积随伽马射线光子能量和入射方向的变化关系见图 3-10。因为有效面积主要跟 θ 角有关，跟 ϕ 角是弱相关，图中每个 θ 角的

有效面积是对方位角 ϕ 在 0-360 度取平均。慧眼卫星监测伽马射线的有效面积与其他探测器相比有较大优势（见图 3-11）。

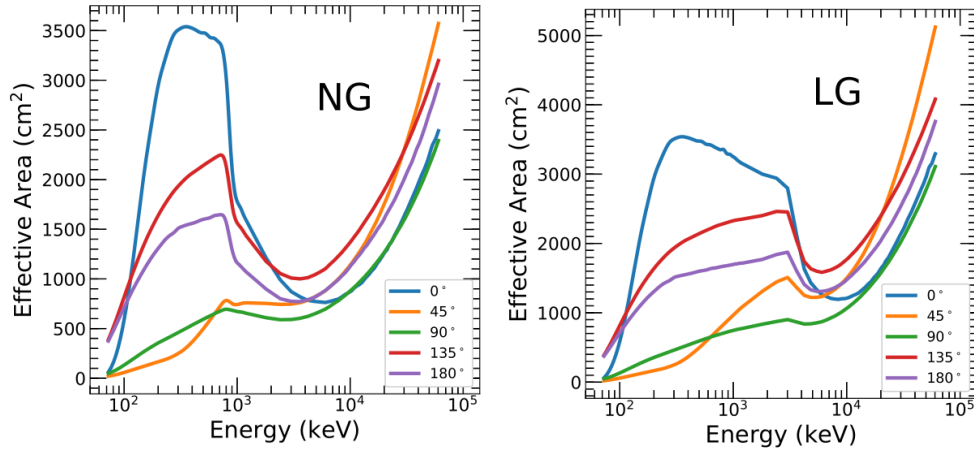


图 3-10 HE 望远镜 CsI 晶体探测器对伽马射线的有效面积，跟伽马射线能量和入射方向有关。

左和右图分别对应正常增益模式（NG）和低增益模式（LG）（增益模式见 3.2.3 节），每条曲线对应各个入射角度 θ 且对方位角 ϕ 求平均（Q Luo et al. 2020, submitted）。

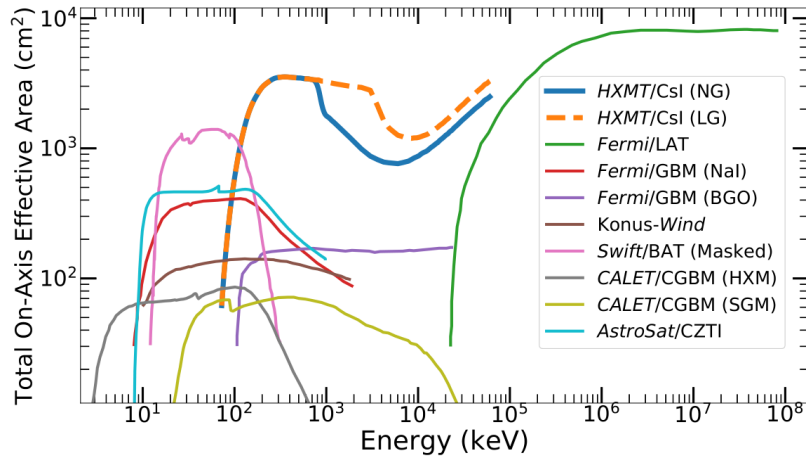


图 3-11 HE 望远镜 CsI 晶体探测伽马射线的有效面积跟其它在轨运行的伽马射线探测器的比较。（Q Luo et al. 2020, submitted）。

从有效面积随伽马射线入射方向的变化关系可见，CsI 可探测所有入射角度的伽马光子，因此监测伽马射线的视场为除了地球遮挡之外的全部天区，如图 3-12 所示。

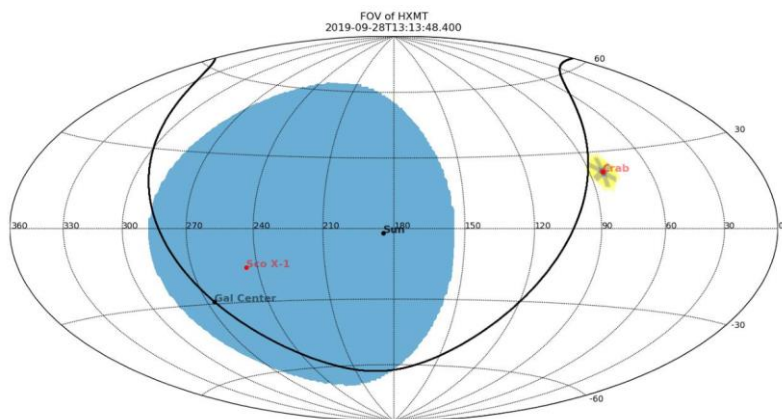


图 3-12 HE 望远镜 CsI 探测器监测伽马射线的视场示意图（以 2019-09-28T13:13:48.400 为例）。CsI 可监测除了地球遮挡（蓝色阴影）之外的所有天区。地球遮挡区随时间变化。黄色区域为 HE 准直器视场范围。

图 3-13 和图 3-14 分别展示了各个 CsI 探测器的能量分辨率以及能量响应矩阵（以 HED-0 为例）。由于增益模式会影响探测器的能量范围，因此能量分辨率和能量响应矩阵也受增益模式的影响。

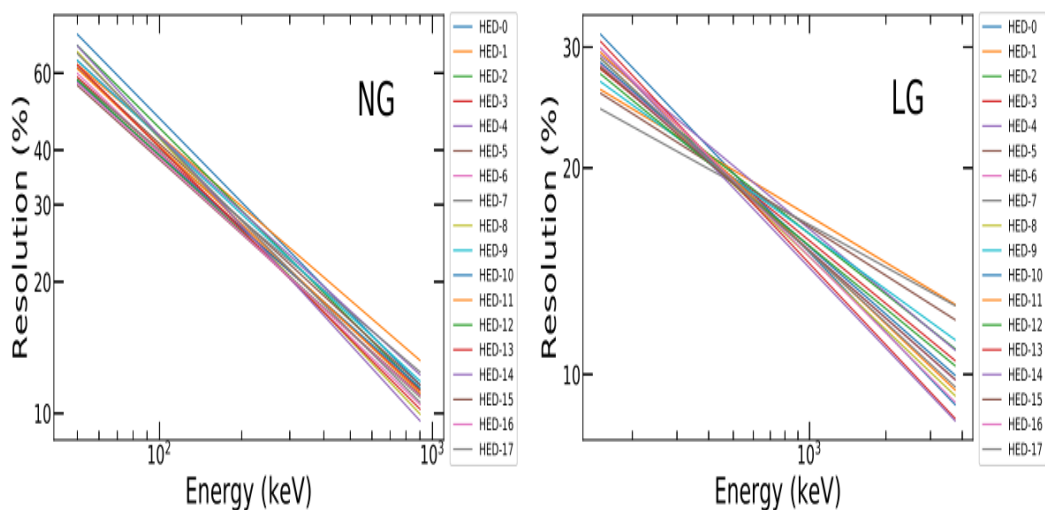


图 3-13 HE 望远镜 18 个 CsI 晶体探测器的能量分辨率。左图是正常增益模式，右图为低增益模式（Q Luo et al. 2020, submitted）。

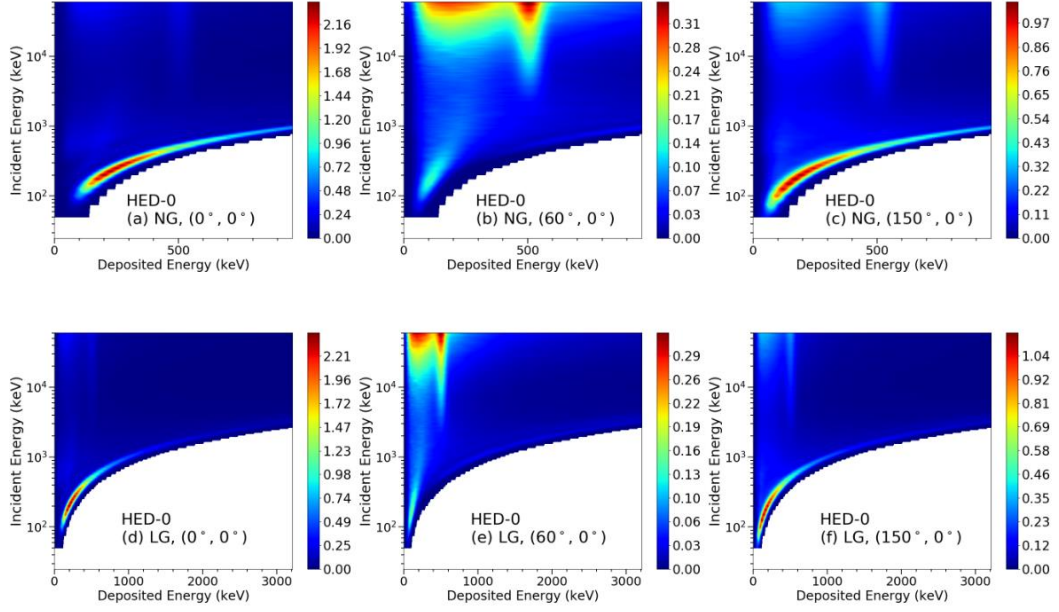


图 3-14 HE 望远镜 CsI 晶体探测器的能量响应矩阵。以编号为 HED-0 的 CsI 探测器为例，上下几幅图分别为正常增益模式和低增益模式下在三种入射角度 θ 时的响应矩阵，图中的角度分别是 (θ, φ) (Q Luo et al. 2020, submitted)。

在轨运行期间，没有伽马射线暴发时，18 个 CsI 探测器的总本底计数率主要在 5000-12000 counts/s 之间变化。本底变化主要受轨道空间环境的影响，因此，本底计数率跟卫星所处的轨道位置有关，也跟太阳活动、地磁活动强度有关。此外，探测器的不同增益模式也具有不同的本底计数率，其中，低增益模式的低本底计数率低于正常增益模式。

伽马暴探测能力（包括探测灵敏度、能谱测量精度等）主要取决于探测器记录到的来自伽马暴的总光子计数（简称源计数）以及暴发期间的总本底计数（简称本底计数）。由于探测器响应矩阵跟伽马暴入射方向有关，因此慧眼卫星 CsI 探测器对伽马暴的监测和探测能力跟伽马暴的入射方向、卫星所处的轨道位置、探测器的增益模式等有关。

慧眼卫星没有在轨触发功能，所有的伽马暴都来自于地面搜索，包括传统的盲搜 (blind search) 以及目标搜索 (targeted search)，后者因为采用先验信息以及更精细的搜索条件，对短弱伽马暴的探测能力更强。总体而言，慧眼卫星对伽马

暴瞬时辐射（0.2-3 MeV）的探测灵敏度可达 $\sim 8 \times 10^{-8} \text{ erg/cm}^2$ （10-1000 keV），见图 3-15。

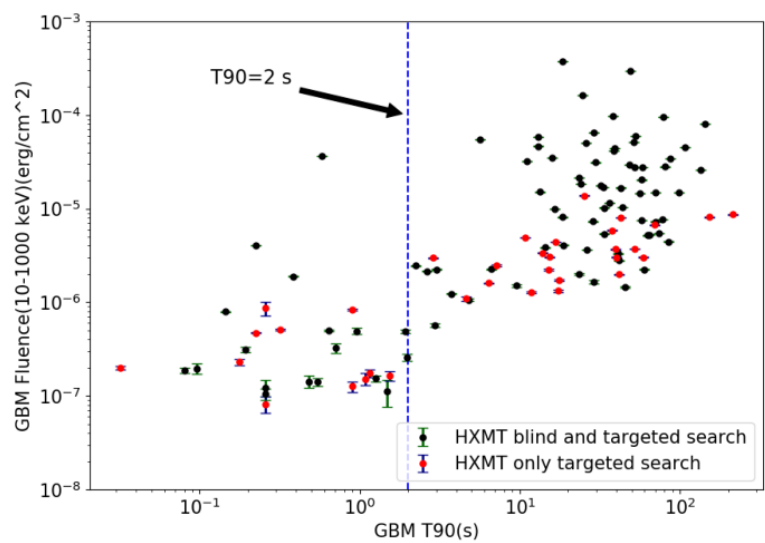


图 3-15 HE 望远镜 CsI 晶体探测到的伽马暴流强与持续时间（T90）的分布。目标搜索（targeted search）在探测短弱伽马暴时比盲搜（blind search）更有效。

由于慧眼卫星 CsI 探测器采用事例模式记录数据，也就是记录每个光子或粒子的到达时间和沉积能量，时间记录精度达到微秒，再加上 CsI 探测器面积大，接收光子数多，使慧眼卫星在研究伽马暴 MeV 辐射的精细时间结构（如图 3-16 所示）等方面具有优势。

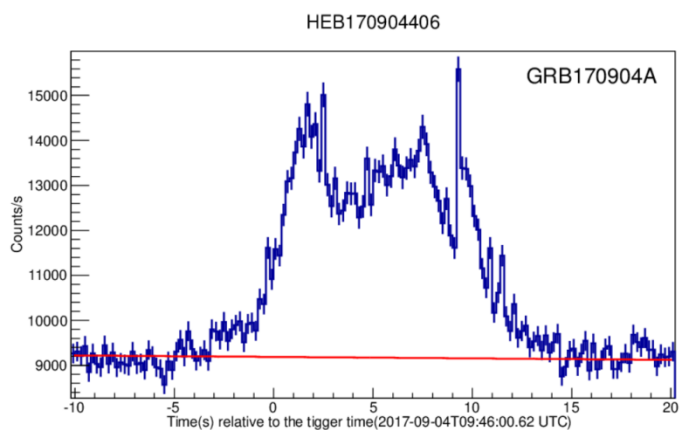


图 3-16 HE 望远镜 CsI 晶体探测到的伽马暴（GRB170904A）的光变曲线。因为探测器接收面积大，探测光子数多，可展示伽马暴在 MeV 能区的精细时变特征。

利用伽马射线全天监测能力，慧眼卫星 HE 望远镜的 CsI 探测器还能监测全天的 MeV 脉冲星。特别地，HE 望远镜还能探测来自太阳或地球方向的伽马射线，包括太阳耀斑和地球伽马闪（TGF）等。

根据现有研究，地球伽马闪产生于地球大气层中的闪电过程。慧眼卫星每年探测约 100 个 TGF。慧眼对典型 TGF 的观测情况如图 3-17 所示，慧眼卫星探测到 TGF 时星下点位置的分布如图 3-18 所示，绝大部分 TGF 都处于闪电高发区域。

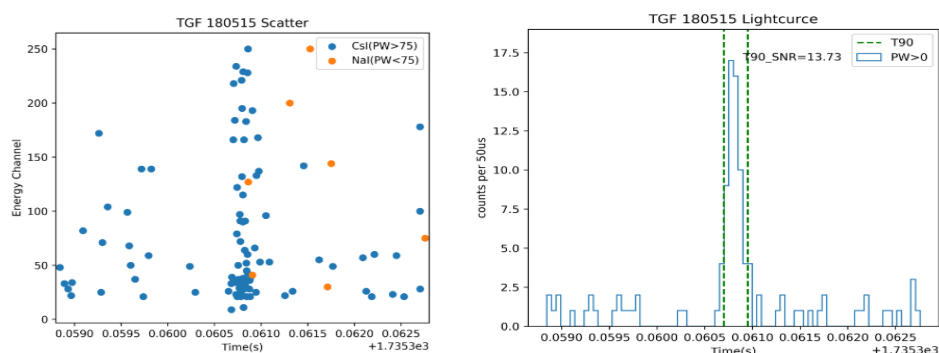


图 3-17 HE 望远镜对地球伽马闪（编号为 TGF180515）的探测情况。（左图）TGF 发生前后的事例数据散点图，蓝点为 CsI 事例，橙点为 NaI 事例。（右图）光变曲线，时间并道 50 μ s。

绿色虚线代表 T90 范围。

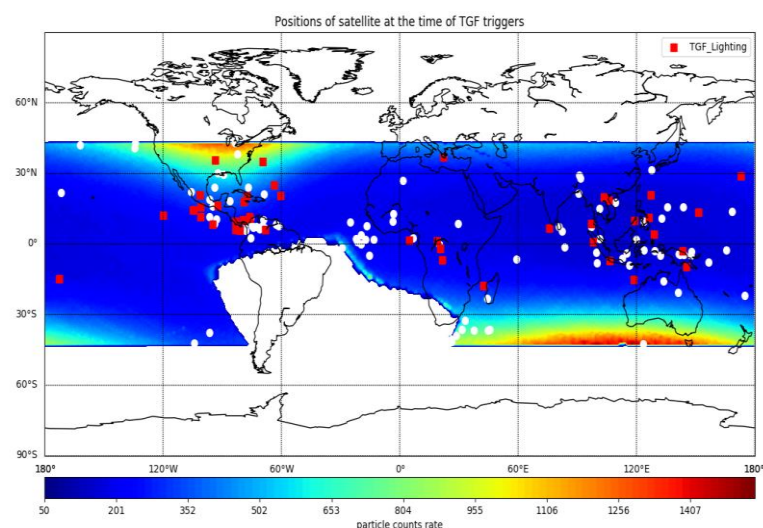


图 3-18 HE 望远镜探测到 TGF 时卫星星下点位置分布图。红色为具有闪电关联的 TGF，白色为没有发现闪电关联的 TGF。

3.3 中能 X 射线望远镜 (ME)

此处综述摘自 Cao et al. (2020)。ME 的科学任务是限定 X 射线源在中能段的 X 射线辐射性质，与 HE 和 LE 一起研究天体的多波段光变性质和宽波段 X 射线能谱。ME 工作能区覆盖 5-30 keV，总探测面积 952 cm²，具有 3 keV 左右的能量分辨率，主视场为 1° × 4° (FWHM)。

ME 包括三个探测器机箱 (MED1, MED2, MED3) 和一个电控箱 (MEB)。三个探测器机箱在卫星上的分布参见图 3-2 和图 3-3，它们安装在 HE 的一侧，探测器机箱的长边方向每每相差 60°。电控箱位于卫星载荷舱内。ME 探测器为 Si-PIN 阵列，分成 9 个可独立工作的探测单元，每 3 个探测单元组成 1 个探测器机箱。探测器上方安装准直器。每个探测单元包括 6 个探测模块，每个探测模块包括 32 路 Si-PIN 探测器。为了保持低的噪声水平和较高的能量分辨率，Si-PIN 探测器需要工作在低温下，在轨通过遮阳板遮住太阳光并通过辐射制冷板将探测器的工作温度控制在 -10℃ 以下。

图 3-19 是 ME 一个探测器机箱的结构示意图，包括辐射制冷板，准直器和探测器插件组件等主要部分。

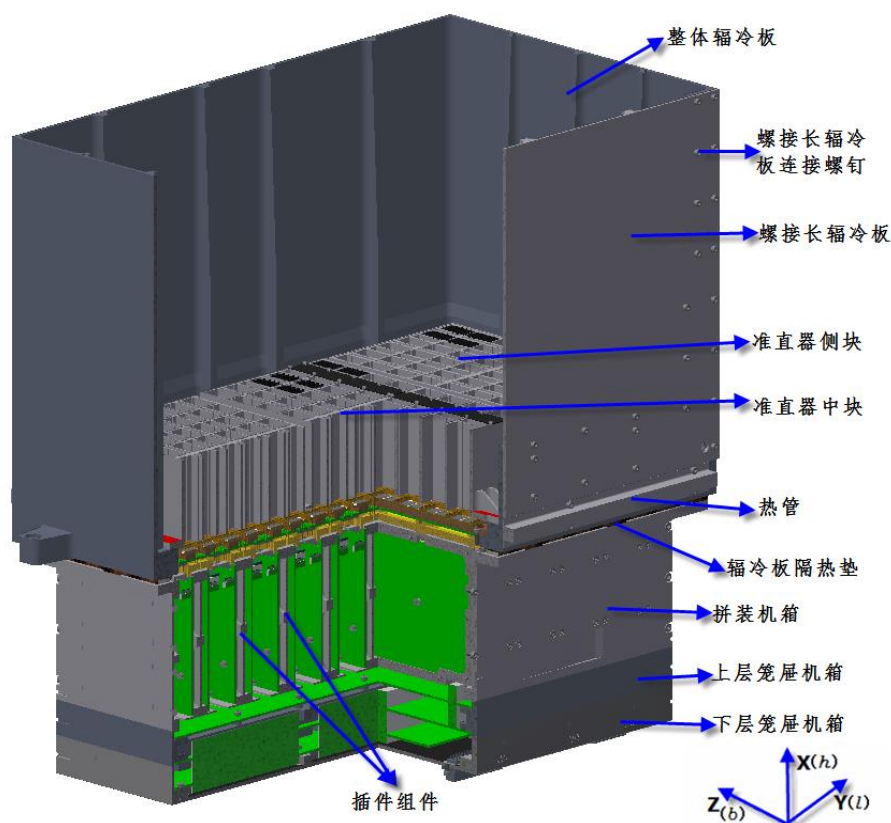


图 3-19 ME 探测器机箱结构示意图。

辐射制冷板通过热管与探测器组件接触，将探测器工作中产生的热量通过辐射散出，保证探测器的工作温度在 -40 到 -10°C 之间。探测器采用 1 mm 厚，像素尺寸 56 mm^2 的 Si-PIN 探测器。当 X 射线光子作用于探测器基体时，发生光电效应和康普顿效应，X 射线光子沉积全部或部分能量，产生电子空穴对，在内部漂移电场的作用下，运动到收集电极上，转化成电信号。在 -40 到 -10°C 的温度范围内，探测器能量分辨率（FWHM） $\leq 3\text{ keV}@20\text{ keV}$ 。

准直器的主要功能是限制望远镜的视场，ME 准直器采用大小视场组合模式。ME 总共有 54 个探测器模块，其中 45 个探测器模块被 $1^{\circ}\times 4^{\circ}$ 的准直器覆盖。小视场具有高的空间分辨率和低的背景源混淆，适合定点观测中的点源和小尺度弥散源观测，同时在巡天观测中，适合进行点源定位，及小尺度弥散源观测。6 个探测器模块被 $4^{\circ}\times 4^{\circ}$ 的大视场准直器覆盖，大视场具有较大的视场面积乘积，适合扫描观测中的弥漫背景确定，及对大尺度弥散源的观测。3 个探测器模块被全

遮挡准直器覆盖，主要用于测量泄露背景以及粒子背景。图 3-20 为 ME 准直器一个模块的照片。

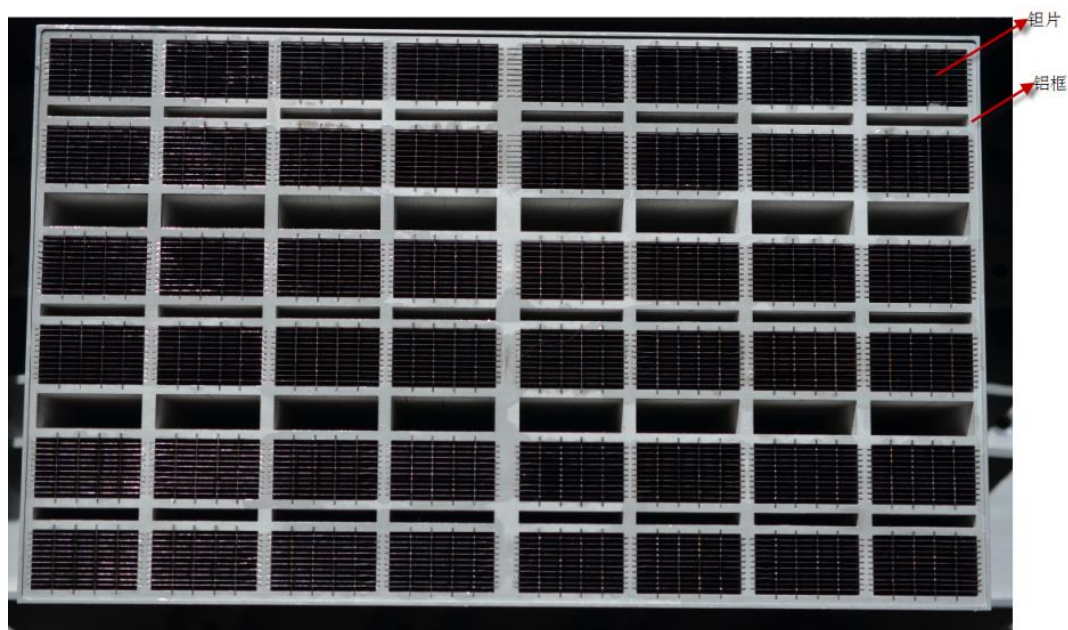


图 3-20 ME 准直器模块。

Si-PIN 探测器单个像素的面积与其耗尽电压时的结电容成正比，而结电容与电荷灵敏前置放大器的噪声成正比关系。所以，为了保证系统的能量分辨率，探测器面积不能太大。而由于卫星资源限制，单像素探测器面积不能太小，以免探测器读出电子学路数太多、过于复杂、系统功耗太高。因此，根据单路探测器的试验，探测器像素的尺寸设计值 $\sim 50 \text{ mm}^2$ ，最终实际设计像素尺寸： $12.5 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ (56.25 mm^2)。按照目前的像素设计，ME 共分为 54 个模块，每个模块 32 个探测器像素，由一片 VA32-TA6 芯片读出，总共 1728 路 Si-PIN 探测器像素，总面积 952 cm^2 。中能探测器的每个机箱各有一个准直器安装了放射源，用于在轨标定探测器的能量分辨、信号幅度等。根据 ME 探测器的探测能区（5-30 keV），在轨标定使用 ^{241}Am （镅 241）放射源，以 ^{241}Am 中 17.8 keV 能量为观测对象，控制探测器每秒计数为约 16 个，放射源活度为 $1 \mu\text{Ci}$ 。

中能 X 射线望远镜每个探测器机箱有 9 个相互独立的插件，每个插件上有两个可独立工作的模块，共安装有 16 个 Si-PIN 探测器封装，每个 Si-PIN 探测器

封装中包括 4 个 Si-PIN 像素，通过胶粘的方式固定于插件铜板。探测器外壳为陶瓷，上部为可伐合金框、蒙乃尔合金框和铍窗。图 3-21 为 ME 探测器一个插件的示意图。

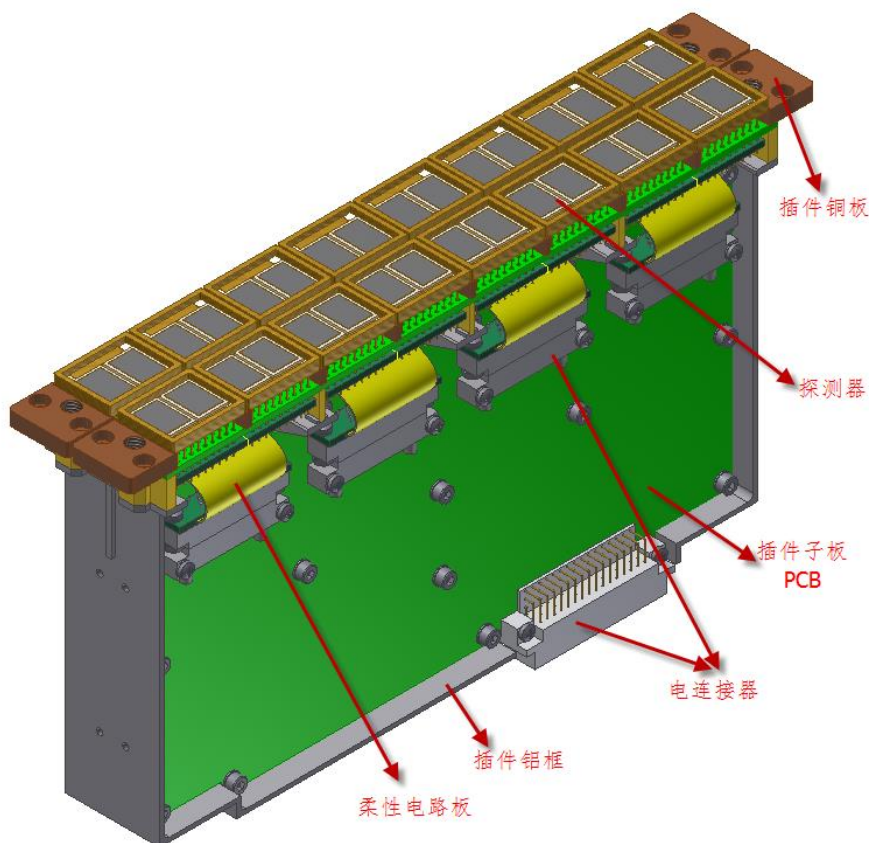


图 3-21 MED 插件组件结构。

图 3-22 是 ME 望远镜的探测效率曲线，其在 13 keV 以下探测效率的下降主要是由读出 ASIC 芯片触发阈值设置造成的；其对 Am-241 放射源的测量谱见图 3-23，能量分辨率约为 3 keV@17.8 keV。

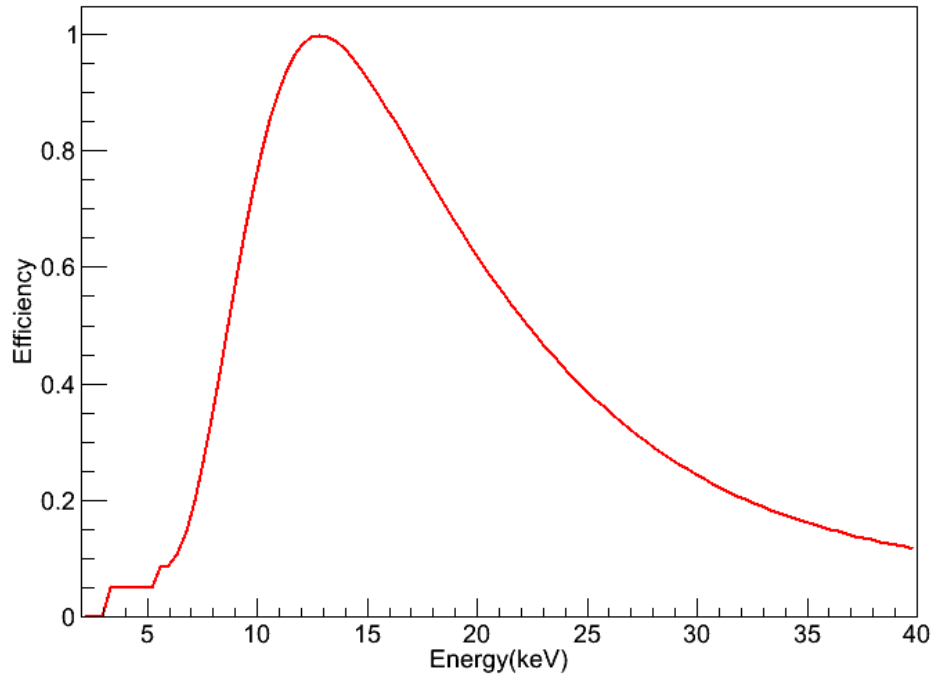


图 3-22 慧眼卫星/ME 的探测效率曲线。考虑到准直器的占空比，其最大有效面积约为 850 cm^2 。

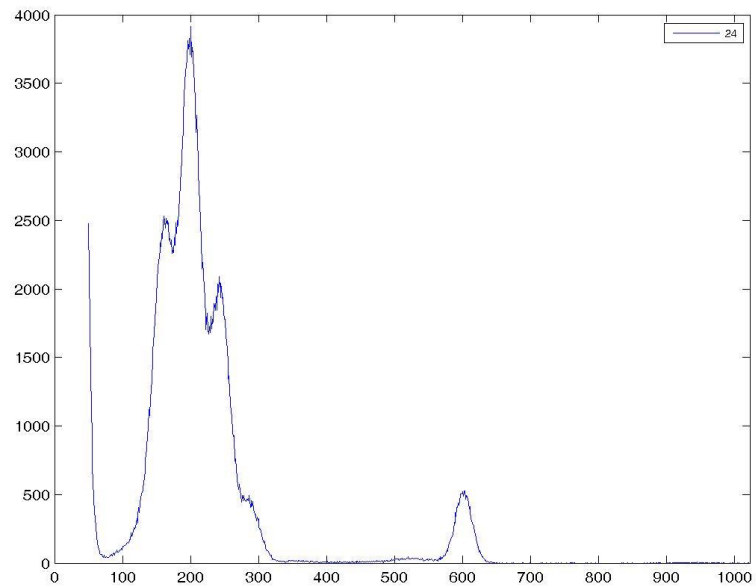


图 3-23 慧眼卫星/ME 测量 Am-241 的能谱。低能处的三个峰分别是 13.9、17.8 和 21 keV，高能处的峰位 59.5 keV。

3.4 低能 X 射线望远镜 (LE)

此处综述摘自 Chen et al (2020)。LE 的主要科学任务是在扫描和定点观测中完成 1-15 keV 之间高能谱分辨 ($150\text{ eV}@5.9\text{ keV}$)、高时间分辨率 (1 ms) 的观测。LE 包括 3 个可独立工作的探测器组件, 并由一个电控箱控制。每个组件包括 8 个探测器模块, 每个探测模块包含 4 片 CCD236, 一个组件的探测面积为 128 cm^2 , 总面积为 384 cm^2 , 探测器示意图见图 3-23。

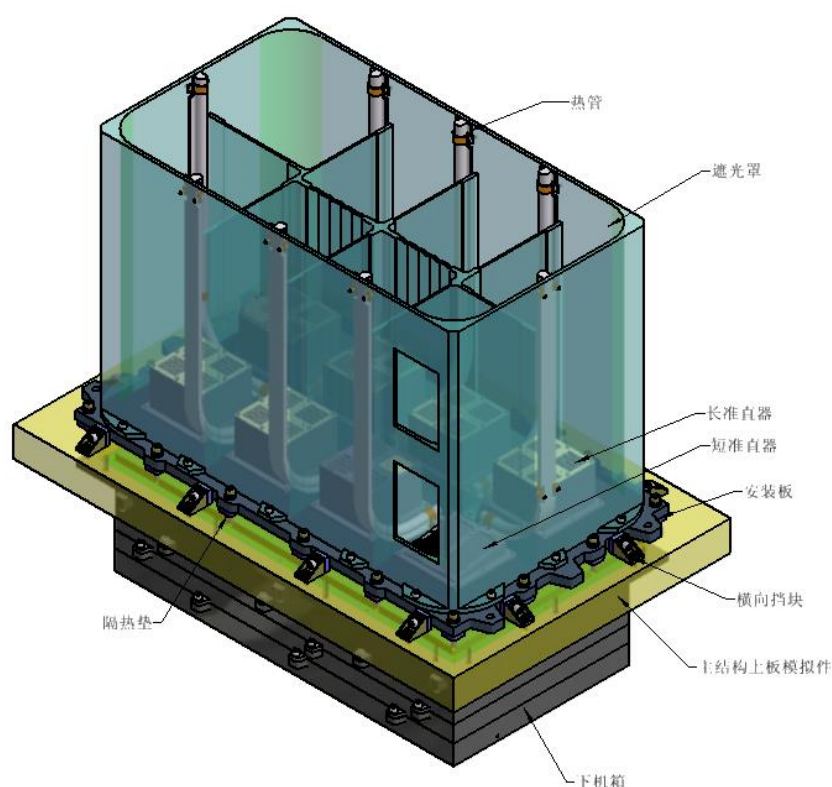


图 3-24 LE 一个探测器机箱结构示意图。上部灰色部分为准直器, 半透明部分所示为遮光罩。

在每个低能探测器上机箱上共安装 8 个准直器, 包括 7 个长准直器和 1 个短准直器。每个长准直器包含 4 个准直单元, 短准直器包含 2 个准直单元, 共 30 个准直单元。每个长准直器的高度为 53.5 mm , 包含 3 个 ($1.6^\circ \times 6.0^\circ$) 单元和 1 个 ($4.0^\circ \times 6.0^\circ$) 单元。每个低能探测器单机各有 2 个长准直器单元被全遮挡, 其中一个为 ($1.6^\circ \times 6.0^\circ$) 单元, 另一个为 ($4.0^\circ \times 6.0^\circ$) 单元; 每个短准直器最高处为 27.5 mm , 包含 2 个视场为 $50\sim 60^\circ \times 2\sim 6^\circ$ 的单元。

总结以上设计方案，按照视场单元分类，低能准直器 3 个组件视场的总体设计为：（ $1.6^{\circ} \times 6.0^{\circ}$ ）视场 60 个，（ $4.0^{\circ} \times 6.0^{\circ}$ ）视场 18 个，全遮挡 6 个，全天监视器视场（ $50^{\circ} \sim 60^{\circ} \times 2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ ）6 个。在一个机箱中，不同类型准直器各单元的具体位置见图 3-25。

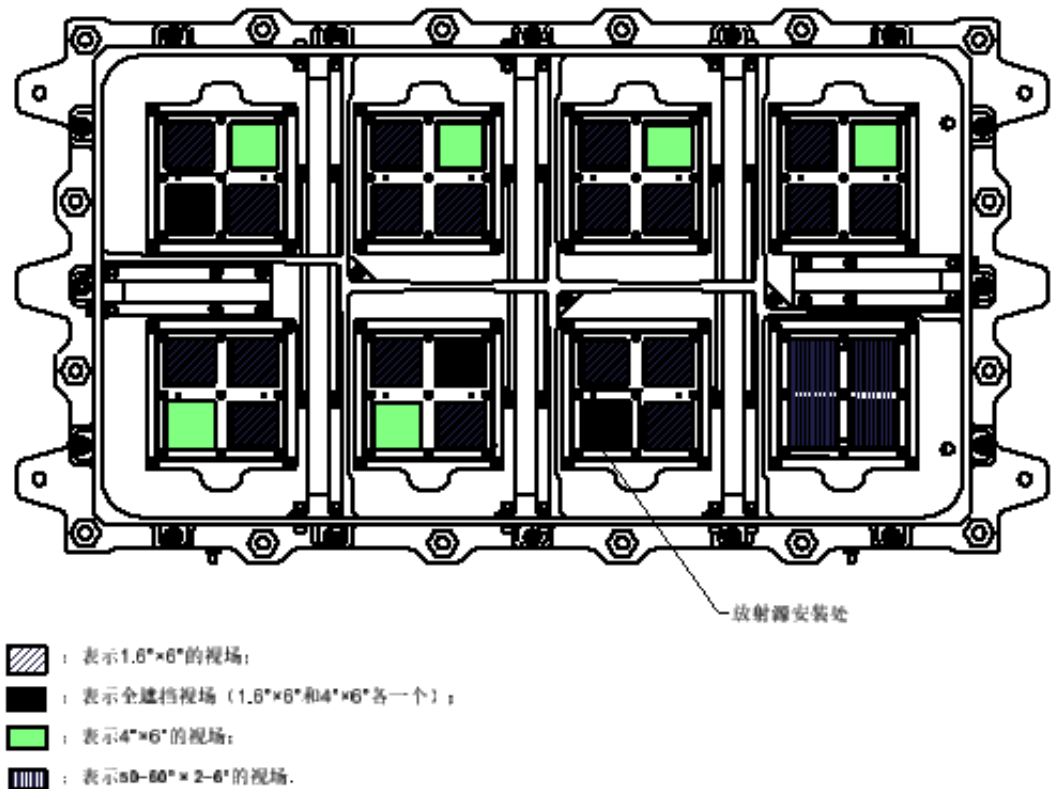


图 3-25 LE 准直器视场布局图。

LE 准直器采用整体线切割工艺制造，下层法兰与安装板连接，准直器顶部安装用镍网加固的遮光膜，顶部异形结构用以透气，以防卫星在发射过程中所产生的气流冲破遮光膜。为了防止多余物落到 CCD 表面上造成 CCD 工作异常，准直器的下方还安装了防尘膜。准直器垂直面四周外侧粘接一层 0.2 mm 的钽片，以降低空间 γ 射线和带电粒子的背景，钽片采用胶粘加螺钉固定。图 3-26 为长准直器、遮光膜和防尘膜结构示意图。

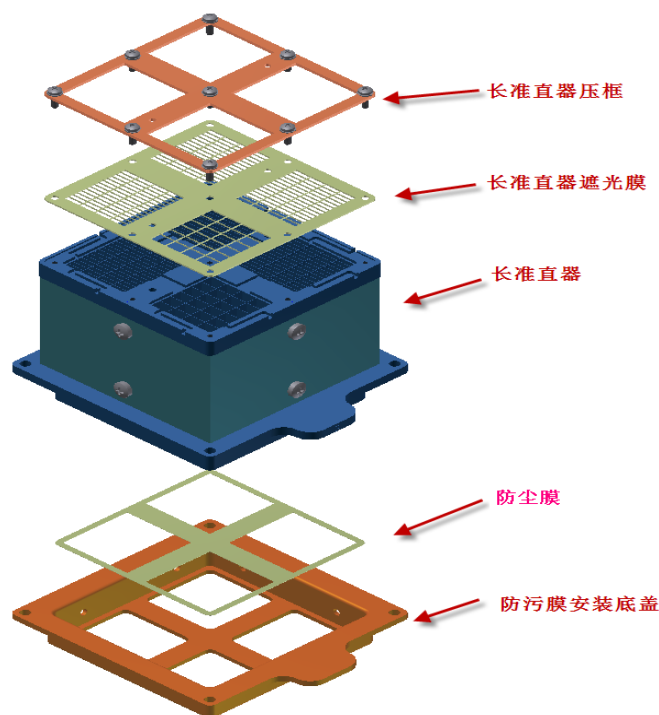


图 3-26 LE 长准直器、遮光膜、防尘膜结构图。

短准直器结构（见图 3-27）具有横向锥形加强筋，锥度为 15° ，加强筋底面宽为 8 mm，高度约为 18 mm，但是由于中间加强筋的存在，使部分入射光被遮挡，从而使准直器视场比理论计算的（ $50^\circ\sim 60^\circ\times 2\sim 6^\circ$ ）要小，为弥补部分被遮挡的光线，短准直器上表面加工成斜面。短准直器高度最高处 27.5 mm，最低处约 16 mm。短准直器的主要作用是形成大的视场，在扫描观测中可以实现对大天区内亮源的监测。短准直器同样配备了遮光膜和防尘膜。

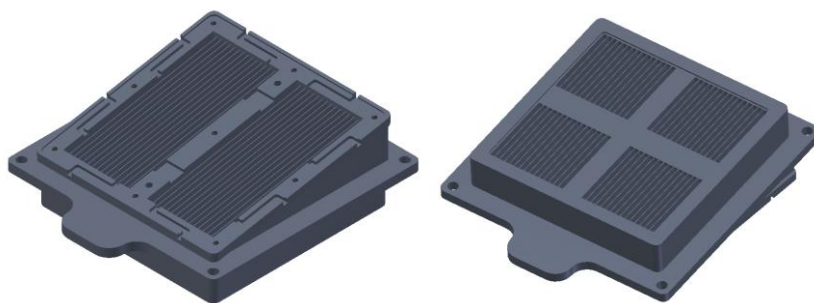


图 3-27 LE 短准直器正面和背面结构图。

软 X 射线遮光膜的主要功能是使空间环境中的软 X 射线透过，并去除空间中的可见光和紫外线信号对 LE 探测器的影响，降低 LE 探测数据的噪声。为了满足卫星升空时的振动以及噪声环境要求，需要在软 X 射线透过率尽量高的前提下，提高遮光膜的力学性能，并尽可能提高遮光膜的抗辐照能力。根据这一需求，遮光膜设计为“铝/聚酰亚胺/镍网”三层结构。其中，铝膜厚度大约在 200 nm 左右，用于阻挡可见光；聚酰亚胺膜厚度在 400 nm 左右，主要作用是加强软 X 射线遮光膜的力学性能；镍网的主要作用是对整个遮光膜起支撑固定作用。

LE 选用扫式电荷器件（Swept Charge Device，简称 SCD）作为探测器。SCD 是一种特殊的 CCD 器件，它工作时可舍弃入射 X 射线光子的位置信息，以较快的速度读出，时间分辨率可以达到 1 ms。SCD 暗电流较小，读出电容小，噪声也相应较低，所以 SCD 既有较好的能量分辨和时间分辨，同时探测能段低端可扩展至 1 keV。CCD236 是我们和英国 e2v 公司专门为 LE 项目联合研制的 SCD 型探测器（见图 3-28），每片探测器的面积可达 4 cm²，它采用空实双输出以减小共模噪声。CCD236 器件内部有很多小电极，当低能（1-15 keV）X 射线光子入射到 CCD236 探测器时，会产生电子空穴对，其中电子会聚集在电极附近。产生电子的数量正比于入射光子的能量，当电极加特定驱动时钟时，电荷会逐电极转移至输出端，并通过内置电荷灵敏前置放大器转换成电压信号输出。

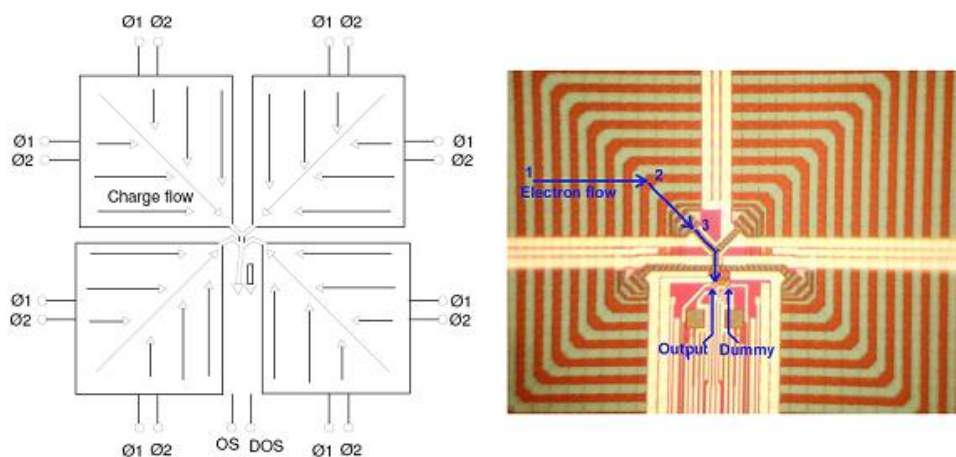


图 3-28 CCD236 的结构示意图和读出部分（位于探测器中心）。

SCD 在空间运行时会因带电粒子的辐射损伤而致暗电流增大。为了在 4 年寿命的末期仍能具有较低的噪声水平，SCD 需要工作在 $-80^{\circ}\text{C}\sim-30^{\circ}\text{C}$ 的低温状态。实现 SCD 低温工作环境的措施是将探测器和电子学部分隔热，同时通过热管将探测器产生的热量传送到遮光罩，再辐射到宇宙空间。辐照实验表明，由于带电粒子的辐照，LE 的能量分辨率将从上天时的 $140\text{ eV}@5.9\text{ keV}@-50^{\circ}\text{C}$ 的水平下降到约 $220\text{ eV}@5.9\text{ keV}@-50^{\circ}\text{C}$ 。LE 的探测效率见图 3-29，能量分辨率随温度的变化见图 3-30。

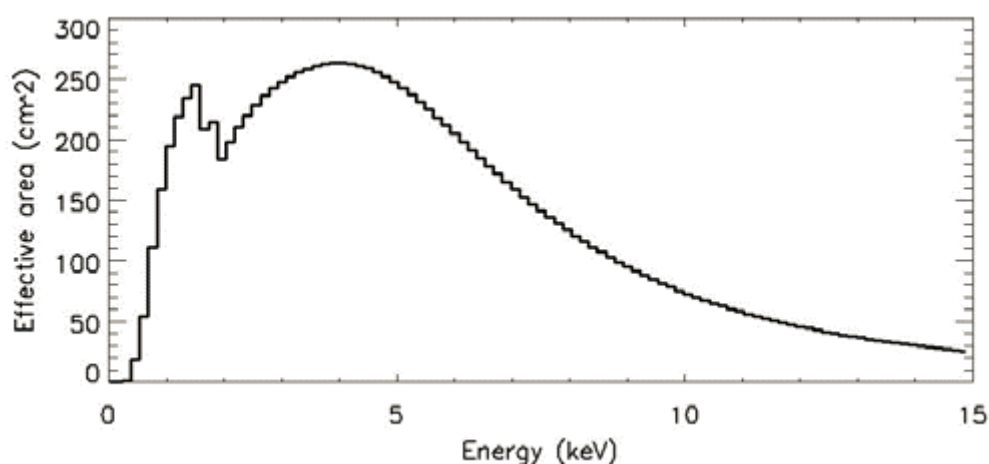


图 3-29 慧眼卫星/LE 的探测效率曲线，横轴单位为 keV (Li X.B. et al. 2020)。

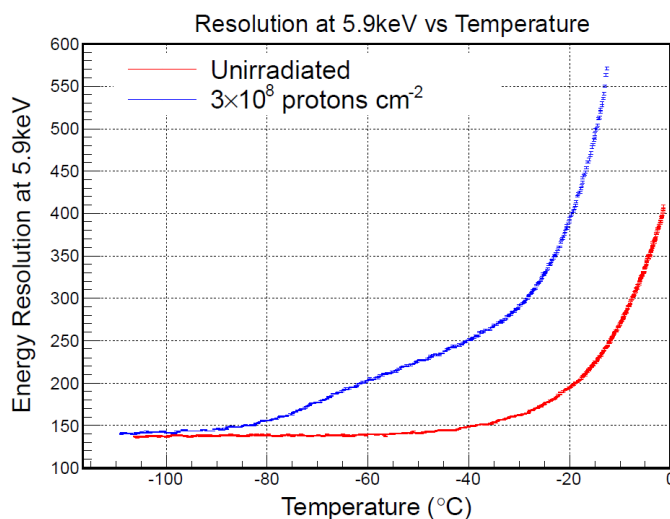


图 3-30 慧眼卫星/LE 能量分辨率随温度的变化。

红色曲线为未受辐照之前的测试结果，蓝色曲线为按照在轨四年剂量进行质子辐照之后的测试

结果。

3.5 空间环境监测器（SEM）

此处描述摘自 Zhang et al (2020a)。SEM 的任务目标是提供在轨空间带电粒子环境信息，为慧眼卫星在轨本底的估计提供监测数据，同时为保障主载荷和卫星在轨运行安全提供数据。SEM 的探测对象为高能质子和高能电子，可以获得任意时刻质子能谱、电子能谱、质子方向分布和电子的方向分布等信息。

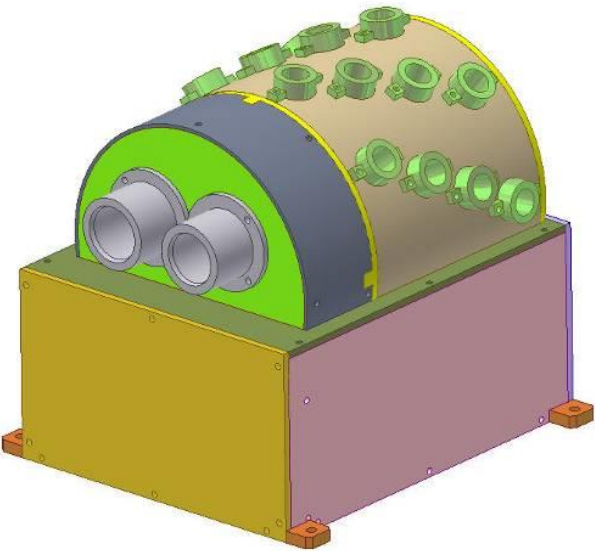


图 3-31 SEM 结构示意图。

SEM 由传感器、电子线路及机械结构组成，单机外形结构如图 3-31 所示。其中传感器包括 16 个粒子方向探头、1 个电子和 1 个质子能谱探头。探测器通过以上各种传感器，配合仪器的电子学部分，完成了 180° 的粒子方向通量测量、高能电子和质子的能谱测量。SEM 主要参数见表 3-4。

表 3-4 SEM 的主要参数

	粒子方向探头	电子能谱探头	质子能谱探头
数量	16	1	1

视场 (FWHM)	180°×15°	30°	40°
观测能区 (FWHM)	≥200 keV (电子) 1.5-200 MeV (质子)	0.4-1.5 MeV (6 能道) >1.5 MeV (1 能道)	3-150 MeV (6 能道) >150 MeV (1 能道)
时间分辨率	1 秒		

3.6 望远镜主要技术指标

慧眼卫星科学载荷的主要技术指标见表 3-5，三个载荷的有效面积见图 3-32，本底和灵敏度见图 3-33、图 3-34 和图 3-35。

表 3-5 慧眼卫星望远镜的主要技术指标

有效载荷	HE 望远镜	ME 望远镜	LE 望远镜
探测器	NaI(CsI)	Si-PIN	SCD
探测器总面积 (cm ²)	~5100	952	384
观测能区 (keV)	正常增益模式： 20-250 (NaI) 40-600 (CsI) 低增益模式： 100-1250 (NaI)	8-35	1-12

视场 (FWHM)	1.1°×5.7° (16个, 其中1个全遮挡) 5.7°×5.7° (2个)	3个探测器机箱, 每个探测器机箱含 1°×4° (16个, 其中1个全遮挡) 和 4°×4° (2个)	3个探测器机箱, 每个探测器机箱含 1.6°×6° (21个, 其中1个全遮挡)、4°×6° (7个, 其中1个全遮挡) 和 50-60°×2-6° (2个)
能量分辨率 (FWHM)	~19%@60 keV	15%@20 keV	2.5%@6 keV
点源定位精度 (20 σ)	1' (1 σ)		
时间分辨率	4 μ s	240 μ s	1 ms

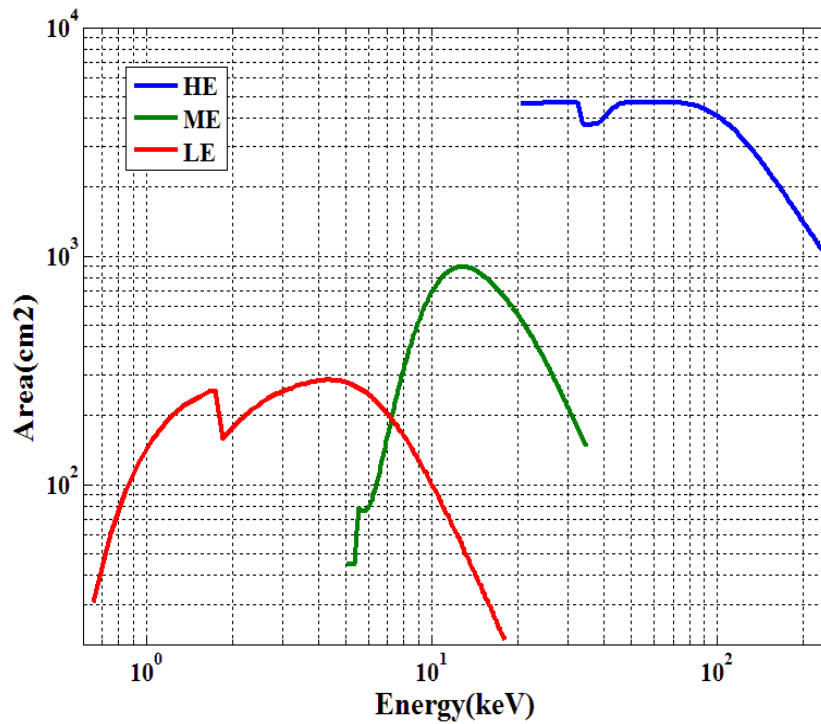


图 3-32 慧眼卫星三个载荷的有效面积 (Zhang S.N. et al. 2020)。

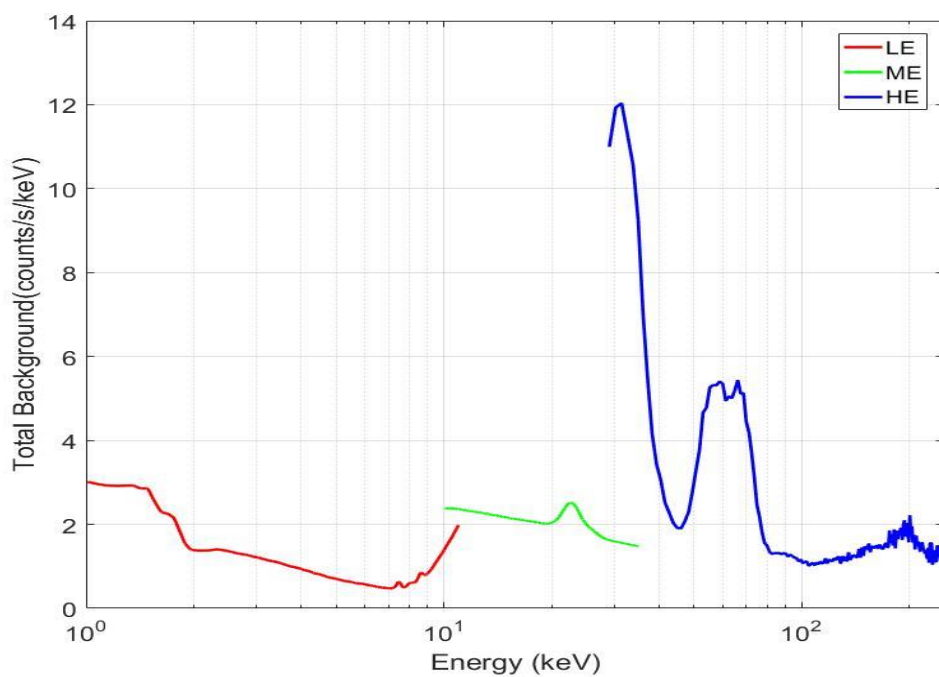


图 3-33 慧眼卫星三个载荷的本底水平。

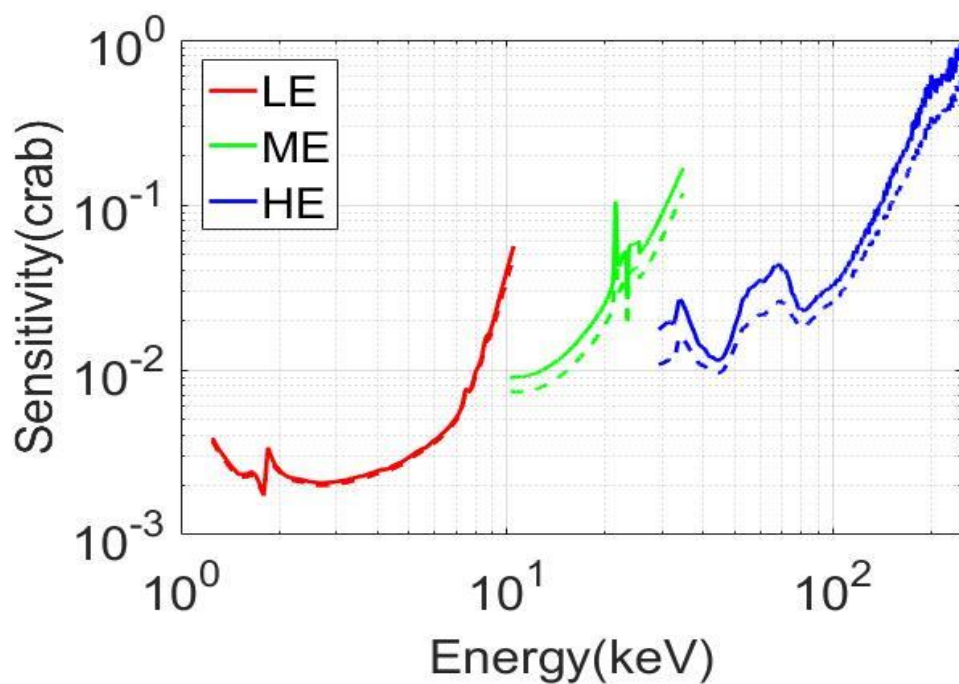


图 3-34 慧眼卫星三个载荷的点源观测灵敏度（100 秒， 3σ ）。其中虚线是只考虑统计涨落的结果，实线加入了本底估计的系统误差（HE、ME 和 LE 的本底估计系统误差分别是 1%，2%，2%）。

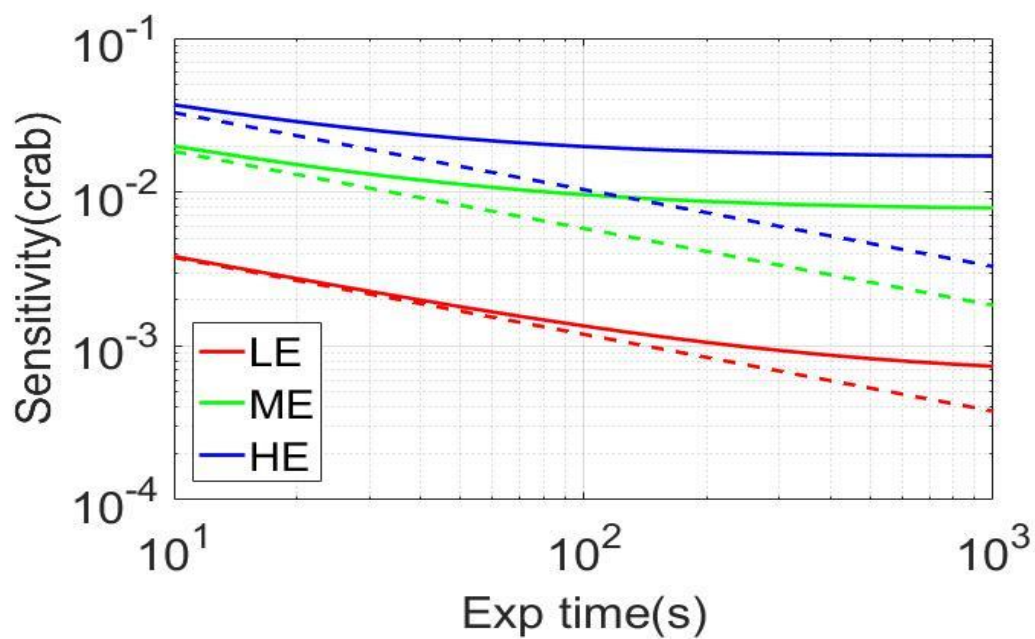


图 3-35 慧眼卫星三个载荷的点源观测灵敏度随时间的演化 (3σ)。其中 LE: 1-6 keV, ME: 10-20 keV, HE: 30-100 keV。虚线是只考虑统计涨落的结果, 实线加入了本底估计的系统的误差 (HE、ME 和 LE 的本底估计系统误差分别是 1%, 2%, 2%)。

4 核心科学方向

4.1 概述

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。

慧眼卫星具备非常宽的波段 (1-250 keV), 该能区设置使得慧眼卫星可以同时兼顾 X 射线双星的软辐射和硬辐射成分。在硬 X 射线能区 (20-250 keV), 慧眼卫星在所有窄视场空间望远镜中拥有最大的探测面积, 使其在观测 X 射线双星爆发演化的低硬态时具备优势。在软 X 射线能区, 慧眼卫星可低至~1 keV, 且具有较好的能量分辨和时间分辨, 可以避免观测亮源时探测器饱和 (光子堆积) 的问题, 在软 X 射线波段观测亮源以及爆发源高软态等方面具有显著优势。

因此, 慧眼卫星将首次在 1-250 keV 对亮源和爆发源获得宽波段、高统计量的观测样本, 系统性地研究 X 射线双星爆发演化的低硬态和高软态等各个能谱态, 理解黑洞的基本性质, 研究视界附近吸积盘的行为并测量黑洞的自转, 理解中子星的基本性质, 研究磁球的性质并测量中子星表面磁场强度。更多关于慧眼的观测任务和最近进展详阅 Zhang et al. (2020)。

4.2 科学研究的主要内容

4.2.1 银道面扫描巡天和监测

4.2.1.1 科学目标

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, 形成国际多波段、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，并做后随观测证认和研究，理解高能天体源的多样性。

根据 INTEGRAL 和 *Swift* 巡天结果，银河系内硬 X 射线辐射天体多数是变源，并且以 X 射线双星为主导：INTEGRAL 的 ISGRI 截止到 2010 年 12 月发布的源表 (Bird et al. 2016) 公布了 939 个源，其中 39% 为活动星系核，32% 为 X 射线双星，包括 129 个大质量 X 射线双星 (HMXB)，116 个低质量 X 射线双星 (LMXB) 和 56 个灾变源。*Swift*/BAT 硬 X 射线巡天 70 个月的结果表明 (Baumgartner et al. 2013)，在 2004 年 12 月至 2010 年 9 月期间，BAT 在硬 X 射线波段 (14-195 keV) 共探测到了 1171 个源 (4.8σ)，包括活动星系核约 711 个 (其中遮蔽型活动星系核约 261 个) 以及河内源 281 个，其中 X 射线双星约 186 个。ISGRI 相比于 BAT 来说，虽然探测器面积偏小 (ISGRI 面积 1000 cm^2 ，BAT 面积 5243 cm^2)，但是具有相对较小的视场 (50% 编码) (ISGRI 为 361 平方度，BAT 为 3800 平方度)，因此，前者具有更好的灵敏度，主要开展银道面巡天。

慧眼卫星在 X 射线波段具有大面积和窄视场的特点，非常有利于开展银道面扫描观测。结合低能望远镜 (LE)，中能望远镜 (ME) 以及高能望远镜 (HE)，可以实现在 1-250keV 的宽能段覆盖，达到 $\sim 3\text{mCrab}$ 的单次扫描灵敏度，并且可以在扫描亮源时基本规避探测器饱和 (光子堆积) 的问题，同时兼具较高的能量分辨率。

现有的硬 X 射线探测器通过银道扫描已经发现了新类型的硬 X 射线辐射源，例如 INTEGRAL 发现了反常 X 射线脉冲星和磁中子星爆发。因此，发现新类型的硬 X 射线辐射源或新类型的爆发活动也将是慧眼卫星的主要科学目标之一。新类型的源或爆发现象可能包括：

(1) X 射线双星在较短时间尺度上可能存在较弱的硬 X 射线辐射，而这些信号之前的硬 X 射线探测器由于灵敏度低探测不到。

(2) 可能有硬 X 射线天体在多数情况下吸积率增加并不能达到正常的爆发，或者甚至达不到失败的爆发对应的吸积率。它们通过冕区提升软 X 射线流量的

方式产生的硬 X 射线信号可能比较弱，时标相对较短，吸积积累的物质在短时标得以释放能量，不足以产生大的 X 射线爆发现象。

由于目前的硬 X 射线探测器视场大、本底高、灵敏度较低，这些源还未被探测到，对它们的探测和研究将成为慧眼卫星银道面扫描观测的重要科学目标。

4.2.1.2 观测策略

银道面扫描主要采用分块扫描观测的模式来实现，即将银道面分成若干个半径为 10 度大小的天区，逐块进行扫描观测。在慧眼卫星运行之初，整个银道面（包括核球）被划分为 22 个半径 10 度的天区，而在慧眼卫星上一阶段运行中，对银道面扫描策略进行了调整，整个银道面（包括核球）被重新划分为 50 个半径 7 度的天区（表 4-1）。考虑到卫星指向和太阳之间的夹角必须大于 70 度，每块天区每年的可见时间大约为半年左右。50 个天区的可见性及可见效率如图 4-1 所示。在制定扫描计划时，将优先安排观测效率高的天区。

表 4-1 慧眼卫星银道扫描天区的划分

编号	银经	银纬	可见时间段（mm-dd）	nH（ 10^{22} cm^{-2} ）
GalP01	0	0	03-12~09-27	0.787
GalP02	20	0	03-22~10-07	0.992
GalP03	40	0	04-02~10-20	1.16
GalP04	60	0	04-17~11-06	0.94
GalP05	80	0	05-10~12-04	1.15
GalP06	100	0	06-17~01-10	0.805

GalP07	120	0	07-25~02-11	0.743
GalP08	140	0	08-19~03-02	0.845
GalP09	160	0	09-03~03-14	0.65
GalP10	180	0	09-15~03-25	0.624
GalP11	-160	0	09-25~04-04	0.597
GalP12	-140	0	10-06~04-16	0.66
GalP13	-120	0	10-20~05-04	0.617
GalP14	-100	0	11-12~06-02	0.932
GalP15	-80	0	12-18~07-13	1.01
GalP16	-60	0	01-23~08-15	1.11
GalP17	-40	0	02-15~09-04	1.16
GalP18	-20	0	03-01~09-17	1.2
GalP19	10	0	03-17~10-02	0.89
GalP20	-10	0	03-06~09-22	0.994
GalP21	30	0	03-27~10-12	1.076
GalP22	-30	0	02-22~09-10	1.18

GalP23	50	0	04-09~10-28	1.05
GalP24	-50	0	02-04~08-24	1.14
GalP25	70	0	04-28~11-20	1.05
GalP26	-70	0	01-05~07-29	1.06
GalP27	90	0	05-28~12-21	0.98
GalP28	-90	0	12-01~06-22	0.97
GalP29	110	0	07-06~01-25	0.77
GalP30	-110	0	11-01~05-18	0.77
GalP31	130	0	08-07~02-21	0.79
GalP32	-130	0	10-13~04-25	0.64
GalP33	150	0	08-26~03-08	0.75
GalP34	-150	0	09-30~04-10	0.63
GalP35	170	0	09-09~03-30	0.64
GalP36	-170	0	09-20~03-29	0.61
GalP37	-30	5.2	02-22~09-10	1.18
GalP38	-30	-5.2	02-22~09-10	1.18

GalP39	-20	5.2	03-01~09-17	1.2
GalP40	-20	-5.2	03-01~09-17	1.2
GalP41	-10	5.2	03-06~09-22	0.99
GalP42	-10	-5.2	03-06~09-22	0.99
GalP43	0	5.2	03-12~09-27	0.787
GalP44	0	-5.2	03-12~09-27	0.787
GalP45	10	5.2	03-17~10-02	0.89
GalP46	10	-5.2	03-17~10-02	0.89
GalP47	20	5.2	03-22~10-07	0.992
GalP48	20	-5.2	03-22~10-07	0.992
GalP49	30	5.2	03-27~10-12	1.08
GalP50	30	-5.2	03-27~10-12	1.08



图 4-1 50 个天区的可见性及可见效率。

慧眼卫星的扫描观测模式，主要参数为扫描区域半径，扫描轨迹间隔，以及扫描速度。其中，扫描区域半径通常为 7° 和 10° ；扫描轨迹间隔有三挡，分别为 0.1° 、 0.4° 、 0.8° ；扫描速度有三档，分别为 $0.01^\circ/\text{s}$ 、 $0.03^\circ/\text{s}$ 、 $0.06^\circ/\text{s}$ 。针对不同的科学目标，可以选择不同的参数组合。

4.2.1.3 巡天结果

截至 2021 年 1 月 20 日，慧眼卫星已对银道面进行了 2010 次小天区扫描观测，实现了对银道面的全部覆盖（图 4-2）。每次小天区扫描的数据经过数据分析

软件处理后会生成该天区的天图，从中可以获取源的流强和位置信息。同时利用直接解调成像技术，得到扫描区域的天图，直观展示扫描结果（Guan et al. 2020）。图 4-3 展示了一次小天区扫描数据的处理结果，其中左图为重建的天图，右图为对光变曲线的 PSF 模型拟合。将多次小天区扫描的结果联立起来，就可以实现对天体源的流量监测。

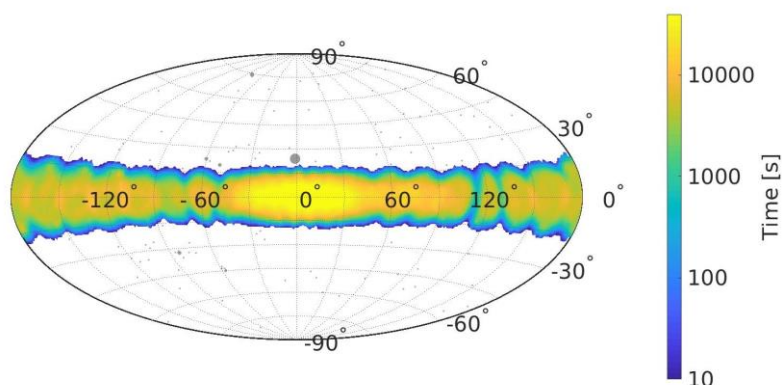


图 4-2 慧眼卫星对银道面扫描观测的曝光图（Sai et al. 2020）。

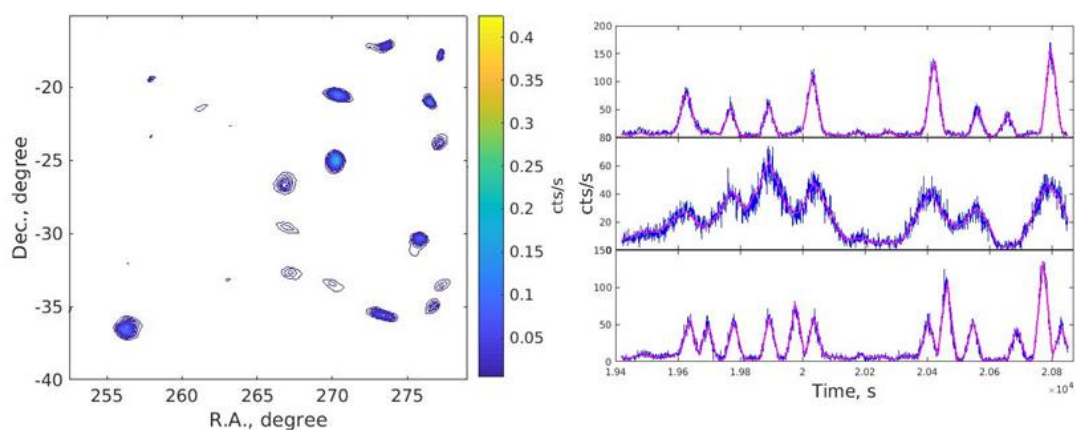


图 4-3 一次小天区扫描观测数据的处理结果（Guan et al. 2020）。左图为重建的天图，右图为观测数据曲线（蓝色）和重建模型曲线（粉色）的对比图

目前慧眼卫星实现对 800 余个已知源进行流量监测，图 4-4 显示了它们在银道坐标系中的分布，图 4-5 以 Swift J0243.6+6124 源为例，展示了三个载荷分别对其的长期流量监测曲线。更多的流量监测曲线及源表等信息可以在慧眼卫星官

方网站上查阅。

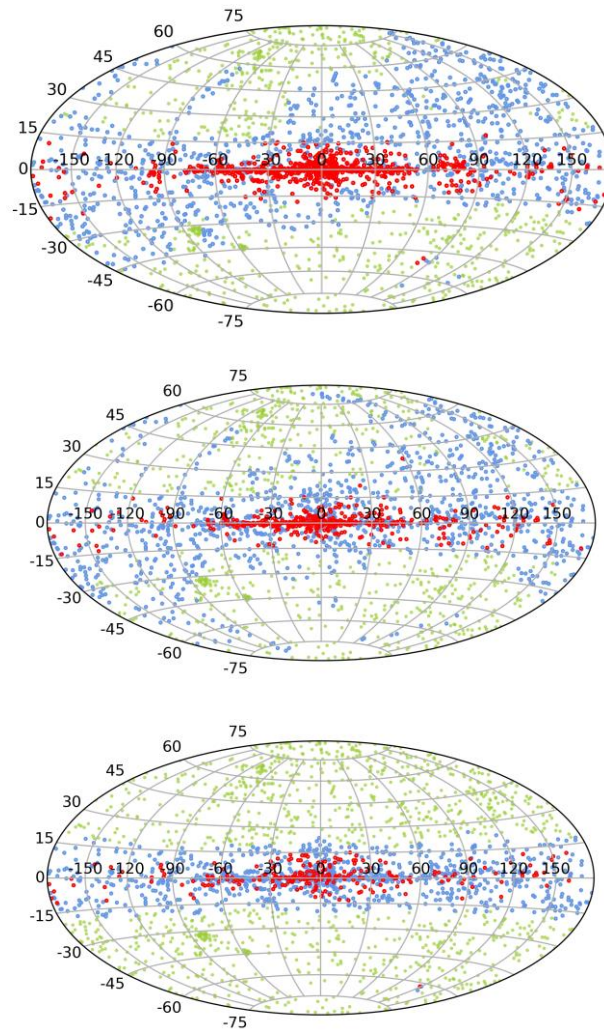


图 4-4 慧眼卫星监测到的已知源在银道坐标系中的分布 (Sai et al. 2020)。红点：信噪比 >3 ，蓝点：信噪比 ≤ 3 。绿点：Swift & Integral & MAXI 联合源表里的源。上、中、下图分别是 LE、ME 和 HE 的结果。

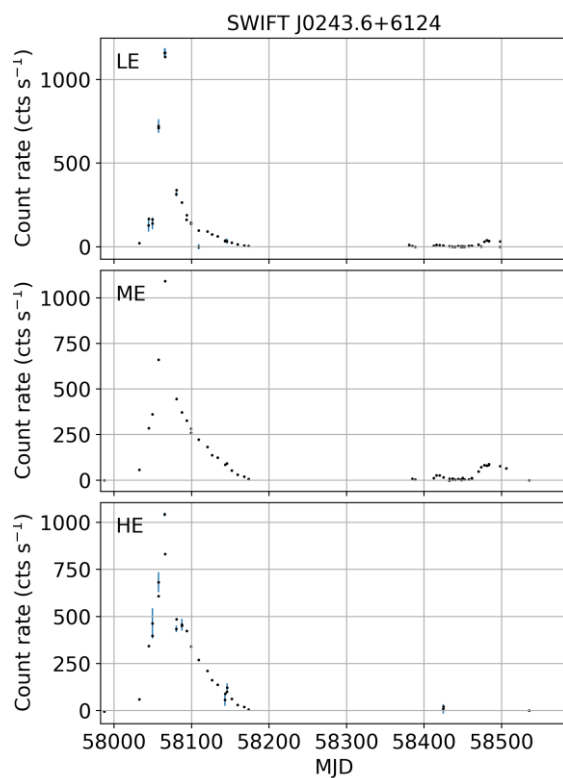


图 4-5 三个载荷分别对 Swift J0243.6+6124 的长期流量监测曲线 (Sai et al. 2020)。

发现新源是慧眼卫星银道面扫描的科学目标之一。其中部分疑似源被证认为刚爆发的新源，如 MAXI J1727-203，慧眼卫星在同一天探测到它的爆发，以 33.8σ 显著性探测到 49.4 ± 1.5 mCrab 的流强 (图 4-6)。慧眼银道面扫描结果参考 Sai et al. (2020)。

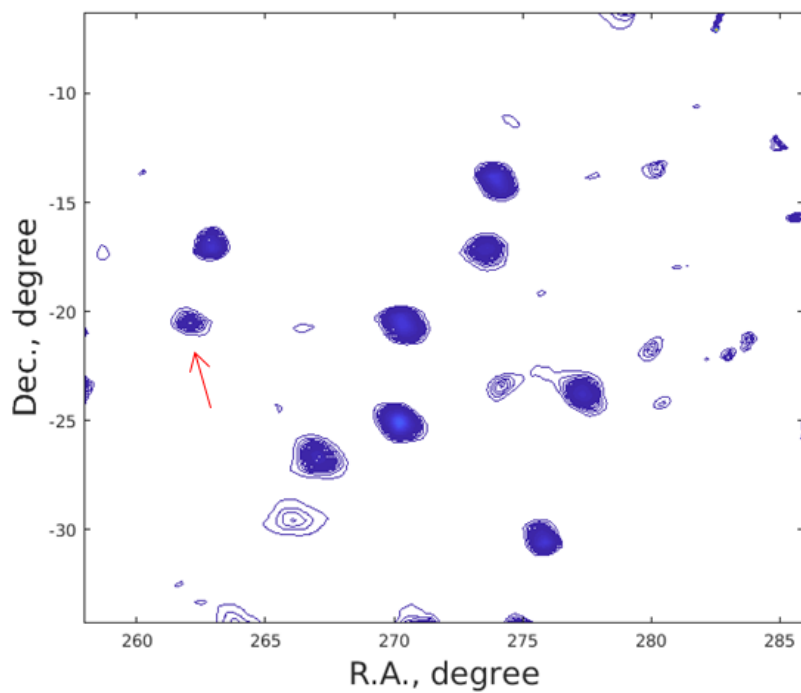


图 4-6 慧眼卫星以 33.8σ 显著性探测到 MAXI J1727-203 爆发，流强为 49.4 ± 1.5 mCrab。

4.2.1.4 实测灵敏度

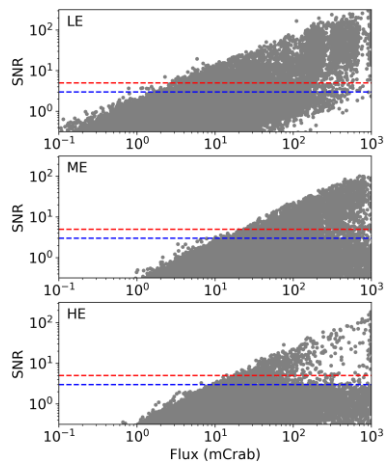


图 4-7 单次扫描的流量和探测信噪比的关系（上：LE，中：ME，下：HE）。

通过对所有扫描结果的统计分析，可得到如图 4-7 所示的各载荷单次扫描探测到的流量与信噪比的关系。由此可得到实际观测中各载荷单次扫描的灵敏度：LE~3mCrab，ME~20mCrab，HE~18mCrab。

4.2.1.5 核心提案征集方向

银道面巡天和监测的主要科学产出：银道面上已知源在不同能段的长期光变以及相对应的普查源表；监测的新的暴发现象，尤其对于短时标暂现源。

核心科学工作组在银道面巡天和监测科学目标上的主要任务是：对发现的已知源的新活动组织多波段和多天文台协同观测，对发现的新的 高能变源组织后随观测证认和研究。对应的核心科学提案征集的主要方向是：（1）利用地面和空间的其它观测设备，针对某类活动天体提出具体的、具备较强可实施性的多波段观测和证认的方案；（2）基于河内变源普查源表以及部分源的光变与能谱，开展相关科学研究的方案。

4.2.2 黑洞和中子星系统频测

4.2.2.1 科学目标概述

银河系内黑洞和中子星双星系统经常有不同类型的活动（比如态转变），有些自转驱动的中子星的自转行为存在长期的演化。但是这些长期活动和演化的机制目前并不清楚，需要对若干典型的黑洞和中子星进行长期的高频次（High Cadence）监测，以获得更多的观测数据样本。

4.2.2.2 黑洞双星系统爆发演化

黑洞双星爆发演化一般分为不同的能谱态，典型的有低硬态和高软态。

低硬态为硬 X 射线辐射主导，对应于吸积盘内区高温冕对来自吸积盘软 X 射线光子的 Compton 散射，或者是吸积喷流的逆 Compton 散射。低硬态时的能谱特征为谱形较硬，软 X 射线较弱，还可能出现盘冕反射成分以及激发的铁荧光结构而在时变方面的特征是出现准周期震荡（QPO）信号且反映光变强度的 rms 指标较大。慧眼卫星在黑洞双星系统爆发的低硬态期间可以在 1-250 keV 测量出完整的谱形，并由此更为准确地估计出光度，给出吸积率的指标，同时将大大增加低硬态完整能谱采样的样本。慧眼卫星在黑洞双星爆发低硬态时变分析方面也具有优势，通过频域分析时变序列的功率谱，可以更好地研究在低硬态期间黑洞附近的吸积流和喷流的物理性质。例如，通过测量盘冕反射成分的时间延迟

谱来研究盘冕的基本几何结构；结合射电等多波段观测，监测爆发低硬态期间的喷流与硬 X 射线波段准周期震荡的相关性，并进而结合宽波段的能谱来研究黑洞通过自转提取能量的基本辐射机制。

黑洞双星爆发多会从低硬态演化到高软态。在高软态时，辐射由来自吸积盘的黑体辐射主导，对应于较大的吸积率、较小的吸积盘内半径、较弱的硬 X 射线辐射以及较为稳定的辐射流强（即 RMS 值较小）。在高软态期间，由于吸积盘更为靠近黑洞，其能谱和时变特性可用于黑洞质量测量、最内稳定轨道半径的测量以及黑洞自转的测量，以及检验强场条件下的广义相对论效应。测量的手段主要是通过能谱分析来得到有关最内稳定轨道和自转的信息，通过功率谱的光变噪声和截断频率来限制黑洞质量（McHardy et al. 2004），以及测量广义相对论进动对应的 X 射线的低频 QPO 信号（Ingram et al. 2010）等。慧眼卫星在软 X 射线波段的面积相对适中，和其它在轨的望远镜相比不占明显优势。但是，黑洞双星在爆发的高软态光度一般非常高，覆盖 3 keV 以下软 X 射线波段的聚焦望远镜通常会出现堆积现象，难以开展精细的能谱分析；而聚焦成像探测器的设计侧重于对弱源的成像能力，其时间分辨率往往较差，限制了对短时标光变的研究。工作在 3 keV 的 RXTE 卫星的性能（面积和时间分辨）只有在 3-20 keV 优于慧眼卫星，而且已经在 2012 年停止工作。因此，对于黑洞双星高软态观测，慧眼卫星的 LE 和 ME 由于不存在堆积效应以及良好的时间分辨，将在软 X 射线能谱测量上具备优势，并在时变上具备较强优势。

4.2.2.3 中子星双星系统爆发演化

根据伴星质量的不同，中子星 X 射线双星分为小质量 X 射线双星（也被称为低质量 X 射线双星，伴星质量小于约 2 倍太阳质量）和大质量 X 射线双星（也被称为高质量 X 射线双星，伴星质量大于约 5 倍太阳质量）两类（van den Heuvel 2009）。它们又可分别分为持续源和暂现源。在小质量 X 射线双星中，伴星通过洛希瓣溢向中子星传输物质，相当部分的小质量 X 射线双星由于吸积盘的不稳定性和中子星表面的热核爆发而表现为暂现源（Frank et al. 2002）。在大质量 X 射线双星中，伴星通常是 O、B 型超巨星和 B 型发射线星（Be 星），中子星通

过俘获伴星的星风物质产生 X 射线辐射。伴星为 O、B 型超巨星的往往是比较明亮的持续源，X 射线光度 $L_x > \sim 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ ；伴星 Be 星的大部分是暂现源，X 射线光度范围为 $\sim 10^{33} - 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$ 。但近年来的观测也发现了一批以超巨星为伴星的暂现源（SFXT，Sguera et al. 2005）。

小质量 X 射线双星中的 X 射线辐射及其演化主要起源于中子星表面和它周围的吸积盘，其时变和能谱特性对研究强引力场物理、广义相对论效应和吸积盘的结构与演化有重要价值。

对于大质量 X 射线双星来说，大质量星风吸积爆发在强磁场的中子星表面形成激波，热斑形成的自旋调制轮廓会随着吸积强度而在铅笔模型和风扇模型之间演化（Meszaros et al. 1988），调制轮廓随着强度和能量变化。慧眼卫星的硬 X 射线面积优势将有利于研究在高分段的自旋调制演化。大质量 X 射线双星在爆发期间也会形成回旋共振吸收线，其能量随磁场增大而增加，当磁场为 $\sim 10^{12}$ 高斯的中子星典型磁场时，电子的回旋线会出现在硬 X 射线波段。这样，慧眼卫星具有的 1-250 keV 的宽波段能力非常有利于观测特别是较高磁场条件下的回旋吸收线现象，用以确定大质量 X 射线双星的中子星的磁场强度。

SFXT 的爆发期短且间隔长，大视场望远镜例如 INTEGRAL/IBIS 和慧眼卫星/HE（在扫描观测模式下）尤其适合发现这类天体。通过慧眼卫星的观测可以扩大 SFXT 的样本，得到不同类别 SFXT 在观测特性上的差别。对 SFXT 的长期、连续的监测将有助于得到它们的重要观测特征，包括爆发频率和轨道参数如半长轴、轨道周期、偏心率等（对大部分源这些数据还很不完整），记录完整的爆发过程（目前仅对个别具有周期性爆发的源可以做到），搜寻能谱中可能的回旋线结构，提供 SFXT 中子星磁场强度的直接证据。因此，慧眼卫星的观测可望揭示 SFXT 的本质及其与经典的大质量 X 射线双星的联系。

4.2.2.4 磁中子星爆发演化

磁中子星是一类特殊的中子星，这类天体具有强磁场、长周期自旋、短时标光变以及光度超过自转供能的特点。磁中子星有两类候选体：反常 X 射线脉冲星和软伽马射线重复暴（Duncan & Thompson 1992）。它们的自转周期较长、周期

导数较大，由磁偶极辐射假定推算出的磁场可能超过临界磁场。磁中子星的 X 射线辐射光度远超其自转能损，而且磁中子星在 X 射线能段表现出较强的活动性（巨耀发、爆发和周期跃变）。这些剧烈的活动性包含了极为丰富的信息，不仅对我们理解这些现象的能量起源，爆发机制有重要的意义，并且有助于研究致密物质的物态等基本物理问题。

具体而言，观测磁中子星的 X 射线辐射，可以帮助我们理解以下几个问题：

（1）磁中子星的 X 射线能量起源；（2）中子星的磁场是否可以超过临界磁场；（3）磁中子星磁场是由偶极场主导还是多极场主导。慧眼卫星对磁中子星周期的长期监测，有助于我们发现形式更多、表现更丰富的活动性，从而揭开磁中子星的能量来源之谜。比如，长期监测磁中子星的自转周期，发现在自转减慢的过程中，偶尔出现周期跳变（glitch）现象，即自转频率会突变到比预计的频率高。跳变时，往往伴随在 X 射线波段的能量释放。2013 年在反常 X 射线脉冲星中还观测到自转周期的反常跳变现象以及伴随的 X 射线爆发。磁中子星的周期跳变现象与其内部结构和周围的星风环境有关。

4.2.2.5 孤立中子星演化

蟹状星云脉冲星（Crab）和船帆座脉冲星（Vela）有很强的 X 射线辐射，同时 Crab 脉冲星还是重要的标定源。通过慧眼卫星的观测可以得到它们的时变特征和脉冲轮廓等，用于研究脉冲星的辐射机制，区分不同的磁层模型。另外，近几年发现了 Crab 星云在高分段的爆发现象，未来慧眼卫星的观测可以在硬 X 射线波段对可能的爆发现象进行研究。以下以 Crab 为例具体介绍慧眼卫星观测孤立脉冲星的一些潜在科学目标。

脉冲星磁层的基本结构是脉冲星天体研究的热点之一，尤其是脉冲星高能辐射的起源。从脉冲轮廓反推脉冲星磁层的结构，我们只能看到视线方向上的投影。如果能从不同的方向看，就能更加准确的描述脉冲星磁层的结构。如果脉冲星的磁轴在发生变化，就有机会给出脉冲星磁层的“立体信息”。RXTE 卫星的观测发现，Crab 脉冲星的 X 射线脉冲轮廓在发生缓慢的演化，体现在双峰间距在缓慢增加，流量比在下降，每个峰的宽度在减小，即意味着能谱也在发生缓慢的变

化，目前的解释为脉冲星的磁轴在进动（Lyne 2013; Zanazzi and Lai 2015; Ge et al. 2016）。另外，X 射线的脉冲轮廓也随相位演化。已有观测表明 X 射线脉冲与射电脉冲之间存在相位差，这个相位差表征了不同辐射区之间的位置关系，也是研究脉冲磁层的主要参数。利用慧眼卫星的数据，可以在更宽的能量范围内对 Crab 脉冲星的脉冲轮廓演化进行研究。同时联合已有的观测数据，可以在更长时标上对 Crab 脉冲星的高能辐射特征进行系统研究。

4.2.2.6 观测策略

主要通过对同一个观测目标多次定点观测，获取来自于辐射源的逐光子信息，包括到达时间和能量，用以开展高精度的时变分析以及宽波段的高精度能谱分析。观测类型属于常规定点观测和机会目标型观测，后者观测的触发来自慧眼卫星的宽视场监测器以及其他 X 射线波段的全天监测器的监测结果。

4.2.2.7 模拟分析与观测结果

(1) Crab 频测

慧眼卫星可以在更宽的能量范围对 Crab 脉冲星的脉冲轮廓演化进行测量，结合已有的观测数据，可以在更长时标上对 Crab 脉冲星的高能辐射特征进行系统研究。目前，在 0.5-8 keV 能段对 Crab 脉冲星的能谱进行良好测量的 X 射线卫星主要是 XMM 和 Chandra，前者只有 7% 的有效时间（Burst 模式），后者的时间系统存在问题：当源的计数率非常高时，其 FIFO（first-in-first-out）缓存器溢出，导致很多事例被丢弃，而遥测数据不能很好记录所有触发事例的信息，导致很多事例的时间不准确（Tennant et al. 2001）。因此慧眼卫星/LE 在这个能段将给出更加精确的相位分解能谱测量结果。在硬 X 射线（5-200 keV）能段，RXTE 和 INTEGRAL 等卫星已有的总曝光时间已经很高，但考虑到 Crab 星云的 X 射线辐射可能存在的变化，与低能段同时获得的高精度分位相硬 X 射线能谱仍有重要意义。RXTE、INTEGRAL 和 Fermi 的观测观测结果表明，Crab 脉冲星 X 射线与射电脉冲之间的相位差是与能量相关的（Molkov et al. 2010; Ge et al 2012），慧眼卫星同时也能够给出详细的相位差随能量演化的观测。

对于 Crab 的分位相能谱分析, RXTE 的结果见图 4-8。利用已有的慧眼卫星对 Crab 脉冲的观测, 已经获取准确的相位分解能谱, 如图 4-8 所示, 该结果表明在同一相位, Crab 脉冲星的谱指数是随能量演化的 (Tuo et al. 2019)。对于 Crab 的脉冲轮廓随时间演化, RXTE 的结果见图 4-9 (Ge et al. 2012), 慧眼卫星主要考虑双峰流量比的时间和能量演化, 该结果还进一步分析中。

Crab 射电与 X 射线脉冲之间存在相位差, 相位差是否存在变化也是重要的研究目标。慧眼卫星监测 Crab 的 X 射线相对于射电波段的相位差。这需要射电的同时观测, 以消除计时噪声的影响。利用慧眼与其它波段的联合观测, 目前观测结果如图 4-10、4-11 和 4-12 所示, 表明慧眼卫星可以准确的测量不同波段相对相位差, 该结果还进一步分析中。

利用慧眼和其他宽波段的数据可对孤立中子星的周期跃变进行研究 (Ge et al 2020a; Wang 2020)。图 4-13 是慧眼对 Crab 的周期跃变的观测结果 (Ge et al. 2020a)。基于慧眼和其他卫星的观测, 可对 PSR B0540-69 的脉冲星风云 (PWN) 与脉冲星辐射状态之间的相关关系进行研究。如图 4-14 所示, PWN 的光度在脉冲星发生周期跃变后约 1000 天有明显的增加 (Wang et al. 2020)。

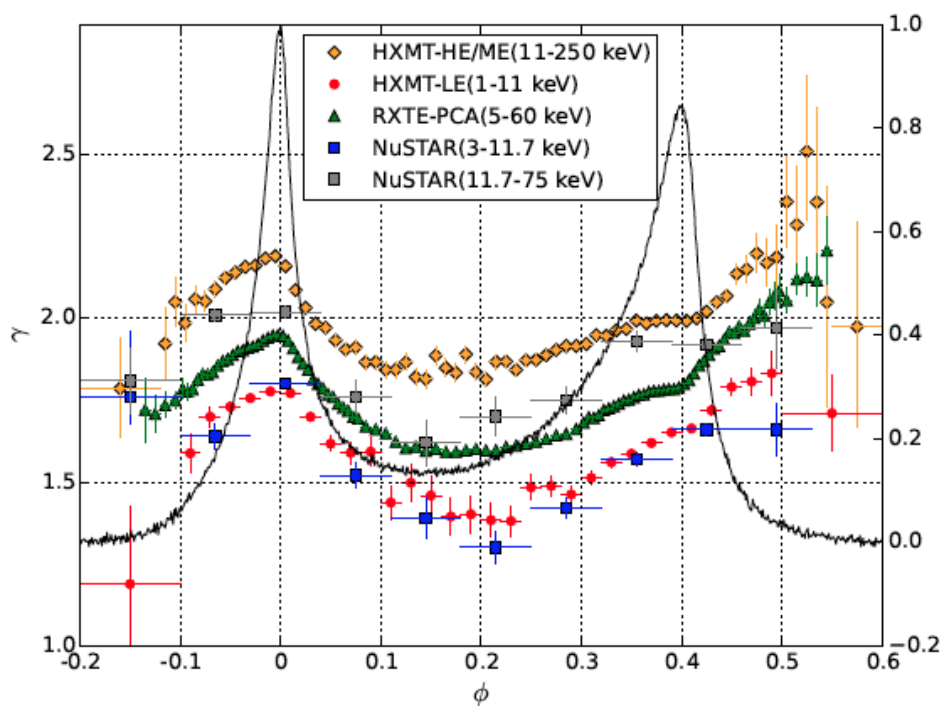


图 4-8 Crab 的位相分解谱对比（慧眼卫星的观测结果与 RXTE/PCA、NuSTAR 对比，Tuo et al. 2019）。

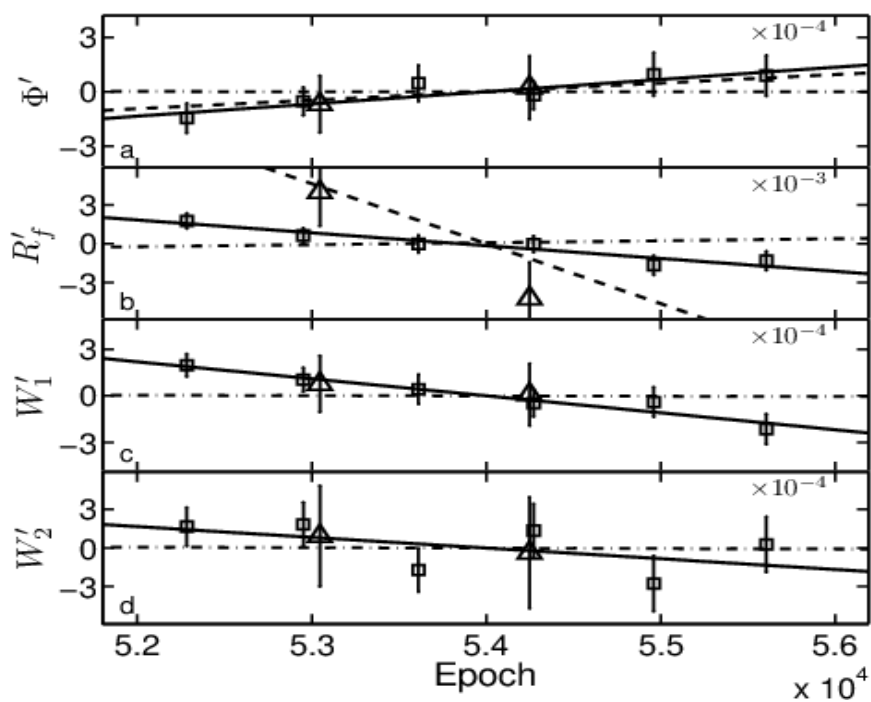


图 4-9 通过 RXTE 得到 Crab 的 X 射线脉冲轮廓的演化（Ge et al. 2012）。方形是 PCA 的结果，三角形是 HEXTE 的观测结果。从上到下依次是：双峰间距、双峰流量比、主峰的宽度和

次峰的宽度。所有的数据均减掉了均值。实线是数据线性拟合的结果，点线是仪器响应轮廓的拟合结果，虚线是射电的观测结果。

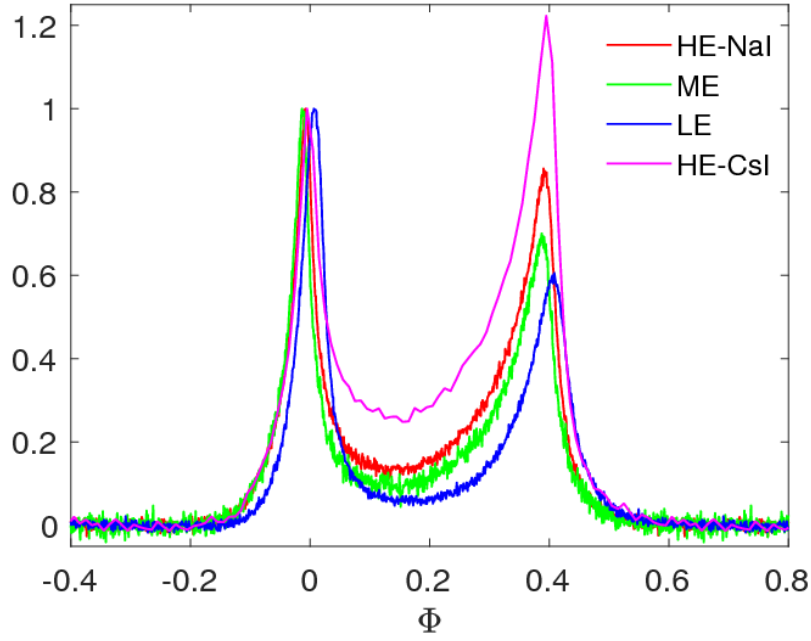


图 4-10 各望远镜实际测量得到的脉冲轮廓，其中 LE 的相位与 ME 等存在相位差。

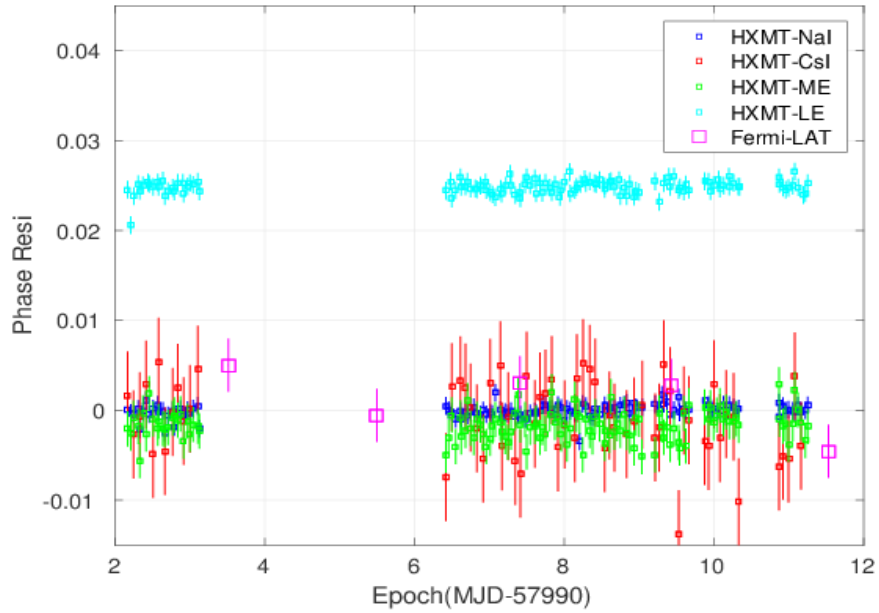


图 4-11 实际测量各个探测器 TOA 的残差，以及与 Fermi_LAT 的对比。

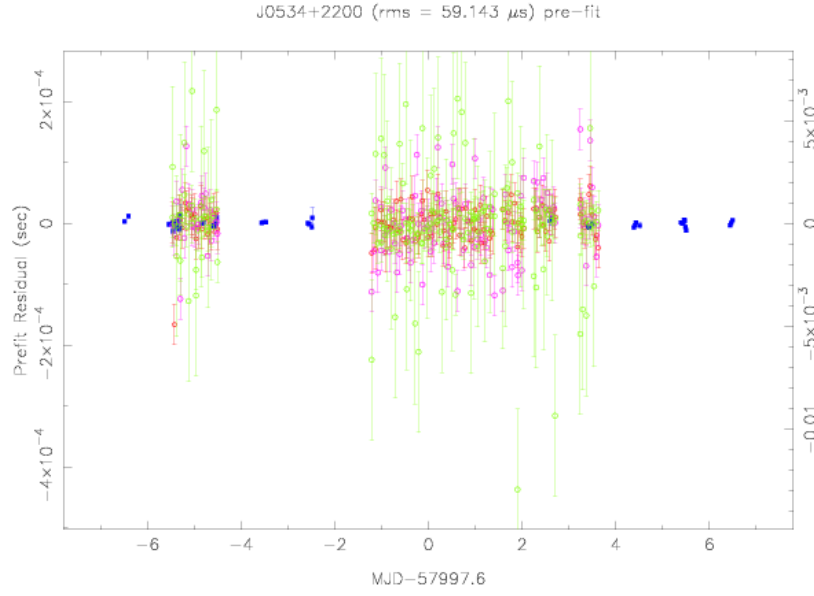


图 4-12 实际测量各个探测器 TOA，与射电观测的对比（扣除相位偏差）。

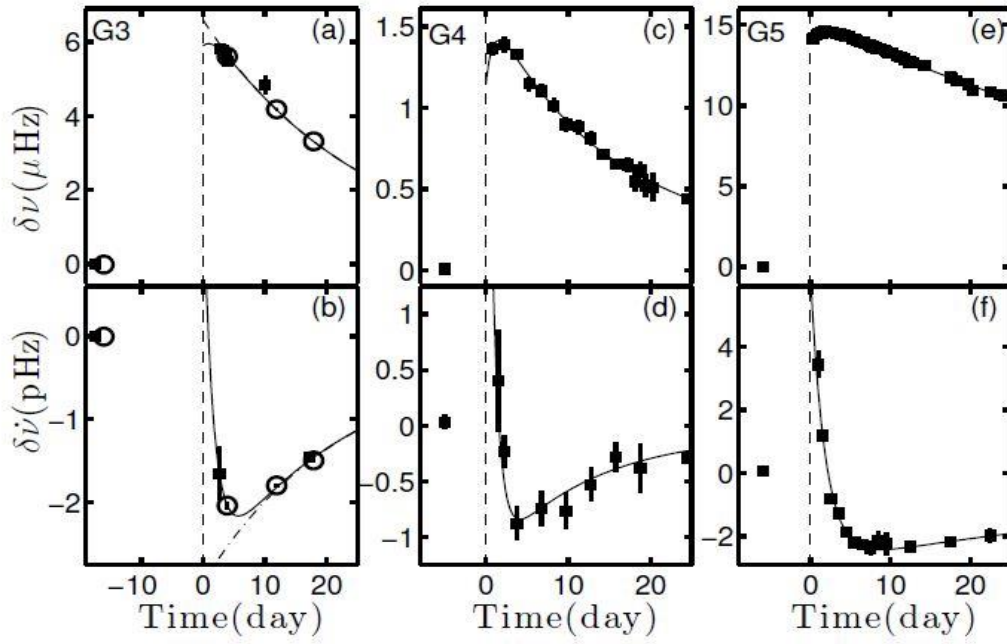


图 4-13 慧眼对 Crab 的周期跃变的观测 (Ge et al. 2020a)。

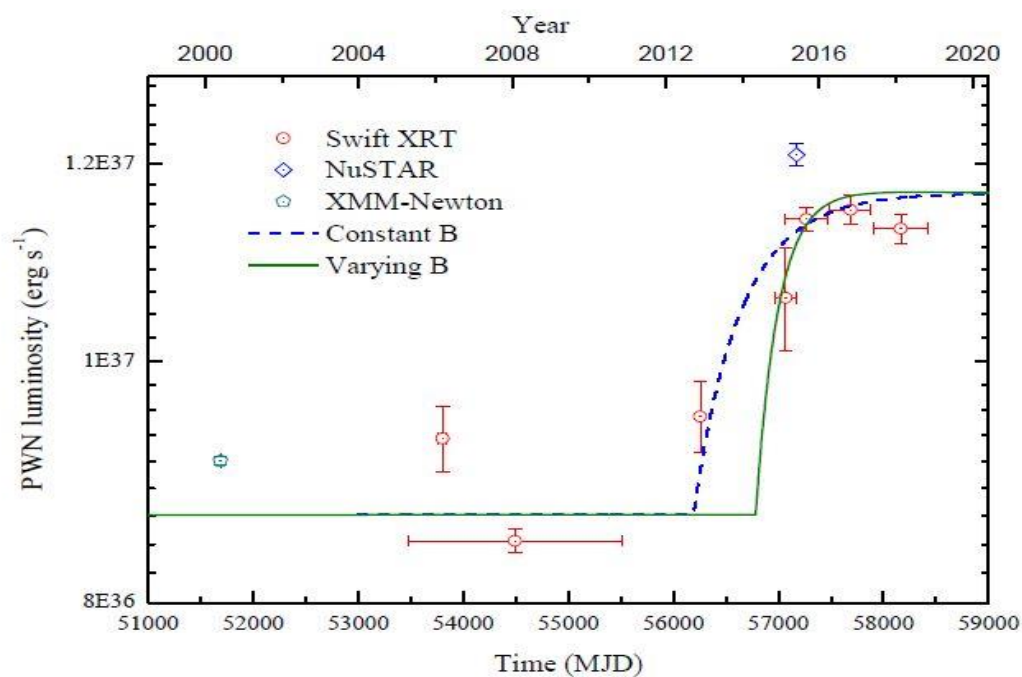


图 4-14 PSR B0540-69 的状态变化 (Wang et al. 2020)。

作为孤立脉冲星的一项重要研究应用，慧眼开展了脉冲星导航的研究。如图 4-15 所示，利用该研究测定的轨道参数达到了 NICER 的测定精度 (Zheng et al. 2019)。

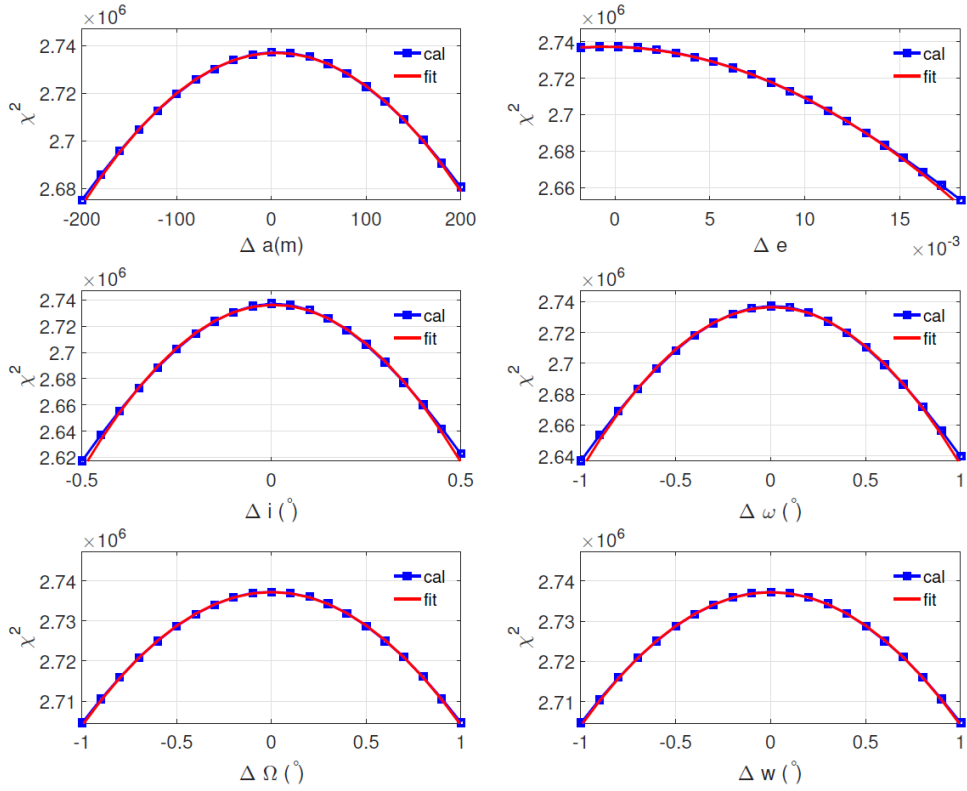


图 4-152 慧眼在脉冲星导航方面的结果 (Zheng et al. 2019)。

(2) QPO 频测能力

图 4-16 显示了慧眼卫星对黑洞候选体 MAXI J1535-571 中 C 型 QPO 的 rms 谱的观测结果 (Huang et al. 2018)。慧眼卫星首次把 rms 随能量的变化关系扩展到 1-100 keV，能段覆盖范围比 RXTE 宽。联合分析时域和能域的 QPO 特征发现：硬 X 射线波段存在残差，这或许是 QPO 或者能谱的本质的额外成分 (图 4-17, Kong et al 2020a)。

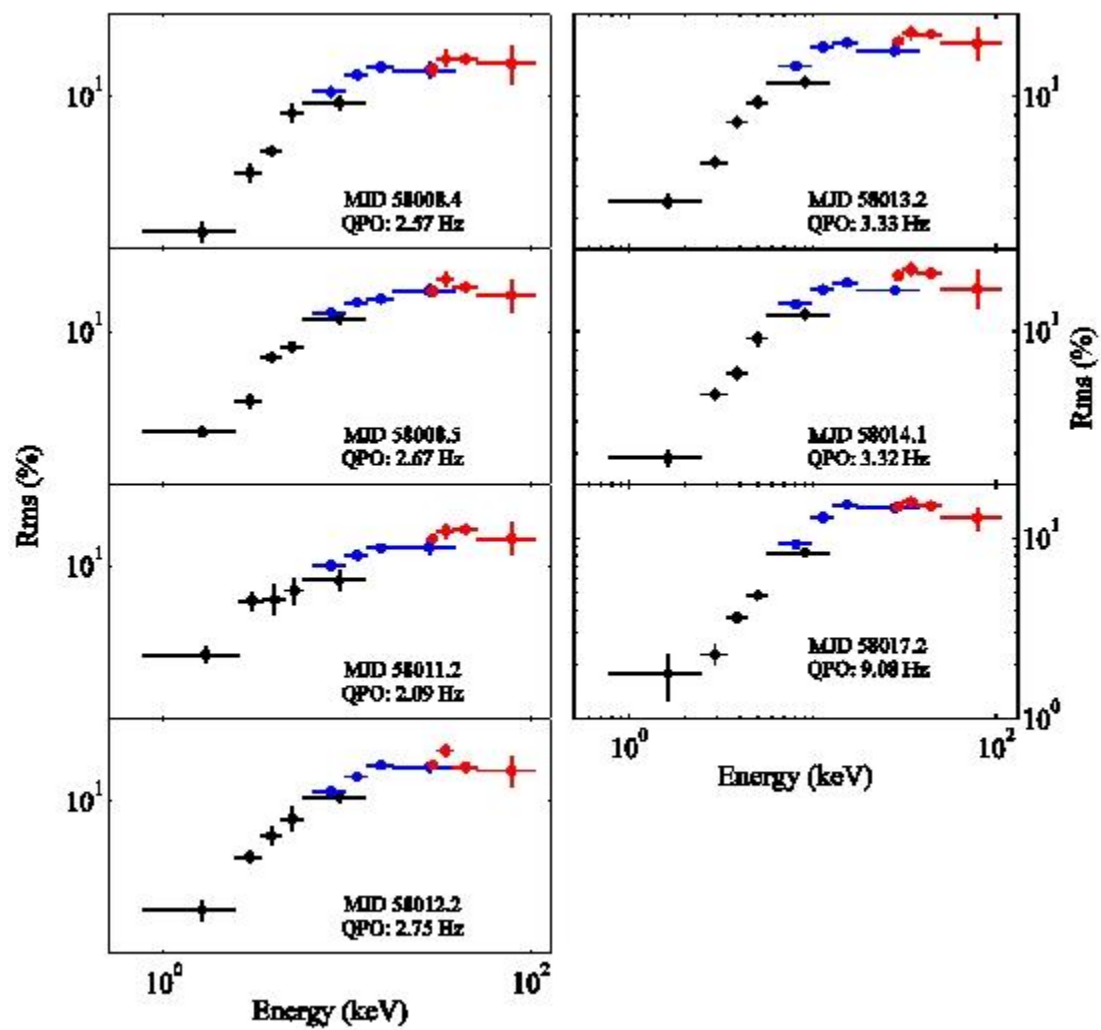


图 4-16 慧眼卫星观测的 MAXI J1535-571 中 C 型 QPO 的 rms 随能量的演化图。

黑色、蓝色、红色分别表示 LE、ME 和 HE 的结果 (Huang et al. 2018)。

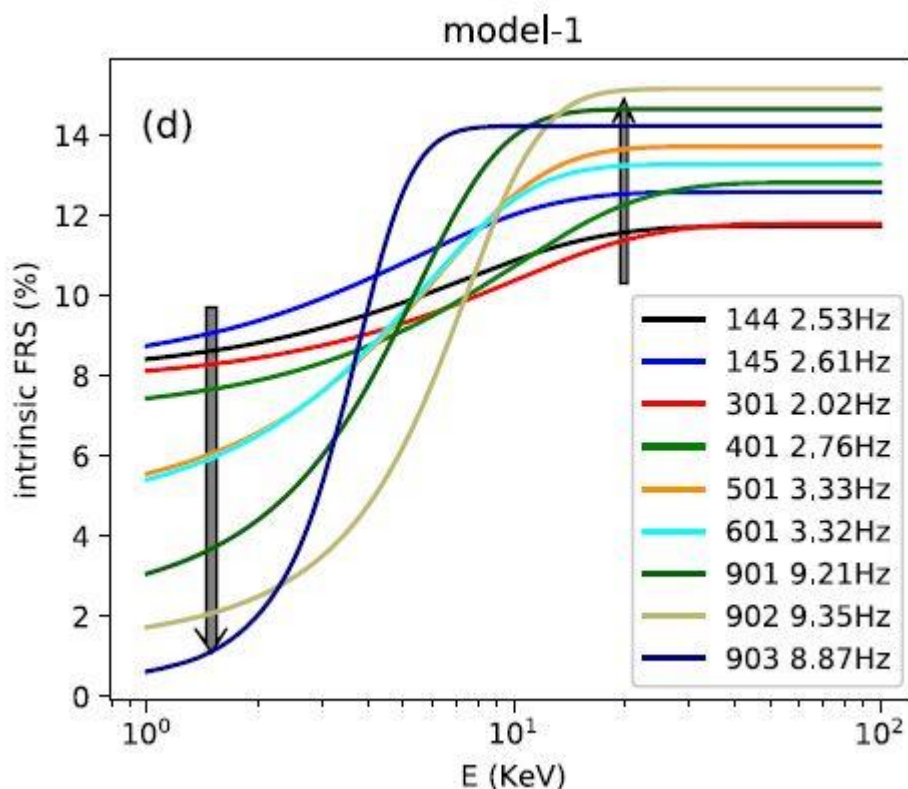


图 4-17 联合拟合慧眼观测 MAXIJ 1535-571 的 QPO rms 和能谱表明：随着源进入软中间态，软和硬 X 射线波段的 QPO rms 分别变得越弱和越强（Kong et al. 2020a）。

慧眼卫星具有较宽的探测能段，可以探测到 30 keV 以上的更高能的辐射，是对以上理论检验的理想工具。在新发现的黑洞 X 射线双星 MAXIJ1820+070 的 X 射线硬态，慧眼观测到了最高能的 LFQPO（200 keV 以上）。在 30 keV 以下，LFQPO 的相位延迟是恒定的，在 30 keV 以上变成了软延迟。且软延迟随能量的增加而增加，在 150-200 keV 波段达到最大值 1.3 s。在 30 keV 以上变成了软延迟。且软延迟随能量的增加而增加，在 150-200 keV 波段达到最大值 1.3 s。在 30 keV 以上变成了软延迟。且软延迟随能量的增加而增加，在 150-200 keV 波段达到最大值 1.3 s。在高能段的探测到 LFQPO、其较大的软延迟以及其对能段的依赖行为都对当前的大多数模型提出了挑战。这些发现表明 LFQPO 可能起源小尺度喷流的进动（Ma et al. 2021；见图 4-18）。

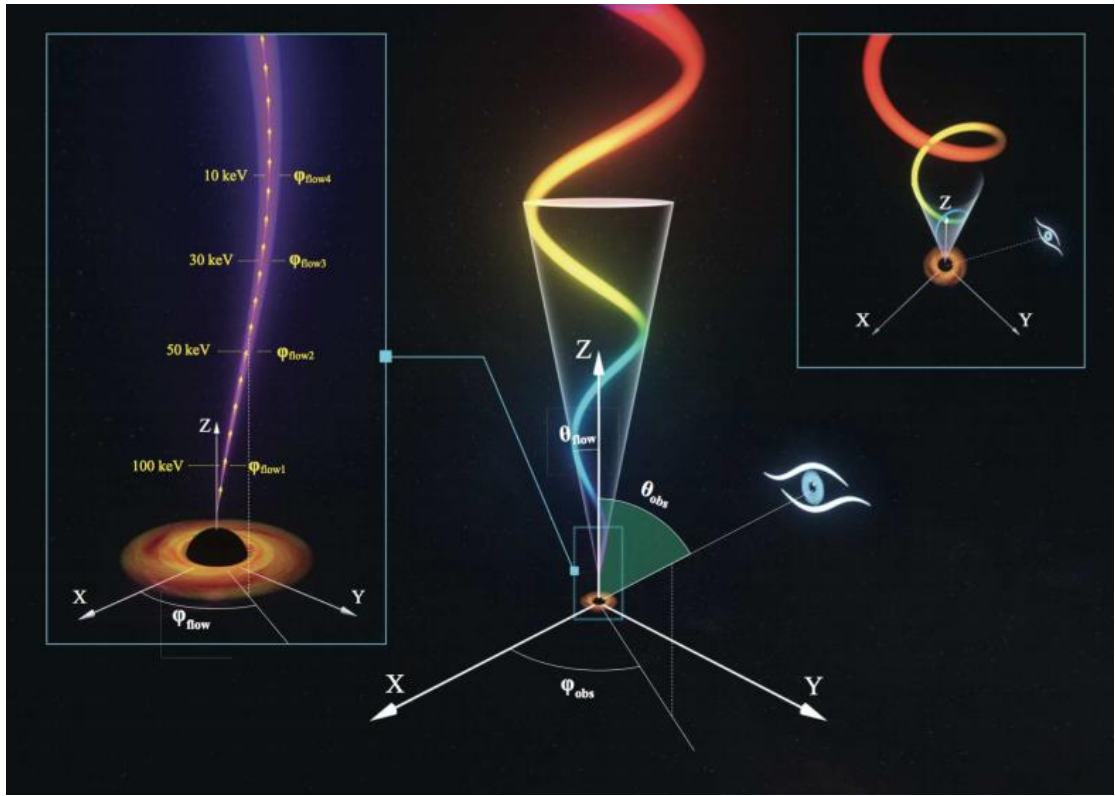
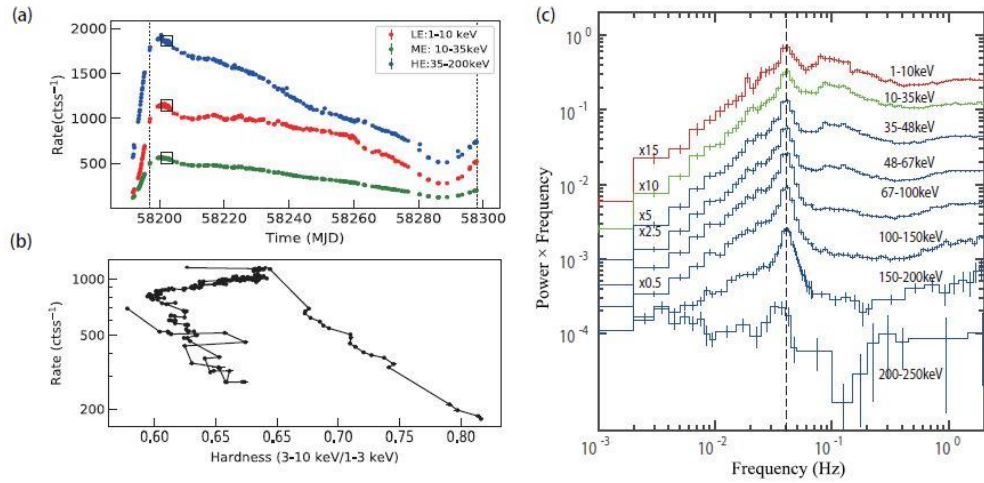


图 4-18 MAXI J1820+070 的最高能的 QPO（上图）以及小尺度的喷流进动的模型解释（下图）（Ma et al. 2021）。

4.2.2.8 提案征集方向

观测类型属于常规定点或者机会目标类型。观测提案需要针对某个具体的观

测目标天体论述实现其科学目标所需要的每次观测的曝光量和观测频度。

4.2.3 黑洞和中子星系统高统计量观测

4.2.3.1 科学目标概述

尽管其它 X 射线天文卫星对某几个经典的 X 射线天体做了大量的观测，但是由于缺乏同时的宽波段、高统计量、高时间分辨率和良好能量分辨的观测，一些基本科学问题仍然不清楚。因此需要慧眼卫星利用其大有效面积、宽波段、良好能量分辨率的综合优势，对 Cyg X-1、GRS 1915+105、GX 339-4、Aql X-1、Sco X-1 和 Her X-1 等多个经典 X 射线天体以及新发现的爆发亮源进行宽波段、高统计量、高时间分辨和良好能量分辨测量的观测。

经典亮源高统计观测部分的科学目标虽然也可以在变源频测中实现，但是由于经典亮源便于安排长期观测计划，将侧重于理解黑洞附近吸积盘的行为并测量黑洞的自转，理解中子星磁球的性质并测量中子星的表面磁场强度，理解双星盘冕性质并测量其几何结构，以及理解喷流性质并研究其与盘冕的区别与联系等。

表 4-2 给出了 14 个最亮的经典亮源，未来观测计划也会包括其它爆发亮源的高统计观测。

表 4-2 14 个最亮的经典亮源在软 X 射线和硬 X 射线波段的辐射特性（对于三个载荷的大致计数率估计，ME 和 HE 波段采用 Crab 的幂率谱，源的强度采用 BAT 平均观测结果。LE 采用黑体谱，温度 1keV，源的强度采用 RXTE/ASM 平均观测结果）。

Source	ASM (mCrab)			BAT (mCrab)			HXMT/LE	HXMT/ME	HXMT/HE
	1-12 keV			15-50keV			1-15 keV	5-30 keV	20-250 keV
	Average	Max	RMS	Average	Max	RMS	counts/s	counts/s	counts/s
Crab	1000.0	1000.0	0.0	1000.0	1000.0	0.0	1073.4	410.8	661.8
Cen X-3	42.4	425.2	107.9	53.0	495.5	84.1	40.1	21.6	35.0
Cyg X-1	355.1	2000.2	253.1	174.8	1681.7	657.2	382.6	71.2	115.1
Cyg X-2	484.4	1020.9	59.4	36.4	256.4	13.8	691.7	14.8	23.9
Cyg X-3	150.3	556.3	83.8	102.2	817.2	120.1	224.2	41.8	67.6
GRS 1915+105	627.7	2593.6	410.9	155.2	1345.4	288.3	926.2	63.9	102.6
Her X-1	13.0	185.0	42.3	33.5	1687.7	166.0	18.9	13.9	22.4
Sco X-1	11559.1	26561.0	895.6	180.8	6747.4	1266.5	16917.3	74.2	120.2
Vela X-1	45.5	370.1	41.7	103.6	2534.5	367.9	57.6	42.6	68.9
X 1820-303	269.9	784.7	46.2	47.7	381.0	25.3	400.5	19.6	31.3
4U 1700-377	47.5	670.9	59.1	80.9	1532.4	233.8	55.2	33.5	53.7
GX 301-2	21.0	290.2	28.0	102.4	1547.9	357.1	31.0	42.1	67.3
SMC X-1	16.8	213.8	20.7	25.0	294.5	27.1	22.3	10.4	16.5
GS 1826-238	35.7	408.0	19.5	66.0	522.8	27.3	52.0	27.4	43.5

4.2.3.2 宽波段能谱研究暂现源产生机制

暂现源在不少类型的爆发过程中，主要辐射能段为硬 X 射线。例如，INTEGRAL 观测发现不少类型的 X 射线源有延伸到 100 keV 以上的高能尾巴 (Woods & Thompson 2006)，说明硬 X 射线在总辐射能中占有重要（有时可能是主导）的贡献，因此观测 1-250 keV 宽波段能谱可能是理解它们的辐射机制的关键。目前的 X 射线望远镜的灵敏度还不足以同时获取 1-250 keV 的宽波段能谱，更不能同时研究硬 X 射线波段的时变和谱变现象。其主要限制在于硬 X 射线波段的观测一般需要较长的曝光时间，难以得到和软 X 射线同步的宽波段能谱，从而只能通过综合不同望远镜的观测数据进行分析。即便如此，在 10-20 keV 的能量范围内，依然缺乏高统计量观测数据。

4.2.3.3 千赫兹准周期振荡研究

千赫兹准周期振荡 (kHz QPO) 代表了当今在中子星双星中探测到的最高频率的光变信号 (Morgan et al. 1997)。由于其极短时标和较高的幅度，可以肯定这些信号来自中子星附近的强引力场区域。目前公认 kHz QPO 中的高频信号可能与吸积盘物质的轨道运动有关。当吸积物质达到最内稳定轨道时，转动频率达到极大值，kHz QPO 频率也因此会表现出饱和现象。RXTE 卫星对近 30 个中子星小质量 X 射线双星观测到 kHz QPO 信号，已知最高频率约为 1200~1300 赫兹，这是对广义相对论预言的最后稳定轨道和中子星半径的最强限制 (Berger et al. 1996)，但目前仅在个别源上发现有较为明确的 QPO 频率饱和现象 (Zhang et al. 1998; Kaaret et al. 1999)。此外，使用 RXTE 卫星的观测还发现在中子星小质量 X 射线双星中，快速光变的相对幅度在 2-30 keV 能段随光子能量增加而增加。慧眼卫星在硬 X 射线波段良好的灵敏度使得在研究强引力场和致密物质物理性质方面具备优势，其探测器灵敏度的提高还可以扩宽 QPO 的探测频率范围，考察在更多的小质量 X 射线双星中 kHz QPO 是否存在预测的频率饱和现象。在通过其它观测信息确定中子星质量之后，可以用来验证广义相对论预言的最内稳定轨道的存在，同时可以限制中子星半径以及中子星的物态。

4.2.3.4 热核暴探针

近几年有关采用吸积中子星表面的热核暴作为探针来研究吸积盘冕的结构和演化逐渐形成热点并引起大家的关注 (Chen et al. 2012)。通过前期研究建立了 X 射线双星冕缺失的高置信度样本, 发现吸积中子星的吸积连续谱硬 X 射线辐射在热核暴期间会明显减弱, 硬 X 射线辐射的恢复时标滞后于软 X 射线暴大约 1-2 秒。由于该信号主要在 30 keV 以上比较显著, 慧眼卫星在硬 X 射线波段的面积优势使得该方向可能成为慧眼卫星的重要潜在科学目标。热核暴作为吸积盘冕探针的后续研究可应用于: 限制 X 射线双星冕的位置, 并与活动星系核反响映射外推比的结果进行比较; 研究对吸积盘内区吸积的影响, 可以得到暴反馈和能谱态相关的结果; 可能可以作为测量 X 射线双星硬态期间吸积盘内半径的新手段。

4.2.3.5 观测策略

采用一次或几次高统计量的定点观测模式, 观测对象为已知的河内经典亮源以及新发现的爆发亮源。由于定点观测亮源对于本底模型的系统误差要求较低, 可以在卫星运行的早期开展高统计监测, 用于能谱和时变分析。观测经典亮源的优先顺序以及观测曝光大小由征集得到的核心观测提案来确定。

4.2.3.6 观测结果分析

(1) Crab 能谱拟合

对 Crab 的实际观测结果进行能谱拟合, 输入参数采用 XMM 卫星的测量结果 (Willingale et al. 2001), 模型取带吸收的幂律谱 (XSPEC 中: wabs*powerlaw), 有效曝光时长 982 s, 误差取 90%置信度。结果见表 4-3 和图 4-19。

表 4-3 慧眼卫星对 Crab 的拟合结果以及和 XMM 的比较

	n_H (10^{21} cm^{-2})	PhoIndex
慧眼卫星	3.6	2.11
XMM	3.6	2.11

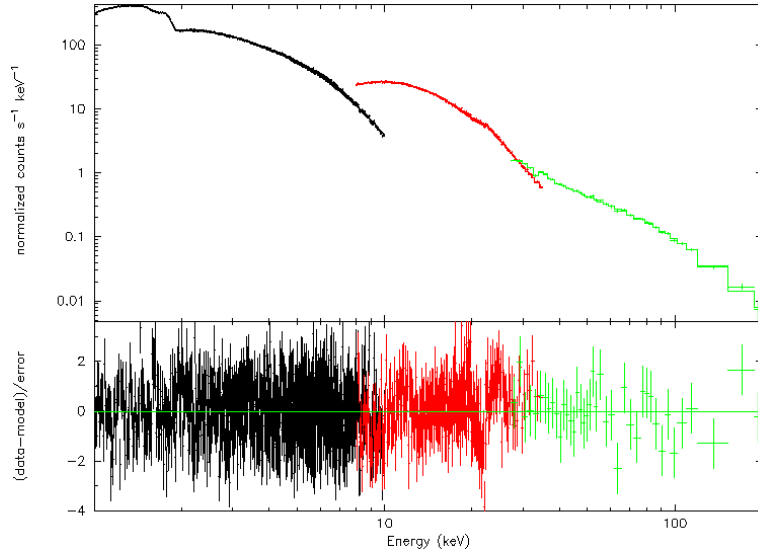


图 4-19 慧眼卫星观测蟹状星云 Crab 982 秒获得的能谱。

(2) MAXI J1820+070 能谱拟合

对 MAXI J1820+070 的能谱拟合分低硬态 (LHS)、中间态 (IS) 和高软态 (HSS) 三个能谱态, 并分别与 NuSTAR 已发表结果进行对比。IS 态模型为 XSPEC 中的 $\text{diskbb} + \text{bbody} + \text{relxillCp}$ 。慧眼观测的有效曝光时间为 4.02 ks, 得到的能谱拟合结果见表 4-4 和图 4-20, 同时的 NuSTAR 观测拟合结果 ($\text{diskbb} + \text{bbody} + \text{cutoffpl}$, Fabian et al. 2020) 见表 4-4。

表 4-4 慧眼卫星对 MAXI J1820+070 在 IS 态的模拟结果以及和 NuSTAR 的比较

慧眼卫星	diskbb		bbody		relxillCp		
	Tin (keV)	norm	kT	norm	Gamma	kTe	Refl_frac
	0.680 ± 0.003	20700 ± 500	1.16 ± 0.01	0.144 ± 0.007	1.84 ± 0.04	400 ± 900	0.34 ± 0.13
NuSTAR	diskbb		bbody		cutoffpl		
	Tin (keV)	norm	kT	norm	Gamma		Ecut

	0.60 ± 0.01	45000 $\pm$ 5000	1.12 ± 0.01	0.177 ± 0.004	1.6 $\pm$ 0.1	50 $\pm$ 6
--	--------------------	---------------------	-----------------	----------------------	---------------	------------

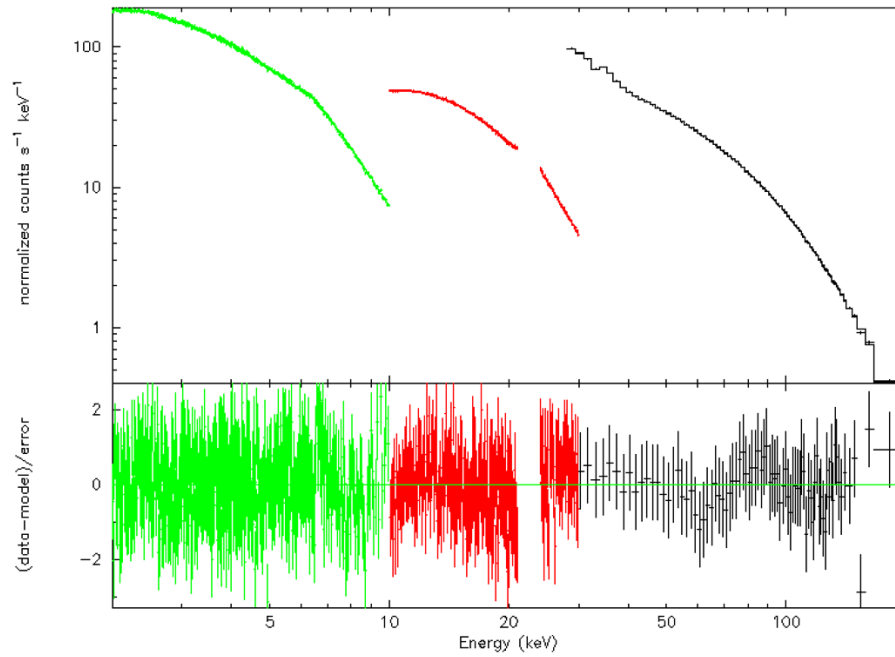


图 4-20 MAXI J1820+070 的 IS 态的慧眼能谱拟合图。

HSS 态的模型为 (XSPEC) $\text{diskbb}+\text{bb}+\text{cutoffpl}$ 。慧眼观测的有效曝光时长 2.7 ks, 得到的能谱拟合结果见表 4-5 和图 4-21, 同时的 NuSTAR 观测拟合结果 (Fabian et al. 2020) 见表 4-5。

表 4-5 慧眼卫星对 MAXI J1820+070 在 HSS 态的拟合结果以及和 NuSTAR 结果的比较

	T_{in} (keV)	kT (keV)	Γ	E_{cut} (keV)
慧眼卫星	0.68 ± 0.03	0.97 ± 0.06	1.54 ± 0.09	172 ± 53
NuSTAR	0.65 ± 0.12	0.93 ± 0.02	1.47 ± 0.07	74^{+18}_{-12}

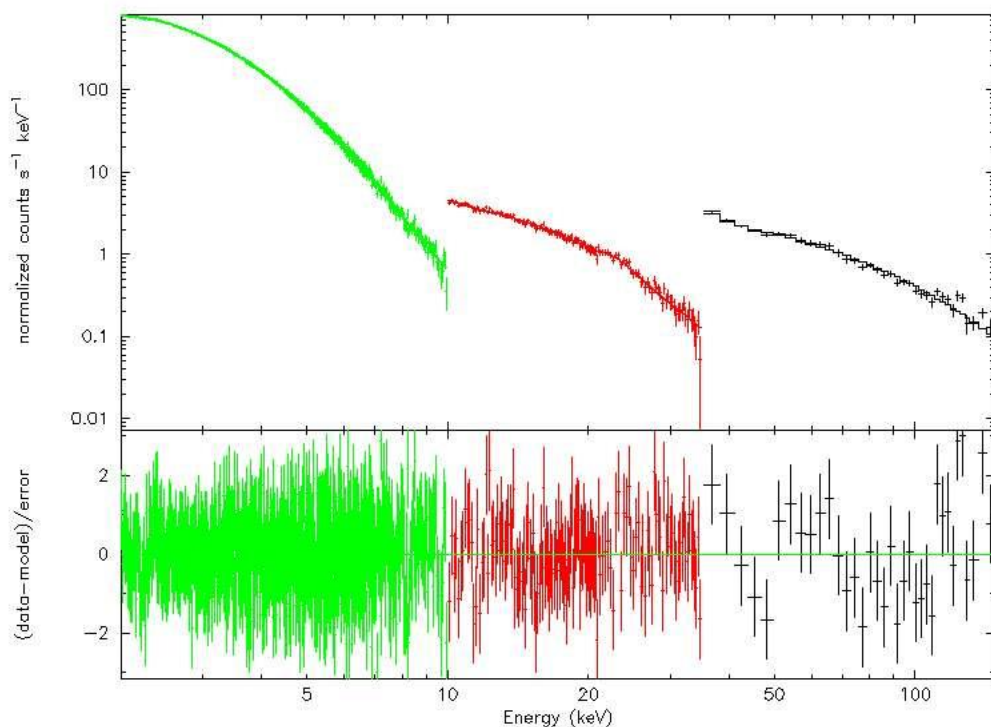


图 4-21 MAXI J1820+070 的 HSS 态的慧眼能谱拟合图。

LHS 态的模型为 (XSPEC) TBabs(diskbb + relxillCp + xillverCp)。慧眼观测的有效曝光时间 4.40 ks，得到的能谱拟合结果见表 4-6 和图 4-22，准同时观测的 NuSTAR 观测拟合结果 (diskbb+relxillpCp+relxillpCp, Buisson et. al 2019) 见表 4-6。

表 4-6 慧眼卫星对 MAXI J820+070 在 LHS 的观测结果以及和 NuSTAR 结果的比较

	T_{in} (keV)	Γ	Afe	kTe (keV)
慧眼卫星	0.42 ± 0.02	1.560 ± 0.004	3.6 ± 0.2	58 ± 2
NuSTAR	0.56 ± 0.05	1.65 ± 0.01	8 ± 3	80 ± 40

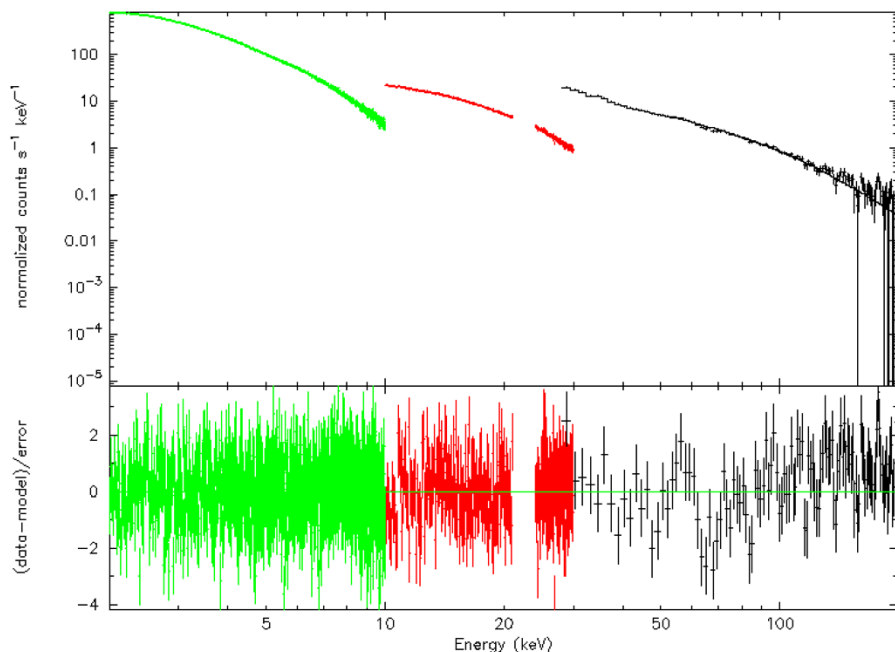


图 4-22 MAXI J1820+020 的 LHS 态的慧眼能谱拟合图。

(3) 观测结果

目前大多数的观测特征都起源于 X 射线双星的爆发和演化。这些研究包括：中子星和黑洞的基本特征，脉冲星导航，回旋共振散射吸收 (CRSF)，大质量双星 (HMXB) 的螺旋桨效应，中子星 HMXB 磁极的辐射特征，中子星表面的热核反应探究 Z 源和 atoll 源的演化，黑洞双星的反射成分，准周期振荡 (QPO) 及爆发的时间延迟，联合的能域和时域分析，黑洞双星系统爆发期间的盘冕和喷流演化特征等。2020 年已经发表、正在投稿的和正在准备的工作涉及到了以上多个研究领域。

在中子星双星系统的研究中，慧眼观测到了 GRO J1008-57 的 90 keV 的回旋吸收线，显著性超过 70σ (图 4-23, Ge et al. 2020b)。这是目前探测到的最高能量的回旋吸收线。利用回旋吸收线能量和中子星磁场的关系，该工作实现了对宇宙最强磁场的直接测量。Her X-1 是上世纪第一个探测到有吸收线的中子星系统。此前认为 Her X-1 的吸收线能量长期随时间衰减，但目前发现该衰减趋势已经停止 (图 4-24, Xiao et al. 2019)。为更好地理解此现象，急需慧眼的进一步观测。

此外，还在其他源中观测到了回旋吸收线，如 4U 0115+63 中，在约 18 keV 处观测到了吸收特征（Liu et al. 2021）。

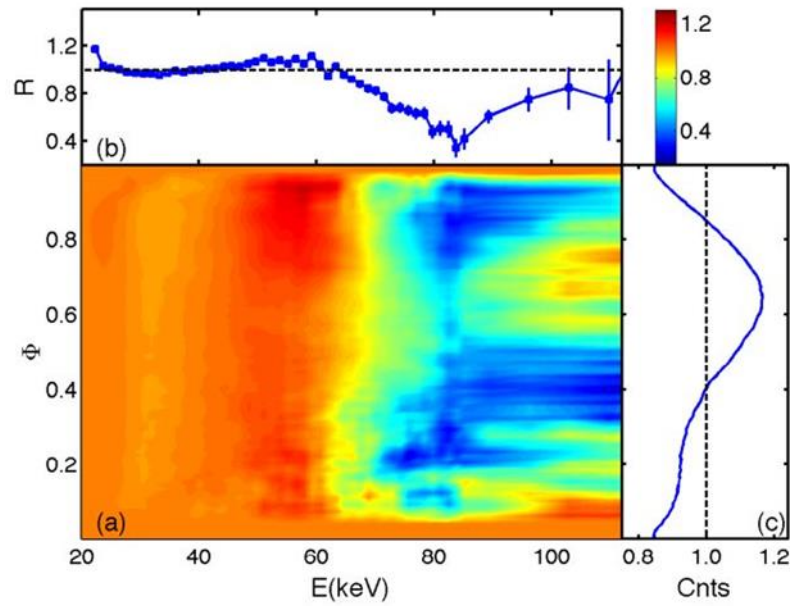


图 4-23 慧眼观测到 GRO J1008-57 的约 90 keV 的吸收线（Ge et al. 2020b）。

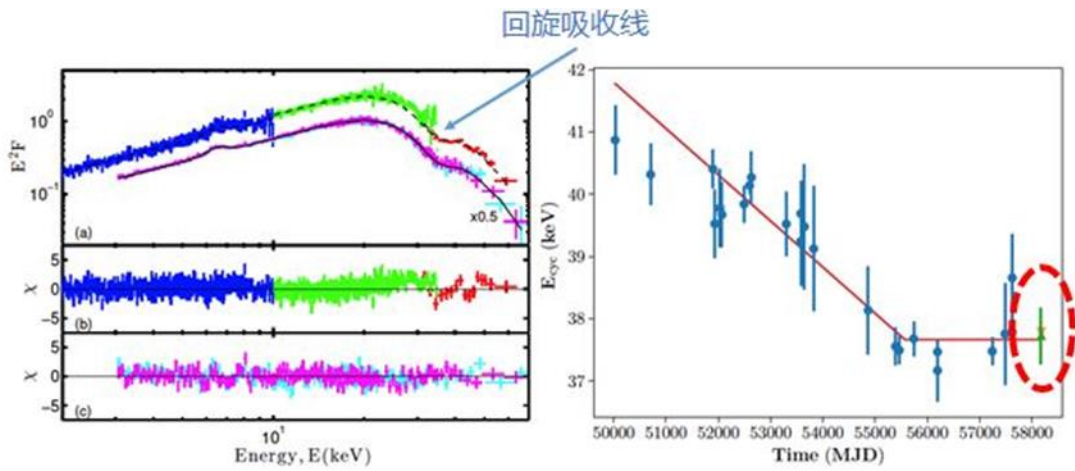


图 4-24 慧眼观测到 Her X-1 的吸收线线心能量随时间的长期衰减已经停止（Xiao et al. 2019）。

I 型 X 射线暴是发生于中子星 X 射线双星系统中的一种快速耀发现象，其持续时间为数十秒到数百秒。这种 X 射线暴会对吸积过程有巨大的影响，是研究中子星 X 射线双星吸积物理的有效探针。慧眼之前的 X 射线卫星发现了热核

暴期间的冕冷却，通常是合并数十个甚至上百个热核暴的结果。目前仅使用慧眼的单个暴观测数据就已经进一步证实这个效应，并且具有更高的信噪比：中子星 X 射线双星 4U 1636-536 中的一个 I 型暴期间，在 40-70 keV 的光变曲线中发现了硬 X 射线的缺失，该缺失来源于冕的冷却。此外，该结果还是首次在暴秒量级的能谱中发现了硬 X 射线的缺失（Chen et al. 2018），如图 4-25 所示。而之前使用 RXTE/PCA 的数据，发现类似的结果需要合并几十个暴；使用 INTEGRAL 的数据，需要合并一百多个暴。可见，慧眼结果信噪比显著提升，证明慧眼卫星在该类研究的观测优势。

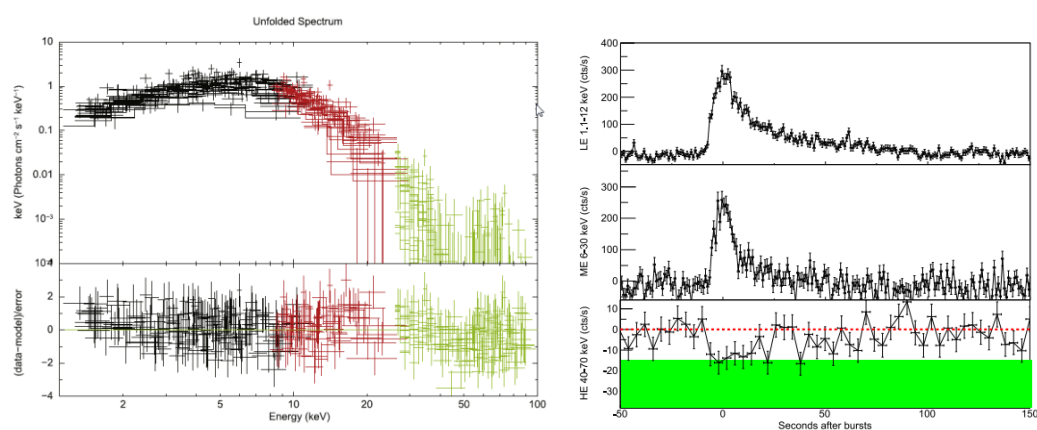


图 4-25 4U 1636-536 的 I 型暴的光变曲线与能谱（Chen et al. 2018）。

慧眼在对 4U 1608-52 的热核暴观测中发现：除了中子星表面的热辐射之外，还有另外一个成分（Chen et al. 2019），如图 4-26 所示。该成分和热核暴的流量正相关，其谱形和吸积辐射能谱相似，该现象一般认为是热核暴引起的吸积率增加。由于该热核暴的辐射半径超出了中子星表面，且达到爱丁顿光度，其吸积能释放区域可能在热核暴的半径之外。

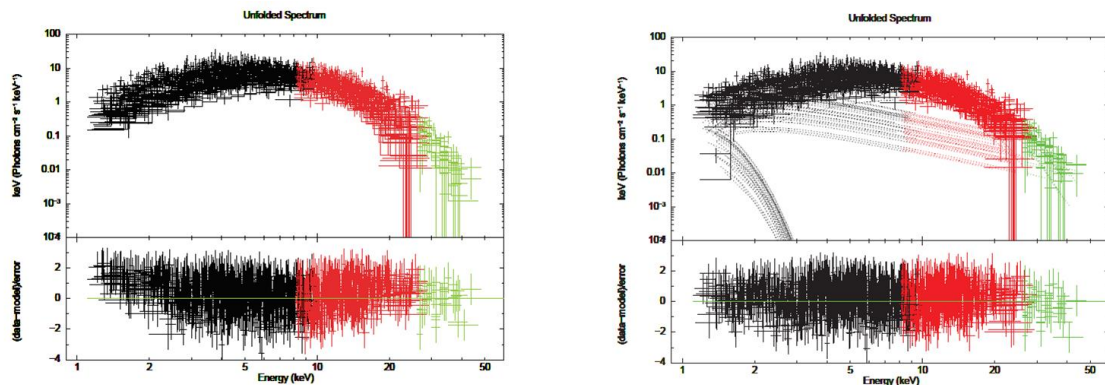


图 4-26 BB（左边）与 f_a model（右边）模型的拟合结果：点线表示 pre-burst emission 的各个模型成分（bb 和 nthcomp）（Chen et al. 2019）。

慧眼在其他中子星双星中也发现了暴频等现象，这对理解吸积物理过程提供了更为丰富的观测依据。

虽然在 Sco X-1 等 Z-/Atoll 源中观测到了 kHz QPO，但是过去 20 年里仍然不清楚其本质。受限于慧眼之前卫星的探测能力，不能探测到更高能的 kHz QPO，所以不能对模型进行严格检验。慧眼第一次在 Sco X-1 20 keV 以上的辐射中探测到了 kHz QPO。由于 20 keV 以上的辐射不可能由盘主导，慧眼的观测结果对当前 kHz QPO 的模型提出了严峻的挑战（图 4-27，Jia et al. 2020）。

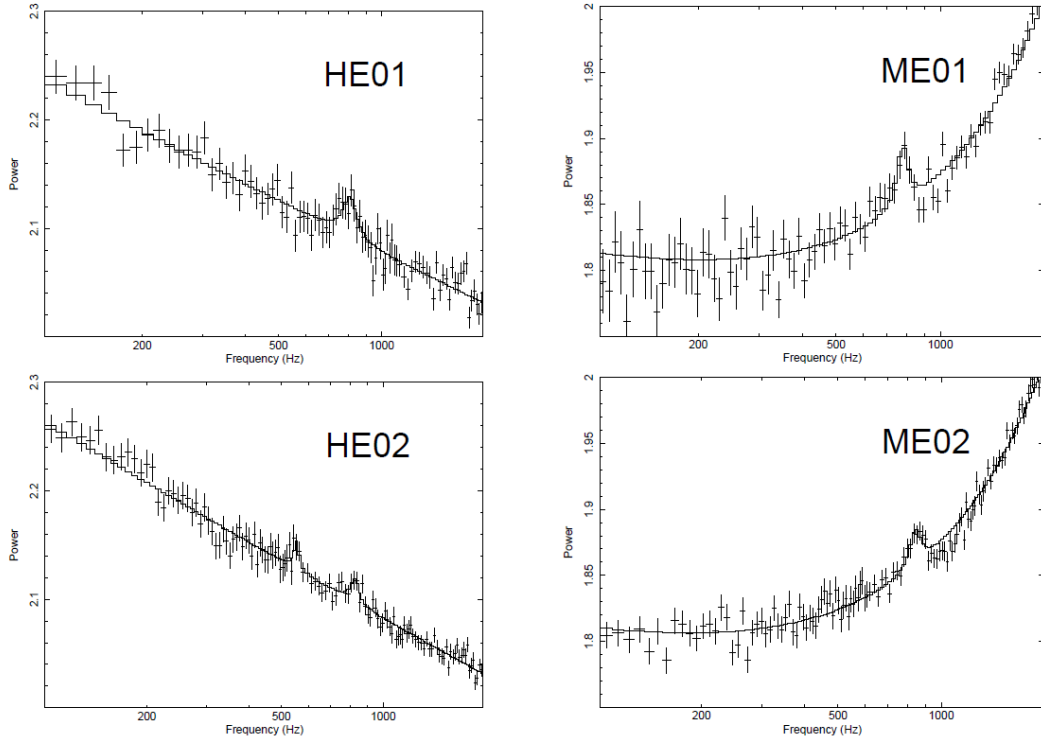


图 4-27 慧眼观测到 Sco X-1 的高能 kHz QPO (Jia et al. 2020)。

慧眼完整地观测到银河系内首个极亮 X 射线源 (ULX) Swift J0243.6+6124 的爆发过程。凭借这些高频的观测和高统计量的数据, 我们对该源进行了系统的研究, 尤其是研究了中子星的吸积和自旋等特征。这些研究还得到了该源的脉冲轮廓发生转变时对应的光度, 揭示了其中重要的物理过程 (图 4-28, Doroshenko et al. 2020; Zhang et al. 2019; Kong et al. 2020b; Wang et al. 2020)。在高临界光度下的转变表明盘的吸积从气体压向辐射压的转变, 这与半个世纪前的理论预测相符。在 HMXB 2S 1417-624 中也发现了类似的结果 (Ji et al. 2020)。此外, 慧眼还观测到了 Swift J0243.6+6124 在双特征光度下能谱参数的双拐折现象, 首次揭示了大质量 X 射线双星极冠区吸积辐射随着光度演化的完整图像 (Kong et al. 2020b, 图 4-29)。得益于慧眼的高频次、高统计观测, 在该源中还发现了第三个特征光度, 首次证实了该源爆发上升和下降期间相同光度下存在吸积辐射的差异, 表现为特征光度附近脉冲比分演化特性存在显著差异 (Wang et al. 2020, 图 4-30)。

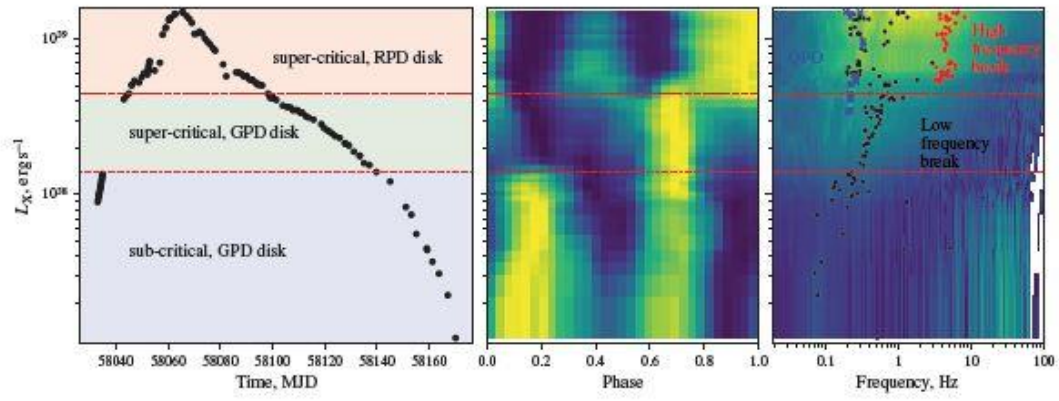


图 4-28 慧眼对银河系极亮源（ULX）Swift J0243.6+6124 完整爆发过程的观测（Doroshenko et al. 2020）。

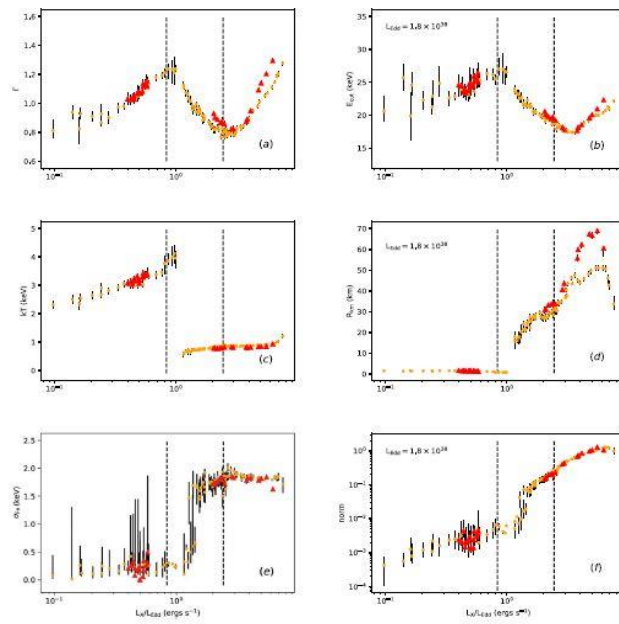


图 4-29 慧眼对银河系极亮源（ULX）Swift J0243.6+6124 爆发期间的能谱演化研究（Kong et al. 2020b）。

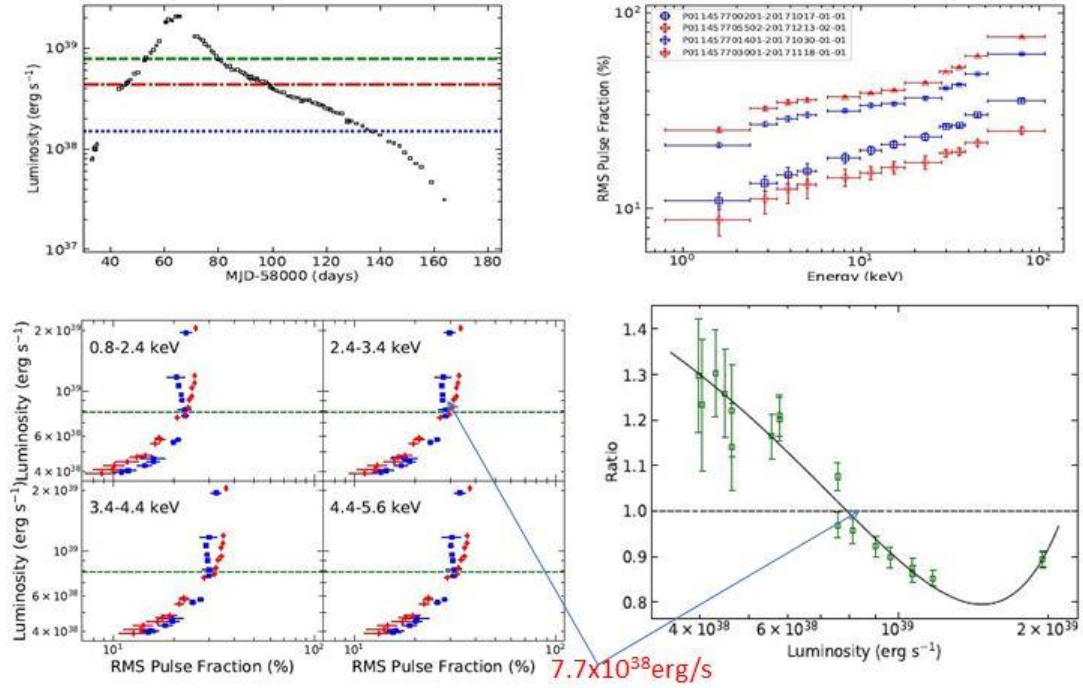


图 4-30 慧眼对银河系极亮源（ULX）Swift J0243.6+6124 爆发期间的脉冲比演化研究（Wang et al. 2020）。

慧眼还对黑洞暂现源 MAXI J1820+070 的爆发进行了完整的监测，积累了一百四十多次高统计观测数据，产出了丰富的科学成果：首次发现了该源在爆发的硬态期间，类喷流状的冕在下沉的同时，冕的物质加速外流的现象(You et al. 2021, 图 4-31)；使用该源在软态的慧眼高质量观测数据，基于连续谱的方法，精确测量了黑洞自旋，表明这个源是一个低自旋的黑洞系统，与之前的时变和能谱预测一致（Guan et al. 2021, Zhao et al. 2021，图 4-32）；研究了该源在硬态期间不同频率下的噪声随时间以及能量的演化，发现高频噪声的时间延迟演化与能谱的谱指数演化显著相关，表明高频时延很可能产生于喷流中的康普顿化过程 (Wang et al. 2020,图 4-33)。

慧眼对微类星体 GRS1915+105 处于超低态期间的耀发事件给出了高统计观测，首次发现耀发在千秒的时标上存在喷流和盘风相互转换的现象（Kong et al. 2021, 图 4-34）。

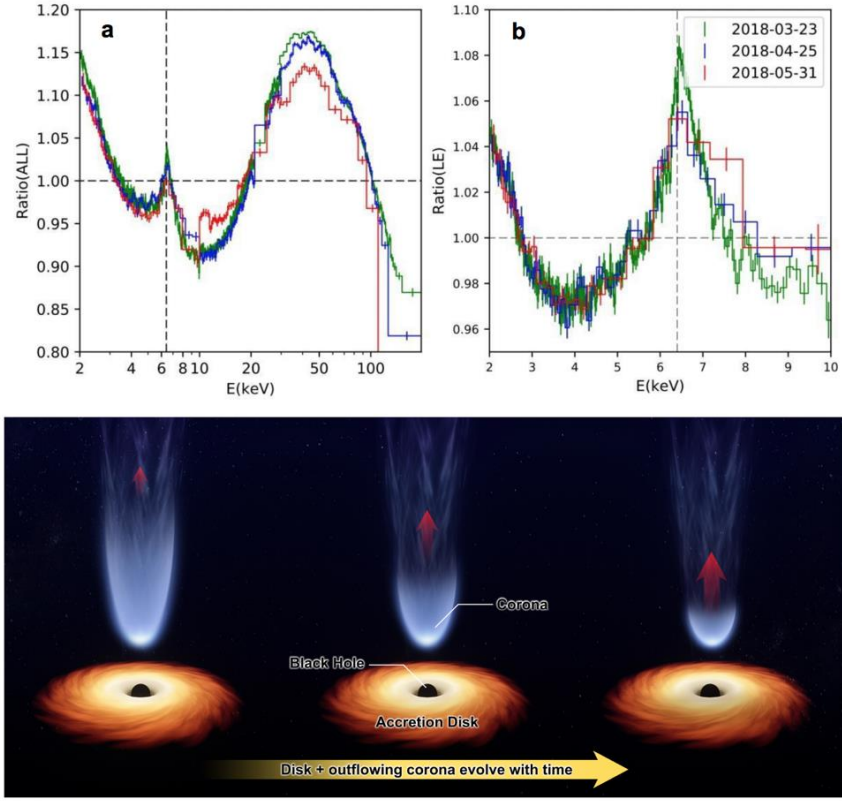


图 4-31 MAXI J1820+070 爆发期间冕和喷流内部的物质外流加速的现象(You et al. 2021)

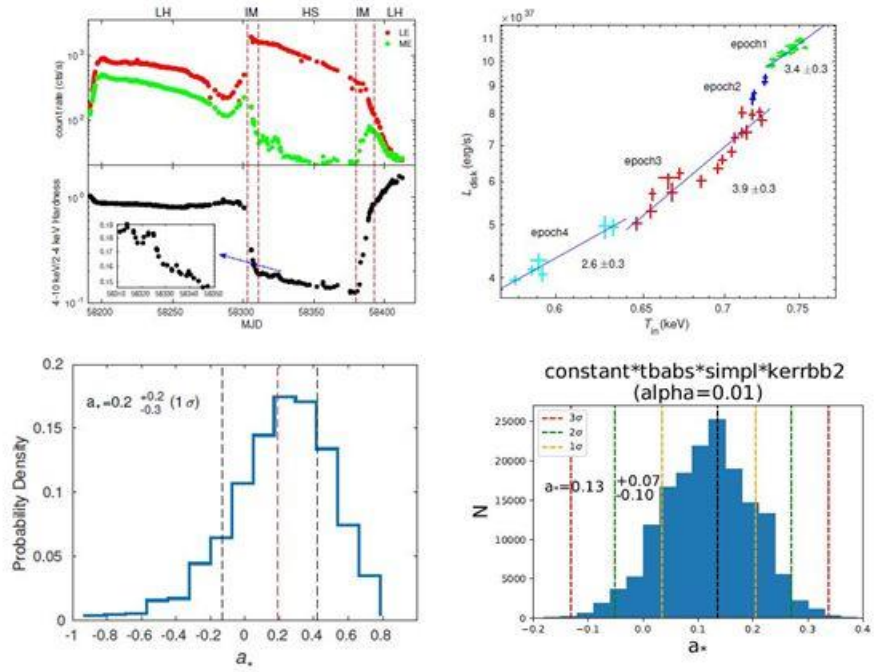


图 4-32 MAXI J1820+070 爆发期间采用连续谱测量黑洞自旋的结果 (Guan et al. 2021; Zhao et al. 2021)。

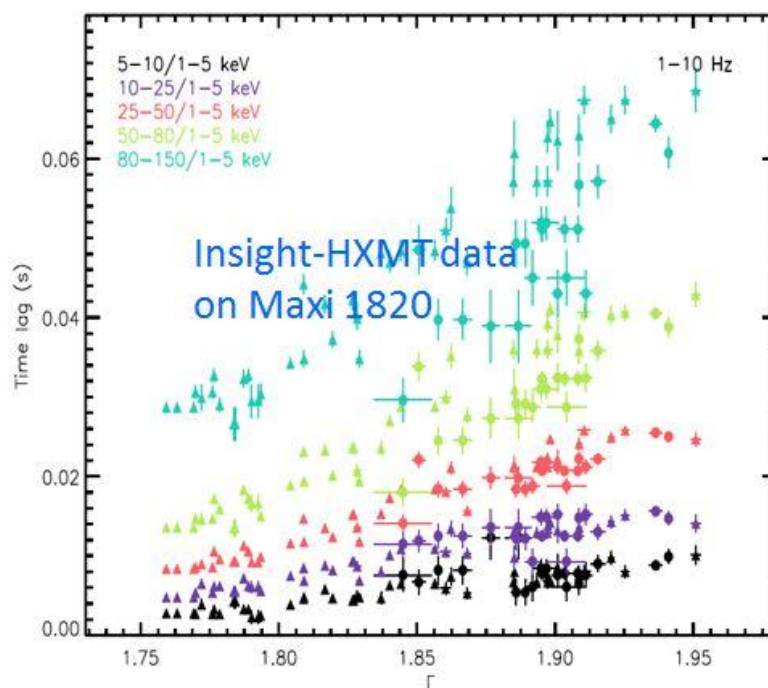


图 4-33 MAXI J1820+070 爆发期间噪声时间延迟同能谱指数相关分析 (Wang et al. 2020)。

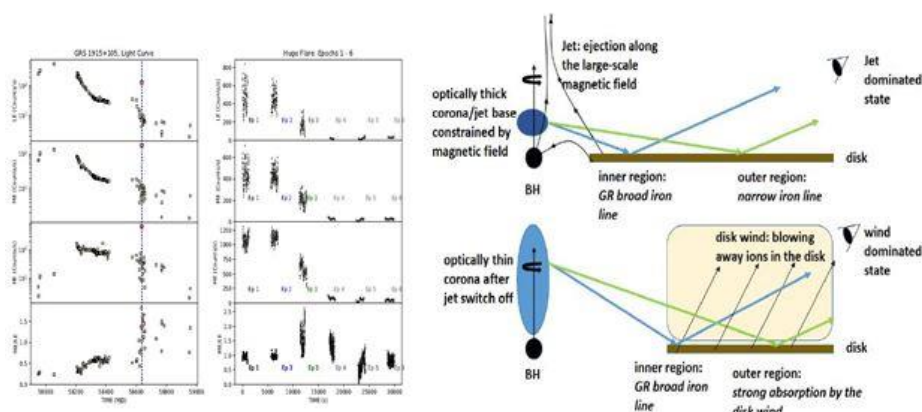


图 4-34 GRS1915+105 耀发期间喷流和盘风相互转换 (Kong et al. 2021)。

4.2.3.7 提案征集方向

观测的类型属于常规的定点观测类型。

提案需要针对具体的目标天体论述如何实现以下科学目标，并给出所需要的曝光量：理解黑洞附近吸积盘的行为并测量黑洞的自转；理解中子星的磁球性质并测量中子星的表面磁场强度；理解双星盘冕性质并测量其几何结构；理解喷流性质并研究其与盘冕的区别与联系等。

4.2.4 空间及地面协同和后随观测

慧眼-HXMT 在轨运行期间, 有 10 余个空间 X 射线天文设备以及其它能段 (如伽玛射线) 的空间高能天文卫星也同时在轨运行, 其中我国于 2020 年 12 月成功发射的引力波暴电磁对应体全天监测器 (GECAM) 是这个家族中的最新成员。如此多的空间高能天文设备同时在轨运行是创纪录的。它们将发现新的甚至新类型的高能天体。此外, 随着一系列多信使探测设备的运行, 将探测到更多的多信使事件: 地面引力波天文台已经发现第一个引力波暴发事件 (Abbott et al. 2016), 和第一个双中子星并合引力波事件 (Abbott et al. 2017a); 冰立方中微子天文台探测到了首个全天各向同性的高能中微子流 (Aartsen et al. 2013, 2014)。而利用多波段的后随观测, 人们寻找到了首例双中子星并合引力波事件的电磁对应体 (Abbott et al. 2017b), 也首次确认了高能中微子的电磁对应体 (IceCube Collaboration et al. 2018)。近期, 人们还首次发现了快速射电暴这一神秘天文现象的电磁对应体, 其中, 慧眼-HXMT 的观测对证认快速射电暴的磁星起源具有关键性的贡献 (Li et al. 2021)。此外, 慧眼-HXMT 的扫描巡天预期发现新的高能变源, 慧眼-HXMT 的扫描巡天监视研究也将发现已知源的新活动。这些都为组织多波段和多天文台协同和后随观测提供了目标源。主要研究内容如下:

- (1) 参与多信使时代的后随观测, 寻找和研究引力波和高能中微子的电磁对应体。在第一个双中子星并合引力波事件中, 利用多波段的后随观测, 人们寻找到了该事件的电磁对应体。慧眼卫星也参与到了这一历史性事件中, 并对该电磁对应体在 MeV 能区的辐射给出了最严格的限制 (Li et al. 2018)。此外, 慧眼卫星已经通过协议加入了引力波事件的后随观测组织, 慧眼卫星的科学运行系统也会优先保障后随观测所需的观测时间。慧眼卫星还多次参与对高能中微子电磁对应体的搜寻, 对高能中微子事件 MeV 能区的辐射给出了严格的限制。
- (2) 地面大视场光学设备会对某些天区进行持续多色巡天, 或是在慧眼卫星发现 X 射线源后及时观测以证认其光学对应体, 进行精确定位以便及时安排后续的多波段观测。一些大质量的 X 射线源在其进入 X 射线爆发态

前往往往会在光学和其它波段也会产生相应的光度变化，爆发前持续的光学巡天数据积累也有助于深入了解吸积物理。

- (3) 利用多波段协同观测手段研究 X 射线谱态跃迁伴随的射电、红外、可见光、紫外线，甚至到伽玛射线波段的喷流辐射转变，从而揭示喷流和致密天体自转的关系，以及谱态跃迁与喷流功率同非稳态吸积物理过程的联系，解决间歇性喷流是和致密天体自转有关还是和非稳吸积过程有关的问题。
- (4) 一些致密天体会在光学和 X 射线的光变曲线上出现准周期振荡现象。使用多波段联合观测，可以研究多波段准周期振荡的物理起源和演化。其中，新源 MAXI J1820+070 就在 2018 年的爆发中，在光学和 X 射线上同时出现了准周期振荡现象。慧眼卫星参与了对这个源的多波段联合观测，并首次在能量大于 200 keV 以上发现了低频准周期振荡。
- (5) 对慧眼卫星观测的自转驱动的脉冲星和伽玛射线双星将进行同时的射电观测和 Fermi 的伽玛射线观测，从更宽的能谱上研究它们的辐射机制、辐射区域和磁球性质，观测伽玛射线双星在近星点耀发时的多波段时延并探求耀发的本质。利用新疆天文台等单位对 Crab 脉冲星的联合观测，对慧眼卫星的时间系统进行标定；进行脉冲星的 X 射线-射电相位差及演化性质、脉冲轮廓、时间噪声、周期跃变、相位延迟、制动指数等的联合科学研究，进而对脉冲星的磁层模型进行限制。其中对于 Crab 的研究，目前成果丰富：利用慧眼卫星与射电望远镜的联合观测，我们证实了慧眼具有良好的计时观测精度；利用慧眼卫星和其它 X 射线卫星的联合观测，我们得到 Crab 脉冲星的脉冲能谱，标定和检验了仪器的响应文件；使用 Crab 多波段的观测，我们也观测到了 Crab 脉冲星最大的周期跃变期间存在 delayed spin-up 现象。
- (6) 利用丽江、兴隆的地面光学设备对致密天体双星光学对应体进行光谱和光变监测，测量伴星基本属性，测定致密天体的动力学质量，限制双星轨道倾角。同时，对于强变源将长期跟踪观测研究双星中吸积盘和吸积

过程的演化。

- (7) 对发现的黑洞 X 射线双星，在利用地面红外和光学等望远镜观测测定黑洞质量、距离和轨道倾角之后，利用慧眼卫星获得软态时的 X 射线能谱，使用连续谱拟合的方法测量黑洞自旋。
- (8) 研究回旋吸收线线心能量的跃变和该跃变的物理起源。Her X-1 的回旋吸收线线心能量在下降的趋势上会出现突然跃变的现象 (Staubert et al. 2021; Xiao et al. 2019)，利用慧眼卫星和其他卫星的协同观测，可以监测和研究回旋吸收线的能量变化。慧眼卫星在 2017 年和 2018 年分别与 NuSTAR 和 INTEGRAL 卫星进行了联合观测，观测到了该源回旋吸收线线心能量的变平证据。
- (9) 协同 GECAM、美国伽马射线望远镜 (Fermi) 搭载的全天伽马暴监测器 (GBM) 研究地球大气伽马射线闪 (TGF)。使用慧眼-HXMT、GECAM、Fermi/GBM 等国内外高能观测卫星和闪电观测网络，联合观测地球伽马闪和地球电子束事件，研究它们的辐射机制，及其对伽马暴、磁星暴发等高能天体暴发现象的探测和证认影响。
- (10) 慧眼-HXMT 发现首个跟快速射电暴成协的 X 射线暴，确认其来河内的磁星 SGR J1935+2154，并首先证认该 X 射线暴包含的两个 X 射线脉冲是该快速射电暴的高能对应体，见图 4-35 (Li et al. 2021)。而同时的 FAST 没有看到射电的活动，表明磁星-快速射电暴成协的观测现象背后存在复杂的物理过程。利用慧眼卫星的长时间定点观测，结合 FAST 等射电设备的同时观测，对处于活跃期的磁星在宽能段实施高时间分辨率的耀发和演化研究，对理解快速射电暴的产生和辐射机制十分重要，可以有效推进该领域的研究。

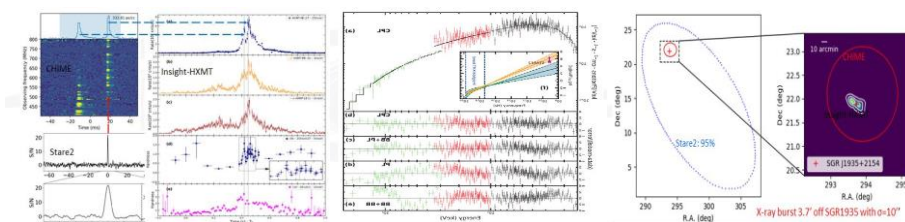


图 4-35: 慧眼联合射电观测 FRB 200428, 以及慧眼证认 FRB 起源于磁星 SGR J1935+2154 (Li et al. 2021)。

5 观测模式

5.1 简介

本次科学观测提案只涉及慧眼卫星的两种观测模式。这两种工作模式的切换通过调整卫星姿态来实现。

- (1) 定点观测，对准惯性空间（天空）某一方向进行长时间观测。又分为正轴定点观测和偏轴定点观测两种。
- (2) 小天区扫描，卫星通过扫描完成对特定小天区的深度扫描观测，实现 $7^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 半锥角天区的全覆盖。利用此观测模式可以实现银道面等天区的扫描和监测。

5.2 定点观测模式

定点观测模式采用三轴稳定惯性定向的方式来实现。定点观测过程中，卫星+X轴（载荷光轴）指向观测目标，太阳矢量与卫星星体-Z轴为锐角。在某个目标的一次定点观测过程中，卫星姿态保持不变，太阳帆板保持稳定。

非爆发源定点观测时，为达到中能和低能载荷的温控需求，同时保证星敏感器正常工作，太阳避免角应大于 70° ，即卫星星体+X轴与太阳矢量的夹角在 $70^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 之间。为了避免太阳照射到探测器上，除了满足太阳避免角以外，还需要考虑太阳从侧面照射到探测器的情况，因此一次定点观测最长时间不超过 20 天。

地球遮挡在慧眼卫星观测过程中基本上无法避免，综合考虑地球半径、地球反照和探测器视场，可认为遮挡期间以地球中心为中心，角半径 83° 范围内的源不可见。月球遮挡考虑为以月球中心为中心， $15.5'$ 范围内的源不可见。

5.3 小天区扫描观测模式

小天区扫描观测是一种局部天区深度扫描观测，它对惯性空间中一个 n 度（ $7^{\circ} \leq n \leq 10^{\circ}$ ）角半径的圆区域进行深度成像观测，要求实现对小天区的扫描全覆盖。考虑到卫星控制系统实际的操作性，即每次只绕卫星的某一本体轴单轴转

动，将实际的天区扫描范围扩大到一个以该圆区域为内切圆的菱形区域，也可以实现所要求圆区域的全覆盖。

为保证天区扫描的重叠率，根据卫星平台的实际能力，选择了逐行扫描的方式，扫描方式示意图如图 5-1 所示。图中点 O 为指定扫描圆区域的中心，圆为待观测的圆区域，带箭头虚线部分为扫描路径，沿着行扫方向扫描时，扫描速率为 $0.01^{\circ}/\text{s}$ 、 $0.03^{\circ}/\text{s}$ 、 $0.06^{\circ}/\text{s}$ 可选，扫描方向沿着行扫方向转向的时间固定，相邻两次行扫的扫描行间距从 0.1° 到 1° ，间隔 0.1° ，扫描区域大小在 $14^{\circ} \times 14^{\circ}$ 到 $20^{\circ} \times 20^{\circ}$ 范围内。一次小天区扫描持续时间一般在 2.3 小时到 5 天。

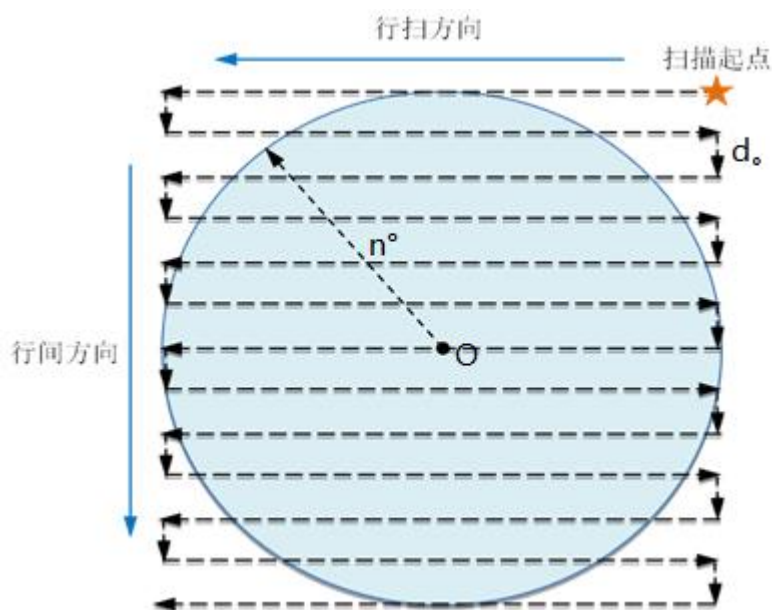


图 5-1 小天区扫描方式示意图。

对某一天区的观测时间不同，将会导致观测点与太阳矢量相对方位不同，所确定的卫星惯性坐标系就会不同，因此通过卫星本体轴单轴旋转扫描出的菱形区域与圆区域相切的方向也会有所差异。但不论以何种方向相切，扫描的菱形区域均可将待观测的圆区域完全覆盖。

利用这种观测模式可以实现银道面以及其它小天区的扫描和监测。

6 本底

6.1 在轨本底估计方法

慧眼卫星的设计考虑了盲探测器以及大小视场的组合探测器,本底估计可以综合采用组合视场、偏轴观测和利用盲探测器及其他辅助探测器的数据建模的方法来实现。组合视场的方法是通过视场大小不同的探测器(大视场,小视场,盲视场)来测量并解算出源强,粒子本底以及弥散本底;偏轴观测方法是将待测点源偏离视场的中心,由于载荷视场沿着长边方向按照 60 度的夹角分了 3 组,偏轴的结果是可以使得 1 组或 2 组探测器观测本底,另外的 2 组或 1 组探测器观测源。盲视场探测器是慧眼卫星的一个创新设计,基于盲探测器本底测量结果,采用对盲探测器同其它探测器本底差异进行建模的方法,也可以得到向源的本底估计。目前,慧眼卫星所采用的正是基于盲探测器的本底估计方法,详细情况可见 6.4 节。

6.2 本底成分模拟研究

慧眼卫星共携带 HE、ME 和 LE 三种不同能段的探测器。慧眼卫星运行在轨道高度 550 km 轨道倾角 43 度的近地圆轨道,其在轨运行期间将会与各种不同的空间成分(粒子,光子)相互作用,产生不同的本底成分。按照本底计数的时间特征来分类,可以将本底分为延时成分和瞬时成分。前者由被活化的探测器物质衰变产生,后者由空间成分与探测器相互作用的瞬间产生。现阶段主要有 2 种延时本底成分以及 4 种瞬时本底成分被详细考虑,其中 2 种延时成分分别为:卫星经过南大西洋异常区的延时本底(SAA),宇宙高能质子造成的延时本底(CRP_D)。4 种瞬时成分分别为:宇宙高能质子造成的瞬时本底(CRP_P),地球大气反照伽马光子(Albedo),非孔径入射的宇宙弥散 X 射线背景(CXB_N),以及孔径入射的宇宙弥散 X 射线背景(CXB_A)。

基于慧眼卫星的质量模型,利用 Geant4 模拟软件,可以模拟探测器对不同方向不同入射成分的响应。再结合已知的空间各主要成分(质子、 γ 射线和 X 射线)的辐射情况(谱形和流强),就可以模拟不同空间成分在探测器上产生的本底。现有的模拟工作可以给出不同方向入射条件下的 2 种延时成分(SAA &

CRP_D)的延迟衰减曲线,以及 4 种瞬时成分(CRP_P、CXB_N、CXB_A & Albedo)产成的本底。各种本底的贡献见图 6-1 : LE 的本底主要是高能端的 CRP 成分以及低能端的 CXB 成分; ME 的本底在全能段主要由 CRP 成分主导; HE 的本底由 SAA 延时、质子本底延时以及地球大气反照主导。

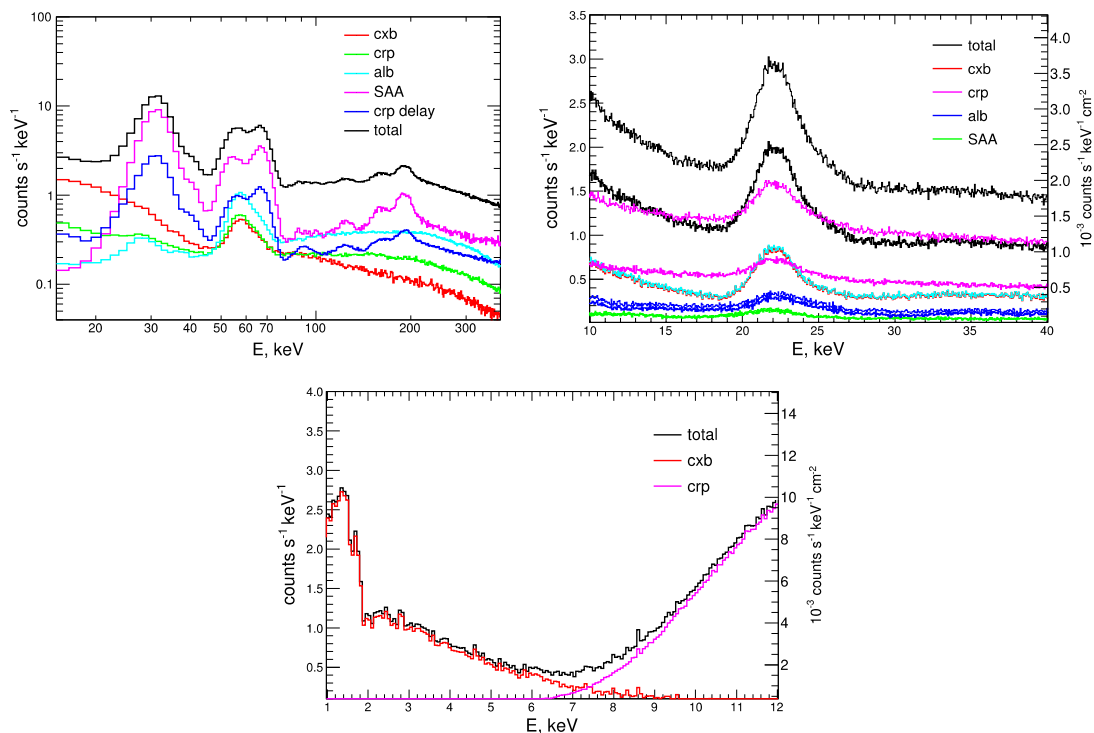


图 6-1 慧眼卫星三个载荷(上左: HE, 上右: ME, 下: LE)的模拟本底谱成分(Zhang et al. 2020)。

利用这些不同本底成分的模拟响应数据,综合考虑包括入射粒子的空间各向异性效应,地球对不同角度的高能质子以及 X 射线的周期性屏蔽,地球作为伽马射线光源对卫星不同角度的周期性照射,以及探测器对于不同方向入射粒子响应的差别,可以估计各探测器任意时刻的基本本底水平。通过构建不同观测模式下的本底模型,估计一系列本底模型参数,以及这些模型参数的时间演化特征,分析得到不同观测模式下的本底误差的估计。

模拟结果表明,对于延时本底来说,各个探测器单体之间的本底形状(本底计数率随着时间的演化)相近。因此,各个单体的延时本底可以用相对于盲探测器的比例系数来表征。高能探测器的瞬时成分有 4 个,分别是 CRP_P, Albedo,

CXB_A, 以及 CXB_N。当不考虑地球遮挡效应以及空间各向异性时, 仅 CRP_P 受到地理坐标调制, 呈现出周期变化, 其他 3 种成分保持恒定。当考虑地球遮挡效应以及空间各向异性时, 由于探测器对于不同方向入射粒子的响应有差别, 各成分在每一次定点观测中, 均表现出周期性变化。地球对于卫星的覆盖立体角约为 $1/3$ 个天区, 对于 Albedo, 地球作为光源可以认为是均匀的, 详细的计算表明其作为面光源不均匀性可以忽略。对于 CXB_N, 同样可以忽略空间不均匀性造成的影响。

卫星发射前, 我们基于 Geant4 工具包, 构建了慧眼卫星整星质量模型, 开发了慧眼卫星模拟程序。不仅可以用于估计慧眼卫星在轨本底水平, 而且整星质量模型也可以用来做高中低能探测效率、psf 和响应矩阵分析。这些结果可用于 GRB 定位、在轨 arf 和 rsp。并且本底谱上的荧光峰以及材料活化引起的谱线还可以用于在轨 E-C 关系以及能量响应的分析。

通过 Geant4 模拟可以得到高中低能望远镜的本底水平, 本底能谱以及本底随着轨道和卫星在轨运行时间的演化。例如, 对于 HE 来说, 卫星运行初期延时成分 ~ 30 keV 和 ~ 190 keV 增长的很快, 50-70 keV 的活化峰增长慢, 并且在 1 年后也趋于饱和。这些模拟结果将有助于理解在轨测量得到的本底数据。

6.3 在轨实测本底分析

(1) 实测本底同模拟比较:

- 在轨观测本底数据的分析表明, 慧眼卫星的 HE 在轨本底水平同模拟结果大致相当。ME 和 LE 的在轨本底由于存在光污染等问题变得更为复杂一些, 因此, 对于 LE 和 ME 的在轨本底建模工作而言, 后期的本底模拟分析工作需要继续开展, 以便得到更好的 LE 和 ME 的在轨本底。

(2) 在轨实测本底特点:

- LE 实测本底特点: 地磁调制明显, 低地磁刚度区本底显著高于高地磁刚度区, 由于存在大量低能电子, 因此全遮挡探测器在低能段并不为 0, 且同样受地磁调制。低能段 CXB 主导, 高能段粒子本底主导。

- ME 实测本底特点：ME 的本底能谱主要由粒子本底主导，低能端具有噪声峰，高能段具有超阈峰。本底水平受地磁调制明显。
- HE 实测本底特点：HE 的本底能谱主要是粒子本底主导，而粒子本底又可分为延时本底与瞬时本底。延时本底随着卫星在轨运行将逐步升高并逐渐趋于饱和，瞬时本底受地磁调制明显。

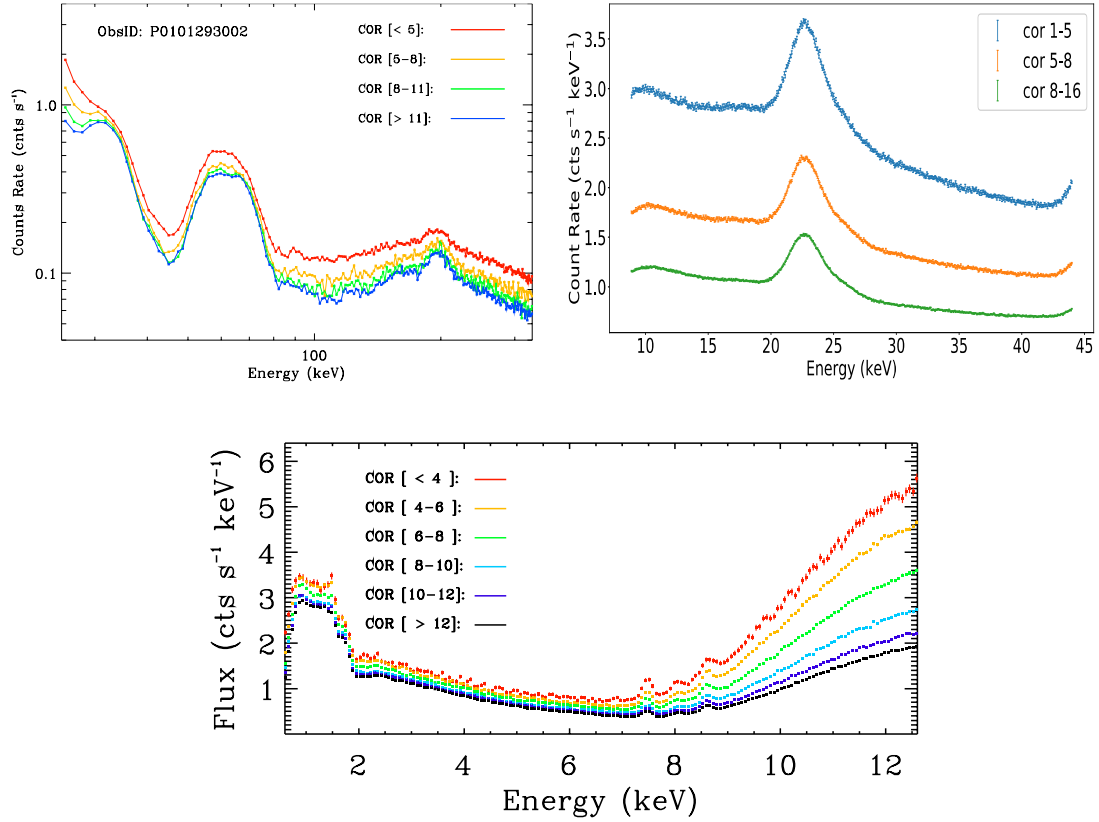


图 6-2 不同地磁刚度下三个载荷（上左：HE，上右：ME，下：LE）的本底能谱（Liao et al. 2020a, 2020b; Guo et al. 2020）。

6.4 在轨本底模型

慧眼卫星上搭载的低能望远镜、中能望远镜以及高能望远镜，各自属于不同类型的探测器，因此当卫星在轨运行时具有不同的本底特征。我们针对各载荷不同的特点，结合慧眼例行的空天区观测（平均每月 10 次，每次 3ks），分别构建高中低能望远镜的在轨本底模型。

对于高能望远镜，我们首先利用历史本底数据库，得到各探测器本底的时间演化函数，继而得到某次观测时的预计本底能谱；再利用这次观测时盲探测器的计数率水平对预计本底能谱进行修正，最后得到高能探测器的本底能谱。对于中能望远镜，本底估计的基本流程和高能望远镜类似，但由于本底的时间演化特征并不明显，所以其预计本底能谱可由本底数据库直接得到。对于低能望远镜，由于其粒子本底的谱形在不同的参数组合下变化很小，因此本底模型较中能望远镜更为简化。我们首先通过本底数据库得到粒子本底谱形，然后用盲探测器进行强度估计。对于低能望远镜低能端的弥散本底，我们则通过银道面扫描巡天和高银纬的空天区观测进行估计。

通常情况下，慧眼-HXMT 使用正轴观测模式（目标源位于视场中心），将全遮挡探测器作为本底监测探测器，用于进行本底的能谱强度的修正；而对于偏轴观测模式（目标源偏离视场中心，且只存在于部分探测器的视场中），则是将非向源探测器作为本底监测探测器。各载荷的本底模型将给出不同观测时期各种物理条件（地理位置，空间环境，探测器状态）下的本底监测探测器与目标源观测探测器的本底对应关系，以更为精确的对各载荷的本底进行估计。目前，在有效曝光时间 2ks 时，高能望远镜 HE 本底估计的系统误差为~2.6%（26-100 keV），中能望远镜 ME 本底估计的系统误差为~1.9%（8.9-44 keV），低能望远镜 LE 本底估计的系统误差为~3.2%（1-10keV）。图 6-3 到 6-5 分别是慧眼卫星高能，中能以及低能望远镜本底估计的相关结果。

本节更多细节可参考 Liao et al. (2020a, 2020b)和 Guo et al. (2020)。

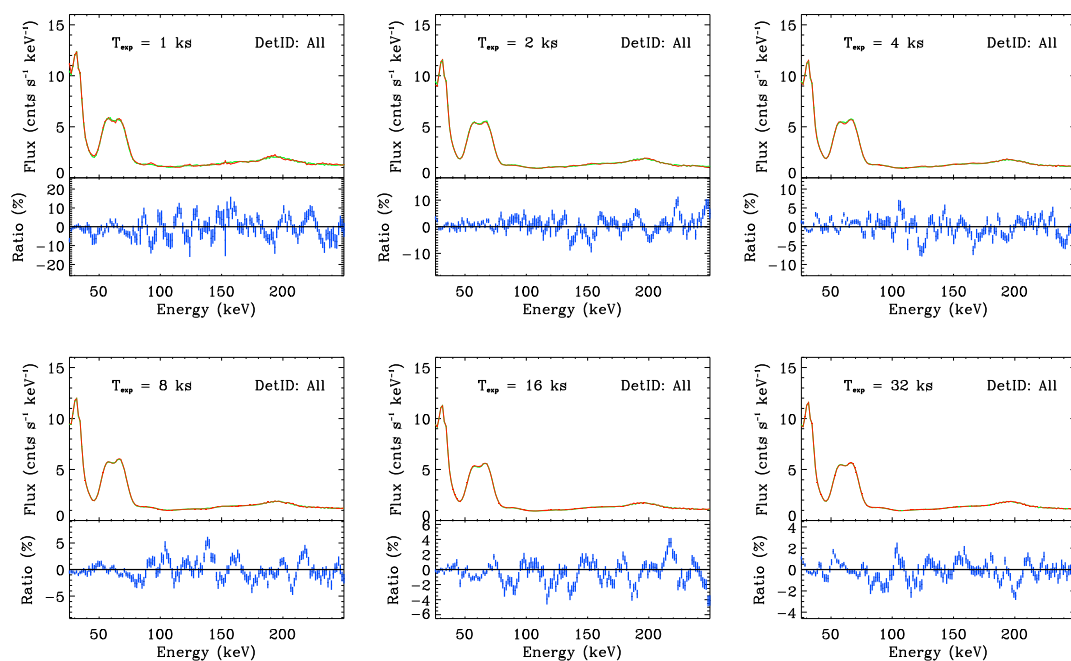


图 6-3 不同曝光时间下的 HE 本底能谱检验例子。上图：绿色是观测本底谱，蓝色是估计本底谱；下图：残差与数据的比值。

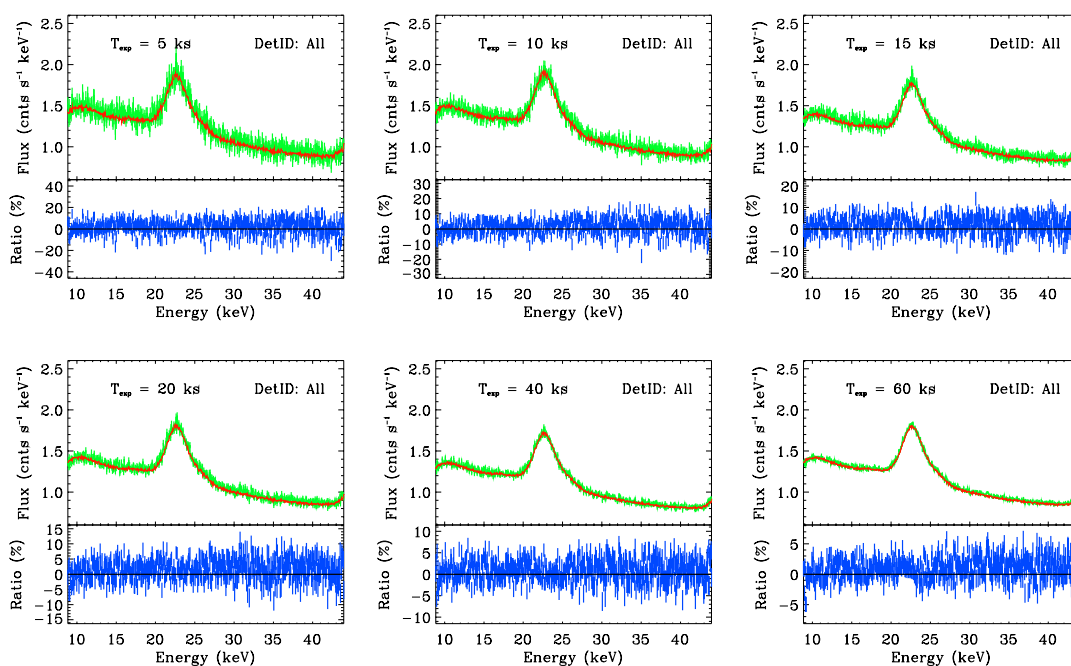


图 6-4 不同曝光时间下的 ME 本底能谱检验例子。上图：绿色是观测本底谱，蓝色是估计本底谱；下图：残差与数据的比值。

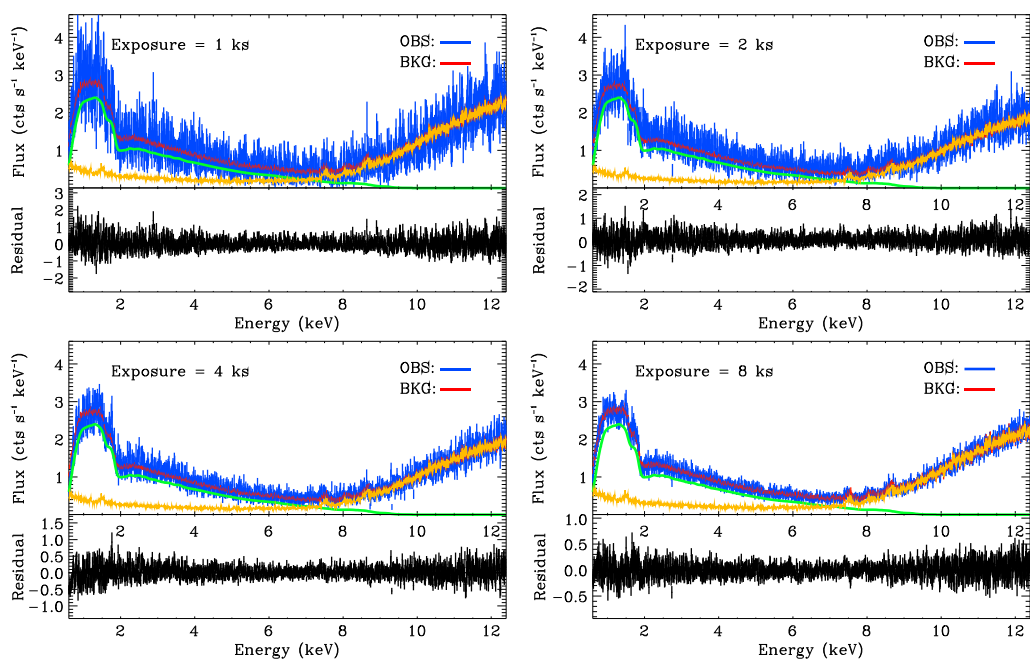


图 6-5 不同曝光时间下的 LE 本底能谱检验例子。上图：蓝色是观测本底谱，红色是估计本底谱（绿色弥散背景+黄色粒子本底）；下图：残差与数据的比值。

7 探测器响应

本章更多细节可参考 Li et al. (2020), Luo et al. (2020), Li et al. (2020), Zhao et al. (2019), Xiao et al. (2020)和 Nang et al. (2020)。

7.1 在轨增益和能量分辨率的标定

HE 载荷在空天区观测或者进入地球遮挡区时,测量能谱上会出现 4 条线谱,如图 7-1 所示,这些谱线是探测器材料被带电粒子活化后退激产生的,可以用来进行 EC 标定。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评估 HE 18 个单体在轨的能量分辨率变化。

同时,我们还利用 191 keV 处线谱的峰位和在轨携带的 ^{241}Am 放射源的 59.5 keV 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,发现在轨 3 个月后所有单体的增益和能量分辨率保持不变(见图 7-2 和图 7-3 所示)。

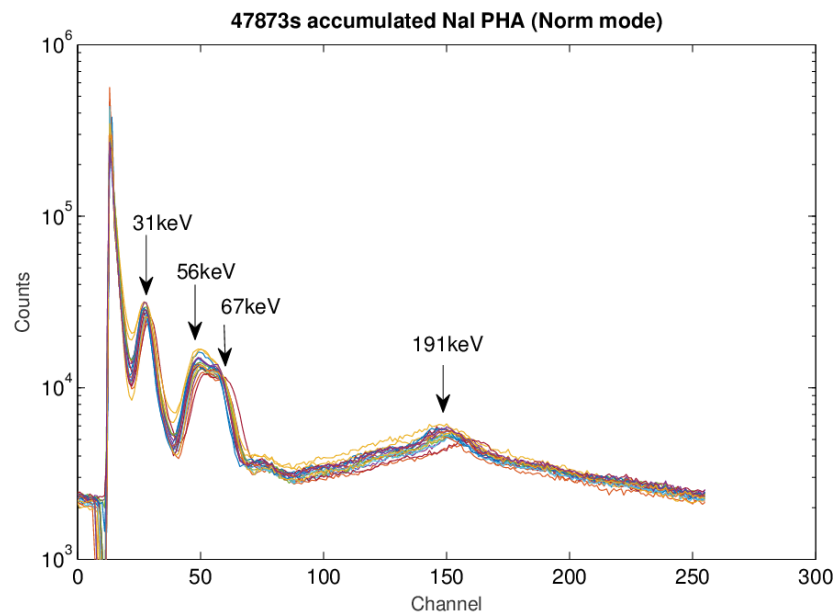


图 7-1 HE 对空天区观测时 18 个 NaI (Tl) 晶体测量的能谱, 4 条谱线用于标定在轨的增益系数 (Li et al. 2020)。

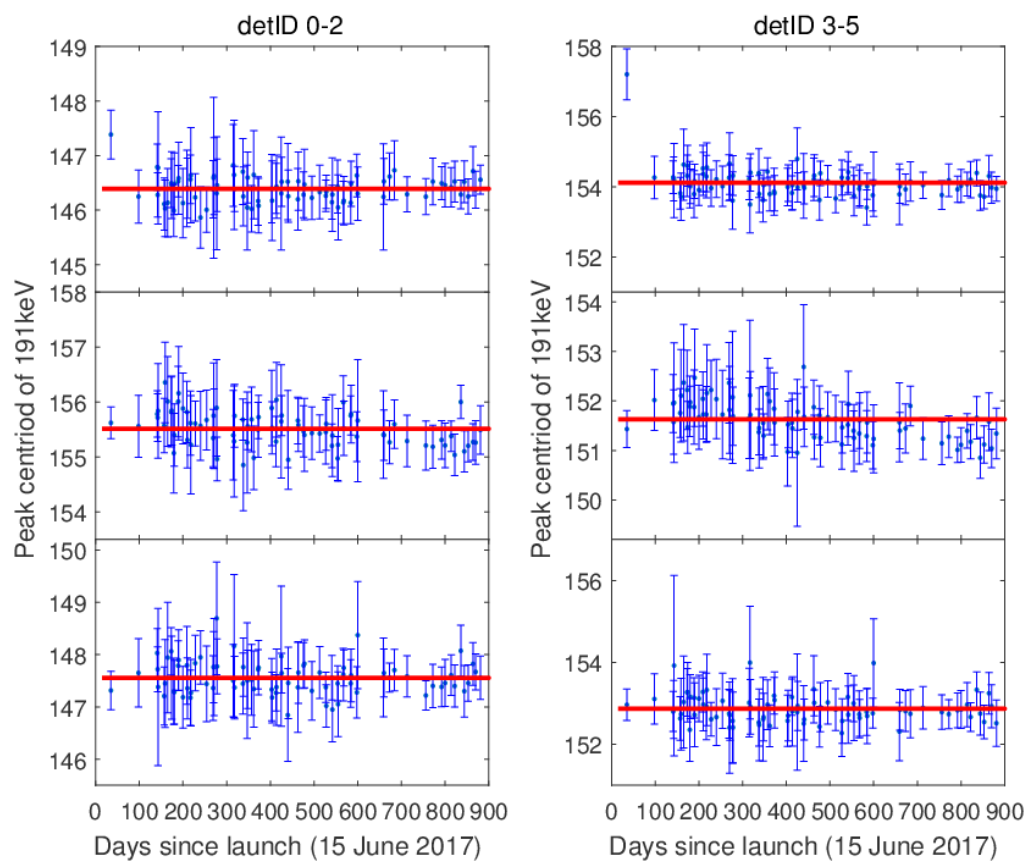


图 7-2 HE 0-5 号单体的 191 keV 线谱中心值随时间的变化 (Li et al. 2020)。

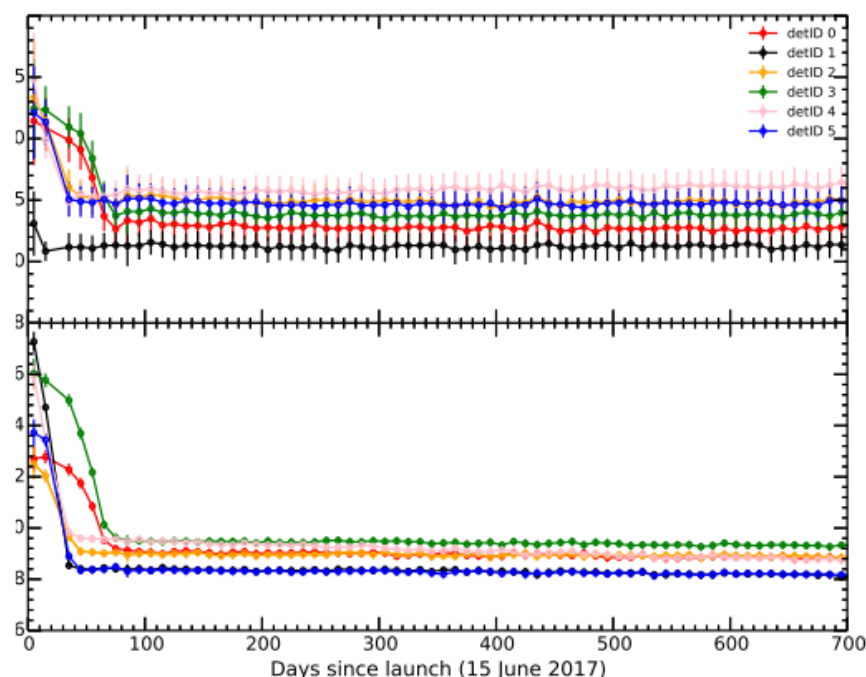


图 7-3 上图显示了 HE 0-5 号单体 ^{241}Am 59.5 keV 峰位随时间的演化，下图显示了 59.5 keV 的宽度随时间的演化。在轨 90 天后，放射源的峰位和宽度分别稳定在 0.01 道和 0.02 道（Li et al. 2020）。

ME 每个机箱在轨携带了 2 个 ^{241}Am 放射源，可以照射 8 个 Si-PIN 像素。累积空天区观测时放射源的能谱，并利用地面标定的 EC 关系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，可以获得空天区观测时，能谱上的银线峰位（22.5 keV）。如图 7-4 所示是在轨携带 ^{241}Am 放射源的像素的峰位和未携带放射源像素上的 Ag 线峰位随时间的变化，5 个线的峰位随时间有缓慢的增加，一个线性的函数可以用来描述这种演化，截止目前，这些峰位增加不到 1%。在目前已经发布的用户软件（HXMTDAS V2.02），这种增益随时间的缓慢变化还未加入到软件中。

在轨携带 ^{241}Am 的像素能量分辨率随时间的变化如图 7-5 所示，能量分辨率随时间有缓慢增加，截止在轨 700 天时，能量分辨率变高了 0.5%，尽管有一些温度效应导致的结构，但是这种变化是非常小的，因此在轨我们仍然采用地面标定时的能量分辨率。

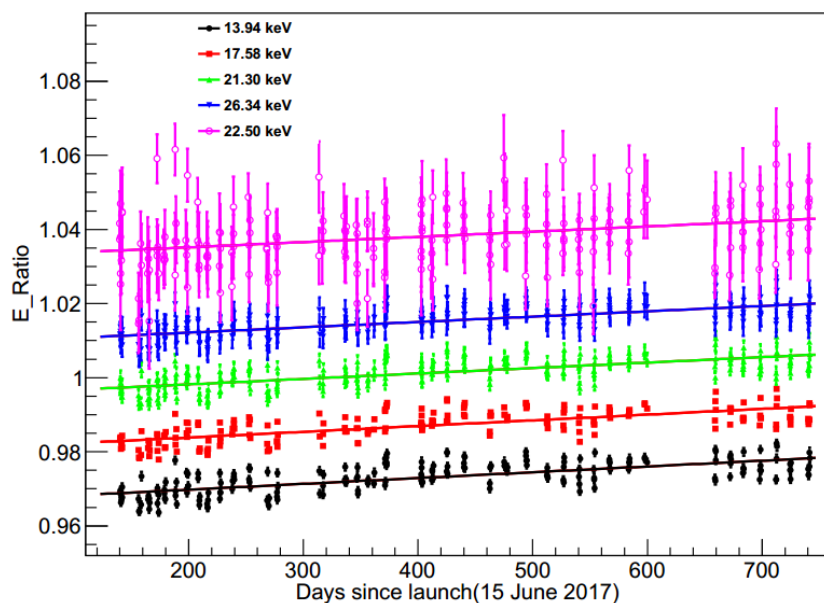


图 7-4 ME 在轨携带放射源的像素的 4 个峰位和未携带放射源像素的 Ag 线峰位随时间的变化，

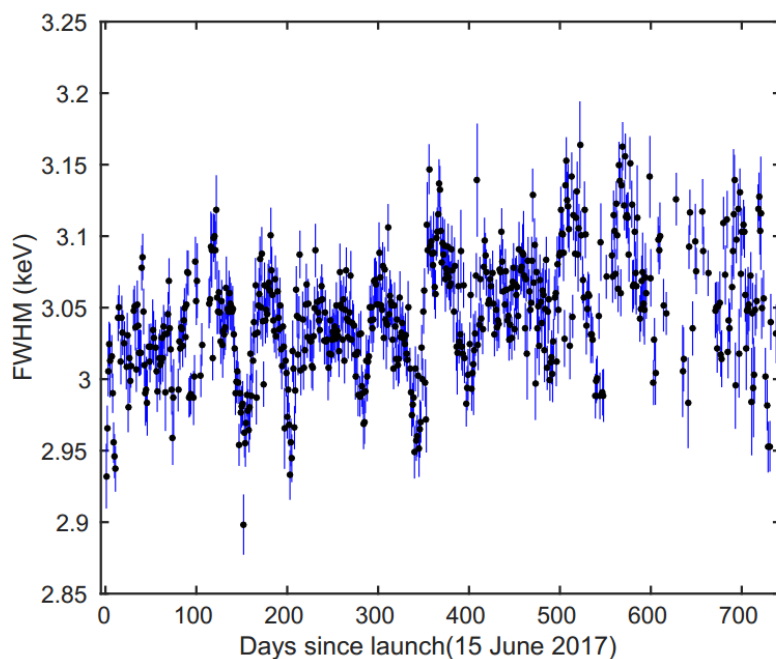


图 7-5 ME 在轨放射源像素的 FWHM 随时间的变化，在轨 700 天后，FWHM 增加不到 0.5% (Li et al. 2020)。

LE 利用超新星遗迹 Cas A 观测的线谱和空天区观测的本底线来检验 LE 地面标定时给出的 EC 关系。利用 XMM/MOS 对 Cas A 的观测数据，获得 Cas A 各个线谱的期待能量。利用地面的 EC 关系得到的不同观测时期时各线谱的能量与期待能量的差不是线性的，如图 7-6 所示。Cas A 的线谱峰位随时间缓慢变小，如图 7-7 所示，我们用二次函数来描述峰位随时间的演化。因此任意观测时间上的峰位都可以根据演化函数获得即使由于太阳避免角的限制导致 Cas A 不能观测时。根据图 7-7 的残差结构以及图 7-8 的二次函数得到的结果，我们还需要用三次函数来修正地面标定给出的能量，如图 7-9 所示。

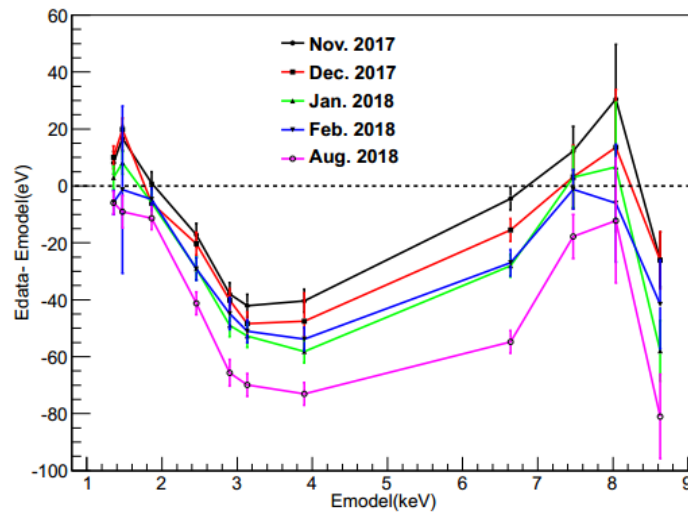


图 7-6 Cas A 和空天区观测时各线谱利用地面 EC 后得到的能量与期待能量的差 (Li et al. 2020)，横坐标是 Cas A 各个线谱和本底图 7-9 谱线的模型能量，纵坐标是用地面 EC 得到的各个线谱的能量与模型能量的差异，不同颜色代表不同的观测时间。

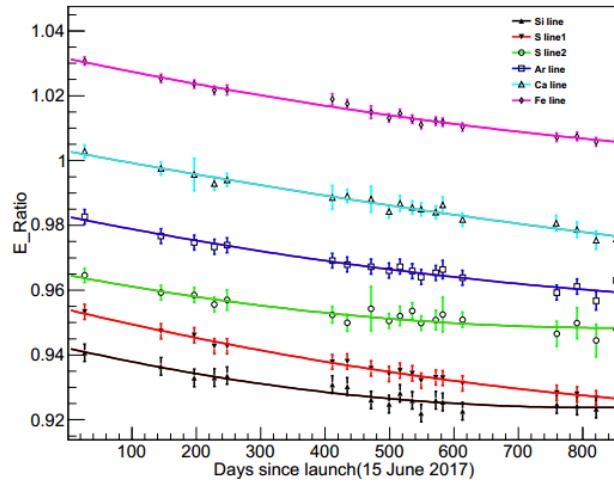


图 7-7 用地面 EC 得到的 Cas A 线谱的峰位能量随时间的演化，二次函数可以用来描述这种演化（Li et al. 2020）。

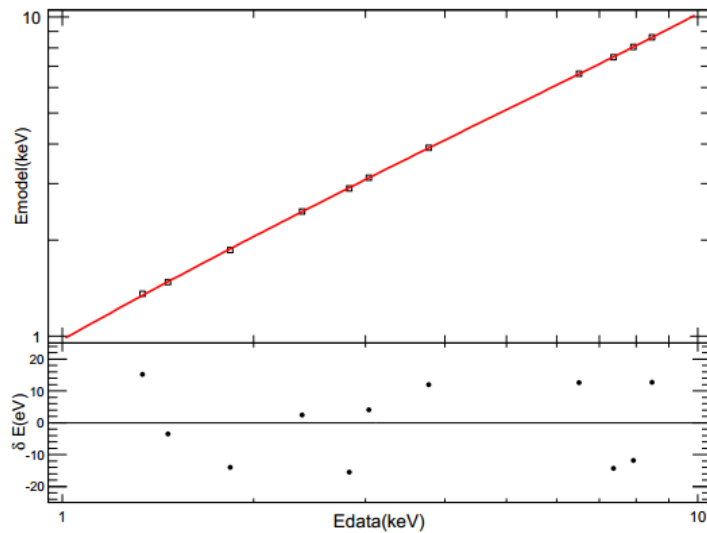


图 7-8 Cas A 各线谱的能量的修正用三次函数的拟合，X 轴的能量可以从图 7-7 的演化二次函数获得，Y 轴能量为各个线谱的模型能量，由于数据点的误差很小，这里可以忽略（Li et al. 2020）。

利用地面标定时响应文件联合拟合 Si, S, Fe 在不同观测时期的线谱宽度及 XMM/MOS 观测的这些线谱宽度,如果 LE 的能量分辨率与地面标定时一样,则 Si, S, Fe 的本征宽度应该与 XMM/MOS 的拟合结果一致。实际上, LE 拟合出来的本征宽度要大于 XMM/MOS, 因此 LE 在轨的能量分辨率发生了变化。再

减去 Si, S, Fe 的本征宽度后，我们获得了 Si, S, Fe 在不同观测时期和温度下的额外展宽，如图 7-9 所示，我们用时间和温度的二维函数来描述 LE 的宽度变化。函数 ($\text{Sigma (eV)} = A * E + B$) 用来描述在轨的额外展宽随能量的变化如图 7-10 所示。

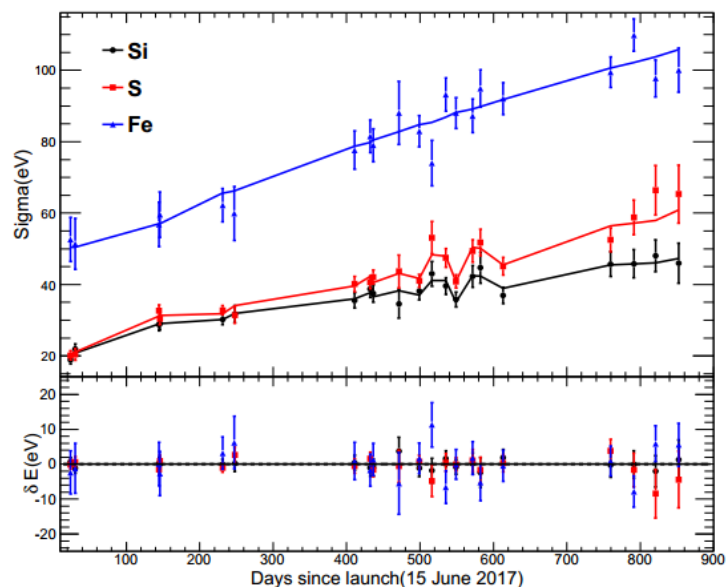


图 7-9 Si, S, Fe 线谱在不同观测时期和温度下的额外展宽。温度和二维函数拟合的残差在 10 eV 以内 (Li et al. 2020)。

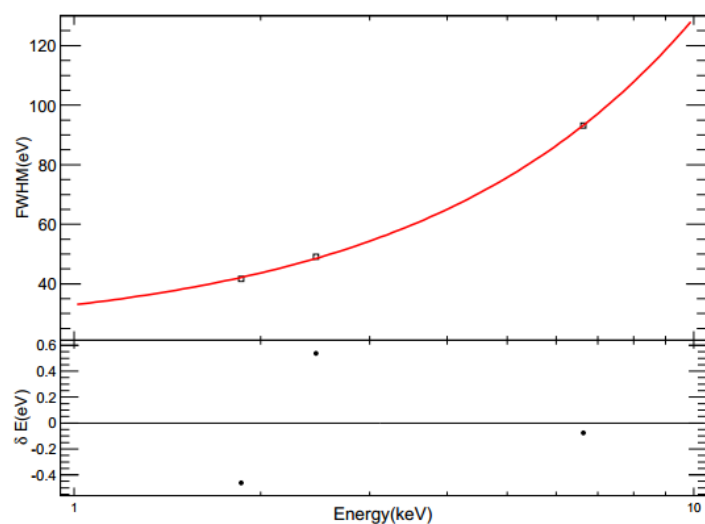


图 7-10 LE 的额外展宽可以用一次函数来描述其随能量的变化 (Li et al. 2020)。

7.2 有效面积的标定

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率谱（归一化系数为 $8.76 \text{ keV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，谱指数为 2.11，中性氢吸收系数为 $0.36 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ），因此经常被当做硬 X 射线望远镜的在轨标定源。慧眼卫星，作为准直型的望远镜，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。在轨我们在扣除本底后，利用新的能量分辨率来模拟在轨有效面积，可以得到如图 7-11（b）的静计数和模型计数的比值。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。3 个载荷在轨本底的水平如图 7-11（a）的黑点所示。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 7-11（c）所示，大部分能段的残差都在 2% 以内。

最后我们给出三个载荷在能谱拟合过程中各个能段的系统误差大小如下：HE 在 28-120 keV 的系统误差优于 2%，在 120 keV 以上的系统误差在 2%-10%；ME 在 10-35 keV 的系统误差为 1.5%；LE 的系统误差在 1-7 keV 之间的系统误差在 1%，在 7-10 keV 之间的系统误差为 2%。

2020 年 6 月 25 日，为了降低噪声峰的影响，我们提高了 LE 的阈值，导致在 1.8keV 以下的有效面积受温度影响非常大。因此对于 2020 年 6 月 25 日之后观测的 LE 数据，建议其有效能段选取为 2-10keV。

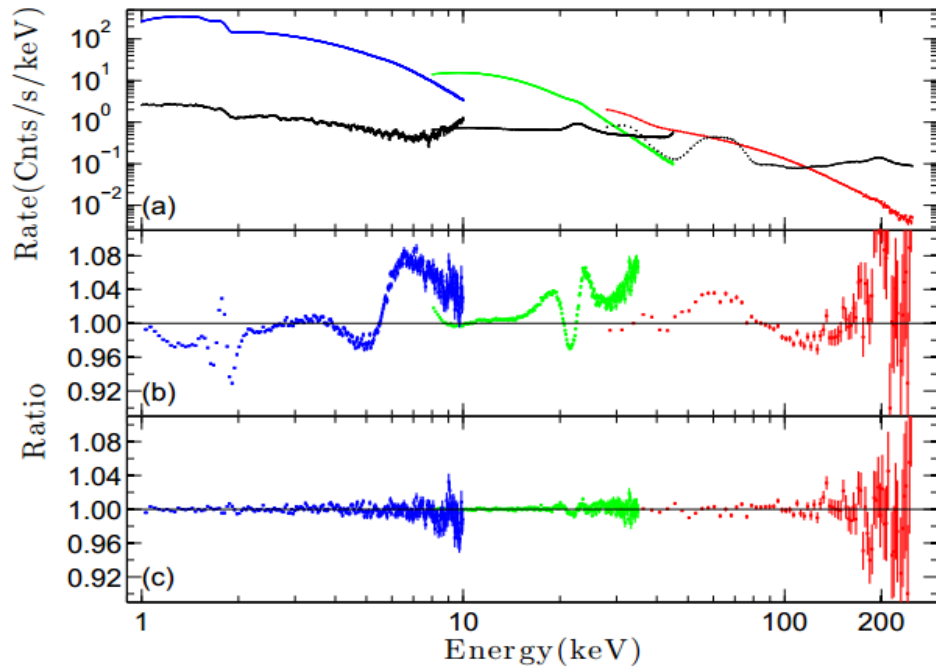


图 7-11 Panel (a) 是三个载荷在轨测量的扣掉本底后的净能谱，蓝色是 LE，绿色是 ME，红色是 HE，红点是三个载荷在轨估计的本底能谱。Panel (b) 和 (c) 是有效面积标定前后，Crab 的净计数率和模型的比值 (Li et al. 2020)。

7.3 PSF 的标定

利用在轨对 Crab 小天区扫描的数据完成了高中低能望远镜的 PSF 的标定，使用更新后的 PSF，HE/ME/LE 的系统误差从 14.8%、3.8%、5.7%减少到 1.8%、1.6%、2.7% (如图 7-12 所示)。

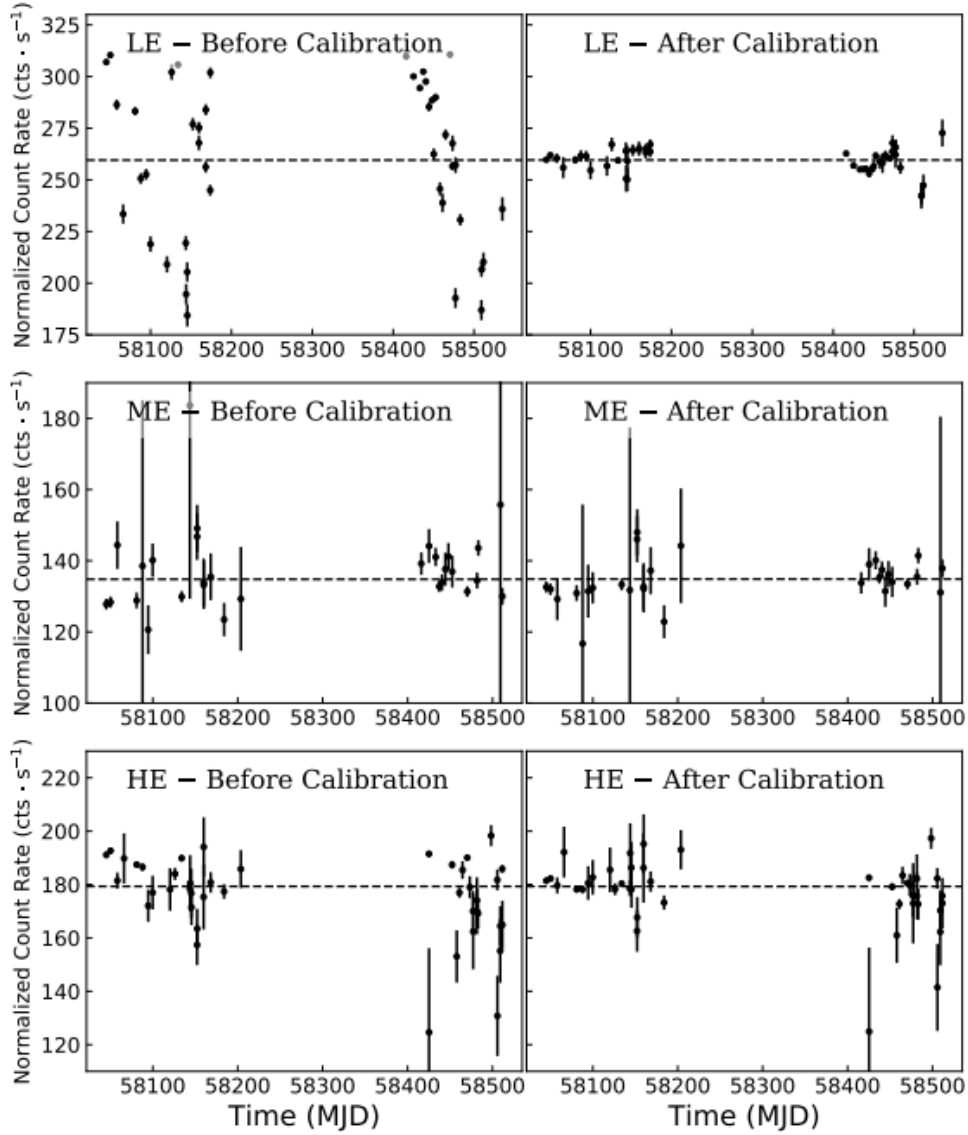


图 7-12 三个载荷在标定前、后对 Crab 的流强监测曲线 (Nang et al. 2020)。

7.4 时间精度的标定

利用 Crab 的脉冲信号对慧眼卫星的时间系统进行标定。在 Crab 可见的时间内，联合新疆天文台 25 米射电望远镜，云南天文台 40 米望远镜，上海天马望远镜和 FAST 望远镜进行了联合观测。图 7-13 显示了不同望远镜计时残差的分布。慧眼卫星得到的计时残差分布与其他望远镜一致，说明时间系统是准确的，从慧眼卫星计时残差可以得到残差的均方差为 $51 \mu\text{s}$ ，可见慧眼的绝对时间精度好于 $100 \mu\text{s}$ 。

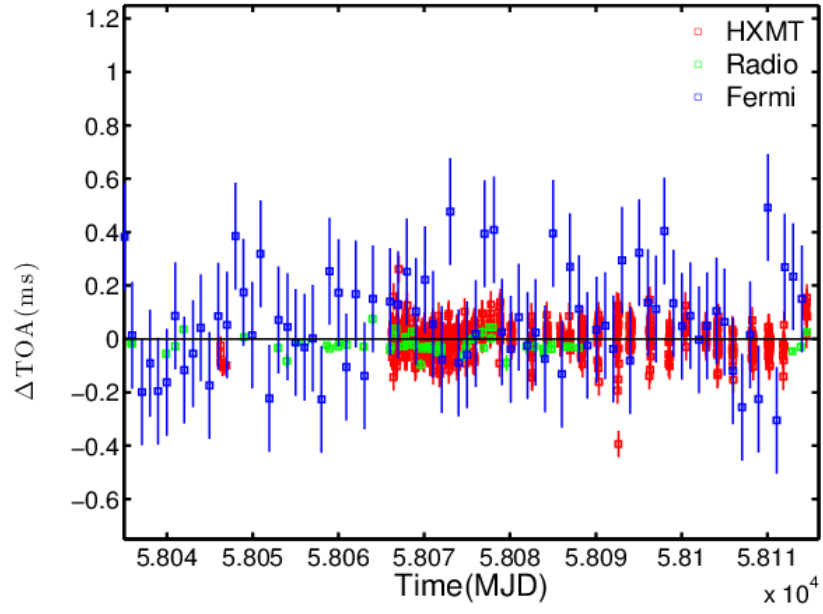


图 7-13 慧眼卫星，射电望远镜和 Fermi/LAT 的计时残差分布。其中图中的射电数据来自新疆天文台 25 米射电望远镜和云南天文台 40 米望远镜。

科学用户分系统负责收集观测提案（核心观测、客座观测和临时观测），科学研究支撑分系统（协助科学委员会和评审专家组）和科学运行分系统分别对观测提案进行科学评估和技术可行性评估，评审通过的观测提案由科学运行分系统制定长期、短期观测计划，任务运行分系统将观测计划转换为卫星指令后提交测控系统，测控系统将指令注入卫星执行。

观测完成后，地面接收分系统负责数据接收，在解扰和解调等后将数据发送任务运行分系统和数据预处理与快视分系统。任务运行分系统通过接收数据对载荷工作状态进行监测，并生成监测数据发送科学运行分系统。科学运行分系统应用监测数据开展载荷性能分析，并对发现的异常问题进行处理。数据预处理与快视分系统对数据进行拼接、去重复等处理生成初级数据产品，发送到高级数据产品生成与标定分系统。高级数据产品生成与标定分系统综合各类数据生成各级高级数据产品，并开发相应的数据分析软件，由科学用户分系统进行数据发布。慧眼卫星工程任务结束后，所有的数据、程序和研究成果全部转移到数据归档管理与发布分系统，长期发布。

中国科学院高能物理研究所是地面应用系统、载荷研制的总体单位，同时还是首席科学家所在单位。为更紧密地增加科学应用、载荷研制、科学研究的联系，在地面应用系统科学应用部分的基础上，联合科学研究、载荷研制的力量，组成慧眼卫星科学中心，在首席科学家的领导下，以科学目标为牵引，统筹负责慧眼卫星的科学运行、数据处理、科学研究方面的工作。

8.2 用户支持和服务

慧眼卫星科学中心信息发布网站（<http://www.hxmt.cn/>），定时发布慧眼卫星的一些重要信息，包括：

（1）提案相关信息：

征集通告：包括提案征集的重要时间节点、重要说明等
（<http://proposal.ihep.ac.cn/proposal/index.jspx>）。

提案征集：通过界面进行提案征集，注册用户可提交观测提案
(<http://proposal.ihep.ac.cn/proposal.jspx>)。

辅助软件：可见性估计软件、有效观测时间估计软件、能谱模拟分析工具等 (<http://proposal.ihep.ac.cn/soft/soft.jspx>)。

(2) 任务与计划安排：对观测任务进行长期观测规划和短期计划安排
(<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/ObsPlan.jhtml>)。

(3) 数据发布：包括已公开发布和保护期内的数据下载
(<http://archive.hxmt.cn/proposal>)。

(4) 用户软件下载：包括软件下载、安装及使用说明
(<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/analysis.jhtml>)。

8.3 观测计划制定

科学运行分系统根据观测任务的级别、观测时间、约束条件等，制定长期观测计划和短期观测计划，并按约定时间发送到任务运行分系统。

(1) 长期观测计划：根据科学委员会确定的观测任务和时间分配方案，规划年度观测安排，周期通常为 1 年。

(2) 短期观测计划：为详细的观测安排，包括：目标源信息，卫星观测模式，载荷工作模式等，周期为 3 天。

科学运行分系统定期将长期观测计划和短期观测计划信息发布到网站上，
<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/ObsPlan.jhtml>。

9 提案征集与处理流程

9.1 提案分类

观测提案分为年度提案和临时提案。年度提案包括核心观测提案、客座观测提案和标定观测提案；临时提案包括临时核心科学观测、临时 ToO 观测和临时标定观测，见图 9-1。

（1）核心观测提案

面向慧眼卫星核心科学工作组（或有意愿成为核心科学工作组成员的国内学者）围绕慧眼卫星核心科学目标提出的观测提案。慧眼卫星核心科学目标指的是能够充分利用慧眼卫星的优势，需要较多的观测时间，在国际上具有明显的竞争力并且预期能够产生重要科学成果的科学目标。

面向核心科学组的提案也包括常规观测（非 ToO 观测）提案、ToO 观测提案。

（2）客座观测提案

面向全球天文学界。国内外天文界学者及其团队提交慧眼卫星观测提案，用以补充慧眼卫星核心科学观测目标。客座提案包括常规观测提案和 ToO 观测提案。

（3）标定观测提案

主要面向慧眼卫星仪器团队、标定和本底建模工作组，提出针对标定和本底观测的提案。

（4）临时提案

临时提出的观测需求，包括临时核心科学观测、临时 ToO 观测和临时标定观测提案。年度提案征集结束后，仅临时提案征集界面对外开放。

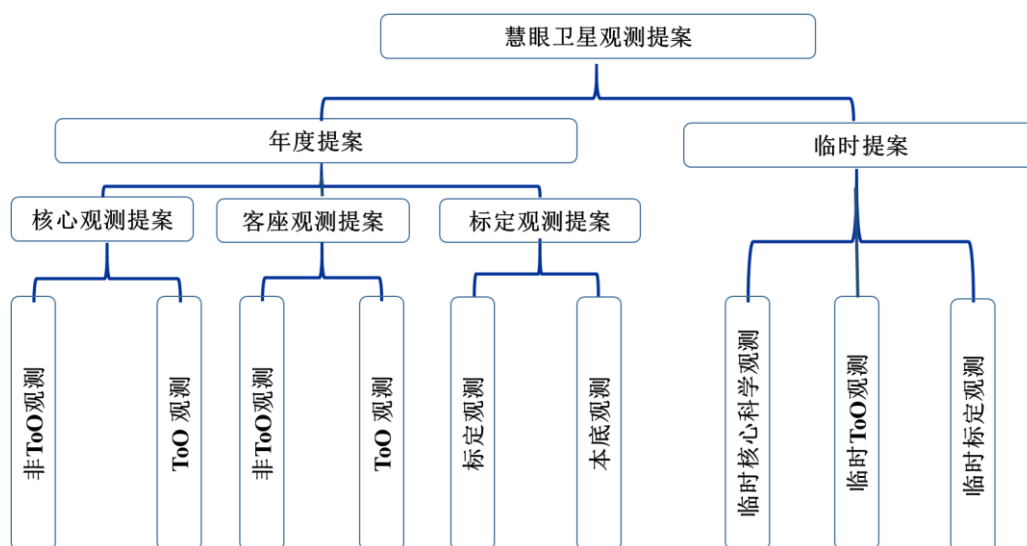


图 9-1 慧眼卫星观测提案分类。

9.2 提案征集

科学用户分系统在“慧眼卫星信息发布网站”(<http://www.hxmt.cn>)发布“提案征集公告”，并在提案征集期内，通过提案征集界面(<http://proposal.ihep.ac.cn/proposal/index.jsp>)收集观测提案。

提案申请提交后，申请者可通过申请界面的“Proposal list”查询提案状态，包括是否提交、是否通过评估等。

征集期结束后，科学用户分系统将观测提案（提案数据库）移交科学研究支撑分系统，并开展后续提案评估工作。

9.3 提案处理流程

年度提案的处理流程见图 9-2，临时提案的处理流程见图 9-3。

临时观测提案的处理由科学运行分系统主导，并由科学委员会完成科学意义评估。

年度提案征集结束后，仅临时提案征集界面对外开放，临时提案的处理流程为：

- (1) ToO 等临时提案通过临时提案申请界面提交；

(2) 临时提案数据库设置提醒功能，一旦有新申请，将通过邮件、短信通知科学运行分系统相关人员；

(3) 科学运行分系统启动临时提案处理：

首先判断是否为 ToO，若为已批准 ToO，如果技术评估通过则开始临时观测计划制定；

若非 ToO，科学运行分系统开展技术评估，同时通知科学委员会进行科学意义评估，获得批准后制定临时观测计划；

将评估结果反馈申请者；

(4) 必要时，科学运行分系统协调任务运行分系统向测控系统申请应急测控通道，并将制定的临时观测计划发送任务运行分系统；

(5) 将临时计划信息发布到网站。

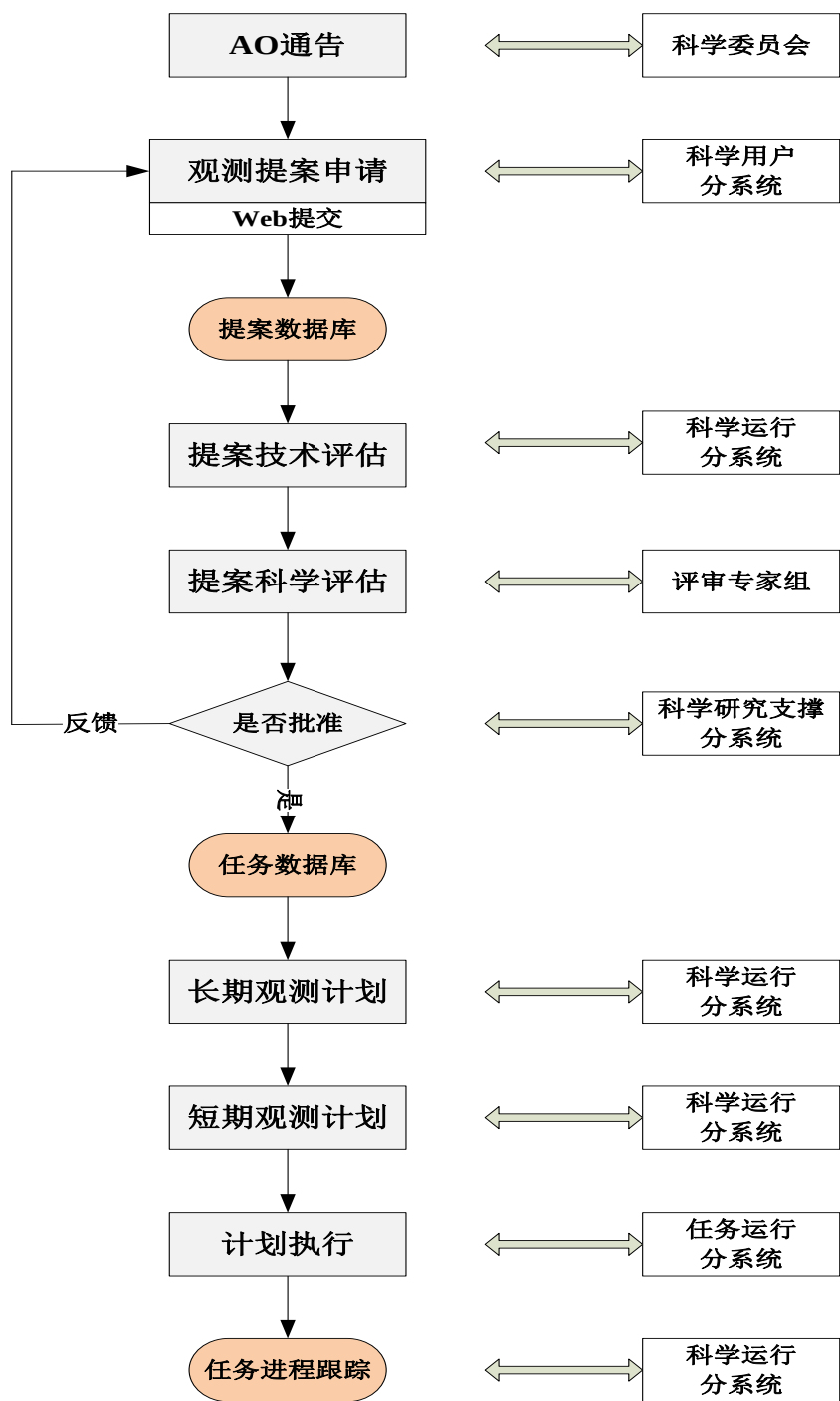


图 9-2 年度观测提案处理流程。

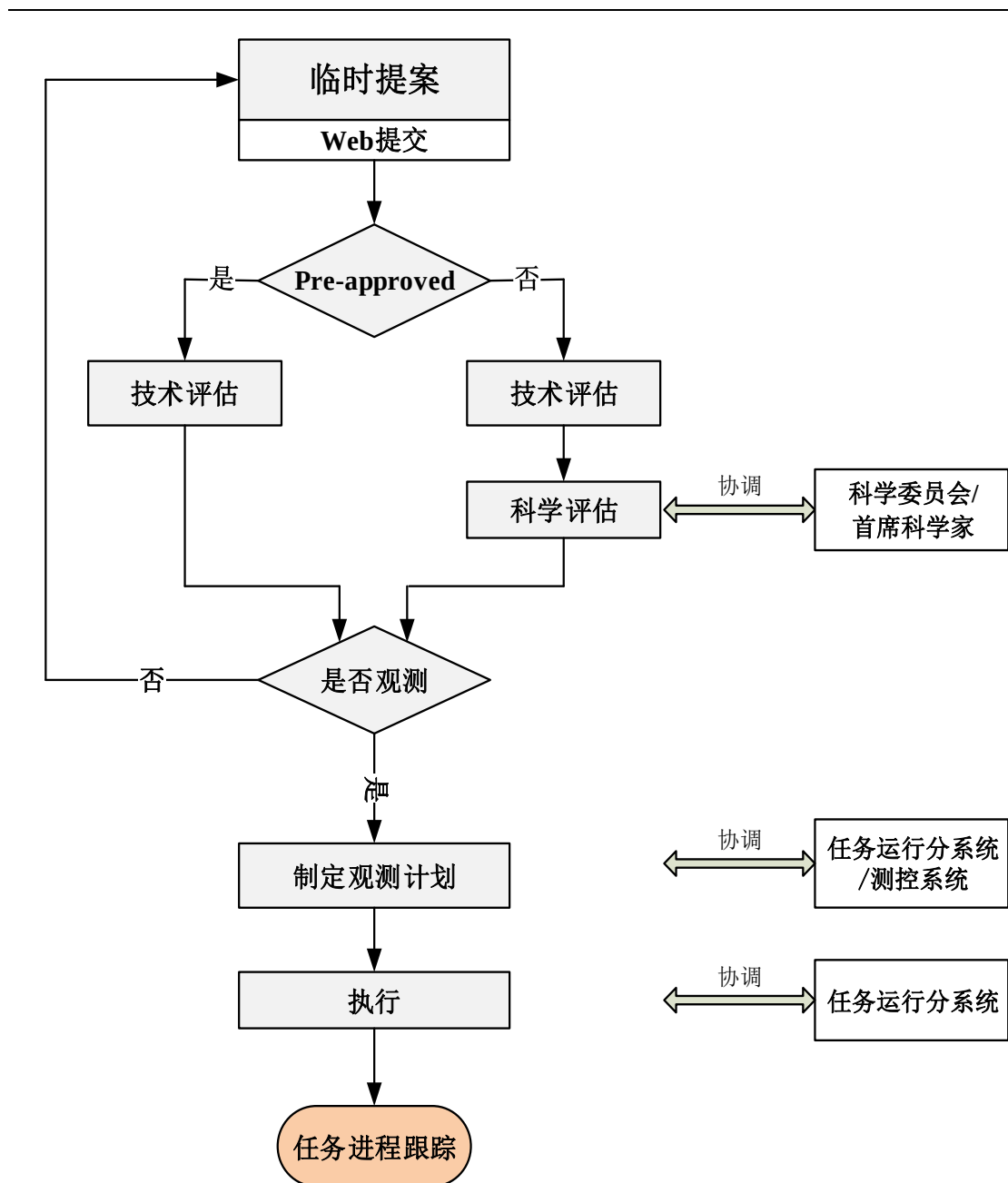


图 9-3 临时提案处理流程。

9.4 提案评估

提案评估分为技术评估和科学评估两个程序，分别介绍如下。

(1) 技术评估

科学研究支撑分系统对提案进行初步筛选后，科学运行分系统组织技术评估。对于每个提案中的每个目标源都将给出一个技术评估报告，包括对可见性、有效

观测时间、各种约束等。对所有提案给出综合评估报告（含全年有效观测时间、提案所需观测时间、各类提案的统计信息、在时间需求上可能有冲突的提案等信息）。

（2）科学评估

参考技术评估结果，评审专家组对观测提案的每一个观测目标和观测进行科学评估，并根据科学价值对提案中的每个观测进行分级（若对一个观测目标有多个不同的观测，则对每一个观测进行分级）。批准的观测等级划分为 A、B、C、D 级，A 级确保本年度安排观测；B 级尽量安排本轮观测；C 级在有机会的情况下安排本轮观测；D 级不保证安排观测。如果存在冲突，将按照观测的等级安排观测。A 级非 ToO 观测若本轮不能安排自动顺延到下一轮。B、C、D 和 ToO 观测无论什么级别均需再申请。

科学研究支撑分系统将评估结果反馈申请者，并将批准的观测和观测需求提交科学运行分系统进行观测安排。

临时观测提案的处理由科学运行分系统主导，并由相关研究方向的专家完成科学意义评估。

10 提案准备工具

10.1 观测提案基本要求

观测提案主要包含以下部分的内容。

- (1) 题目
- (2) 提案申请人以及提案合作申请人列表
- (3) 作者单位
- (4) 摘要

(5) 观测需求，包括观测模式（定点或小天区模式）、观测源类型及信息、曝光时长、及观测限制等

- (6) 每个观测源的可行性分析

对每一个观测源以附件形式上传，模板下载：

<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/doc/281.jhtml> <http://www.hxmt.org/wd/281.jhtml>

- (7) 申请书正文

对该观测申请提案以附件形式上传，模板下载：

<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/doc/281.jhtml> <http://www.hxmt.org/wd/281.jhtml>

- (8) 其他说明：

可以通过运行曝光估计软件，估计得到一定显著性信号需要的曝光量。

可以通过使用提供的能谱模拟分析工具，估计得到一定质量的能谱需要的曝光量，并给出必要的图表。

需要分析该申请的观测如何利用了慧眼卫星的哪些特点或者优势，并且和国际上正在运行的 X 射线望远镜做比较。

需要给出慧眼卫星三个 X 射线望远镜（LE、ME 和 HE）的协同使用分析。对于 HE，需要明确主探测器的增益模式，即选择正常模式或者低增益模式（旧

称伽马暴模式，详见 3.2.2）。

以下给出各个提案准备工具和软件的详细介绍。

10.2 源可见度估计工具（Target Visibility Predictor）

源可见度估计工具为用户提供计算慧眼卫星的观测效率，可通过以下网址访问：<http://proposal.ihep.ac.cn/TargetVisibilityPredictor>。该工具给出某个天体在选定的时间段可以被观测的时间，该工具的开发考虑了以下的因素，具体描述如下：

（1）太阳避免角

对于慧眼卫星，太阳避免角为 70~180 度，即慧眼卫星指向与太阳的夹角需大于 70 度。

（2）南大西洋异常区

慧眼卫星经过南大西洋异常区时，为避免仪器损坏，此时间段内不进行科学观测。

（3）月球遮挡

月球的视张角为 31 分，考虑到慧眼卫星的视场大小，月球的避免角为 6 度，主要考虑 CXB 和软 X 射线、可见光污染。

该工具的截图如图 10-1 所示。

Insight-HXMT Target Visibility Predictor

Target name(optional) input target name	
Resolve Name	
RA(J2000 decimal degrees from 0.0 to 360.0)	input ra
Dec(J2000 decimal degrees from -90.0 to 90.0)	input dec
Start UTC Time(YYYY-MM-DD)	input start time
End UTC Time(YYYY-MM-DD)	input end time

图 10-1 源可见度分析工具截图。

10.3 观测有效曝光估计 (Observation Time Estimator)

该工具用于对于给定谱型和流量的观测进行粗略的曝光需求估计,有效观测时间估计工具可通过以下网址访问: <http://proposal.ihep.ac.cn/soft/soft.jspx>。

有效观测时间估计根据观测源能谱、探测器有效面积和本底计算慧眼卫星三个探测器 (HE、ME、LE) 得到一定信噪比数据需要的观测时间。目前支持的能谱类型有两种: 黑体和幂律。该工具的输出是曝光量和达到的观测显著性之间的相互换算结果, 用于慧眼卫星提案准备中对曝光需求的粗略估计, 细致的曝光估计需要通过运行以下的能谱模拟分析工具来得到。该工具的截图如所图 10-2 示。

---X射线源信息---					
源流量: Source Flux (erg/cm ² /s)	2e-11	输入能量范围 (KeV): Input Energy Range	2 - 10	星际物质吸收: (10 ²² 原子/cm ²)	1.2
谱模型: Model of Source	BB	模型参数: Parameters of Model	1.5		
探测器: Detector	HE	能量输出范围 (keV): Output Energy Range	20 - 250		

---输入与输出---			
输入观测信噪比: Input Signal Noise Ration		输出观测时间(s) Output Observation Time	观测时间:
输入观测时间(s): Input Observation Time		输出观测信噪比 Output Signal Noise Ration	观测信噪比:

图 10-2 估计目标天体观测曝光量的分析工具截图。

10.4 视场附近亮源情况估计 (Bright source warning tool)

该工具用于估计观测目标附近的源对观测是否产生影响, 可以通过以下网址进行访问: <http://proposal.ihep.ac.cn/soft/soft2.jspx>。

视场附近亮源情况估计工具的输入量为: 观测目标源位置、流量、观测时刻以及关注哪个探测器的视场。观测时刻的卫星姿态由观测时刻的太阳方向矢量确定, 源表主要采用 Integral 参考源表 (<http://www.isdc.unige.ch/integral/science/catalogue#Reference>), 根据探测器的有效面积转换为计数率。工具目前只考虑各探测器三组不同方位小视场的情况, 对应图 3-3 中视场 1、2、3, 如高能探测器只考虑 $1.1^{\circ} \times 5.7^{\circ}$ 的视场 (各探测器视场方案详见第 3 章)。工具计算探测器视场内所有的非观测目标的计数总和与观测目标的计数之比, 如图中“干扰源总/目标源”所示。只有三组视场同时满足干扰源总计数/目标源计数小于 1/3, “自动规避”才认为该时刻是可以观测的, 否则认为是被影响的。通过“查看干扰源信息”可以查看目标源附近的源的名称、以及在高、中、低能探测器中的计数率。在“更新日期”中, 可以向前或向后移动几天, 查看是否能够避免干扰, 所填天数需为整数。

HXMT干扰源规避视场模拟

目标源位置

* R.A.: hh:mm:ss.sss * Dec.: (a)dd:mm:ss.sss

目标源流量

高能: ph/s 中能: ph/s 低能: ph/s

观测时间

* 日期:

视场

☒ 高能
 ☐ 中能
 ☐ 低能

确定

干扰源总流量/目标源流量

视场1:

视场2:

视场3:

No picture!

查看干扰源信息

单个干扰源流量/目标源流量

(0~1之间小数)

查看干扰源

No picture!

更新日期

向前 天 向后

No picture!

自动规避

开始日期:

结束日期:

Email:

图 10-3 视场附近亮源情况估计工具截图。

10.5 能谱模拟方法及示例

用户可能有模拟给定曝光时长下的观测能谱的需求，下面对如何进行该模拟举例说明。

[有效能区] LE: 1-10 keV、ME: 10-35 keV、HE: 28-250 keV

可以利用 HEASOFT 的 XSPEC 中的 fakeit 命令进行模拟。模拟所需要的响应文件和本底能谱已经打包（user_spec_2020.zip，其中本底能谱在各仪器的 bkg_fits 文件夹中，响应文件在 rsp 文件夹中，example 文件夹里是示例程序），下载地址为：<http://proposal.ihep.ac.cn/soft/soft.jspx>。

下面举例说明模拟过程。为举例简单起见，首先假设要模拟的目标源视场范围内没有其它源干扰，然后假设要模拟的目标源的能谱为单一幂律谱，且无任何星际吸收（XSPEC 中 powerlaw 模型，PhoIndex=1.7，norm=10 photons keV⁻¹ cm⁻² s⁻¹@1 keV）。实际源的模型一般比这复杂且有星际吸收。

模拟步骤 0： 在开始模拟前，用户需要将响应文件和本底能谱拷贝到开展模拟的路径下。

模拟步骤 1： 首先打开 XSPEC，建立该能谱模型：

运行 XSPEC，键入 mo po 命令建立能谱模型，并输入上述模型参数，最后键入 save mo inputmodel.xcm 命令，将待模拟源的能谱模型 save 成一个名为 inputmodel.xcm 文件，如下图所示。也可以不存成 inputmodel.xcm 文件，紧接着立即运行 fakeit 工具。存成 inputmodel.xcm 文件的好处在于以后使用时不需要再每次都去建立能谱模型，而只要在 XSPEC 中@inputmodel.xcm 就可以把模型装载进来了。

```
XSPEC12>mo po

Input parameter value, delta, min, bot, top, and max values for ...
      1      0.01(      0.01)      -3      -2      9      10
1:powerlaw:PhoIndex>1.7
      1      0.01(      0.01)      0      0      1e+20      1e+24
2:powerlaw:norm>10

=====
Model powerlaw<1> Source No.: 1 Active/Off
Model Model Component Parameter Unit Value
par comp
  1  1  powerlaw  PhoIndex      1.70000 +/- 0.0
  2  1  powerlaw  norm          10.0000 +/- 0.0
=====

XSPEC12>save mo inputmodel.xcm
XSPEC12>
```

图 10-4 建立待模拟源的能谱模型文件过程截图

由于慧眼卫星视场较大，又是准直型的望远镜，所以除了目标源外，视场内可能还会有其它源，这些源成为干扰源。本次提案征集也提供了相关工具给出视场内的干扰源（见上一节），但这些源的亮度可能是变化的。如果视场内存在较亮干扰源，用户可能需要考虑干扰源的影响。

模拟步骤 2：使用 **fakeit** 工具进行能谱模拟

以模拟 ME 为例，如果是模拟净曝光时长 10000 秒的观测，有了上面的模型后，只需在 XSPEC 中继续输入下面这个语句：

```
data none;
```

然后再输入：

```
fakeit ME_bg.fits & ME_rsp.rsp & ME.arf & y & & ME_tot.fak & 10000,1,10000;
```

（说明：先输入 `data none;` 是为了保证在 `fakeit` 时，XSPEC 没有装载能谱。否则，如果 `fakeit` 时 XSPEC 已经装载了能谱（比如之前 `fakeit` 得到的能谱会被自动装载），`fakeit` 将会使用该能谱里使用的响应文件作为 `fakeit` 时的响应文件，而非用户在 `fakeit` 语句中输入的响应）

其中，`ME_bg.fits` 是本底能谱，`ME_rsp.rsp` 和 `ME.arf` 是 ME 的响应文件（在本节首提供了下载途径。注意：这里实际的有效面积已经包括在了 `ME_rsp.rsp` 中，`ME.arf` 中的有效面积只是象征性地写入了数字 1）。`y` 指的是模拟过程中使用计数统计（对应的提示语言是 ‘Use counting statistics in creating fake data?’），这项一般情况下应该使用 ‘y’，否则模拟结果可能不对，因为实际观测过程中是有计数的统计涨落的。

运行完上述 `fakeit` 语句后，会得到两条模拟的能谱。一条是总的观测谱（含源和背景）`ME_tot.fak`。另一条是估计的背景谱 `ME_tot_bkg.fak`。有了这两条能谱后，用户就可以自行进行能谱分析了。这两条能谱就分别是 XSPEC 做能谱拟合时的总能谱和背景谱了（能谱每道计数如果有不够的，需要根据 XSPEC 的要求先并道）。

请注意:!!! 在能谱拟合时, 一定要注意有效能区范围 (本节首已写明)!!!

例如, 对于 ME, 在 XSPEC 中输入 `ig **-10.0 35.0-**`, 可以忽略掉 10.0 keV 以下及 35.0 keV 以上的数据。这样, 可能出现的如下 warning 就不复存在了: Warning: Chi-square may not be valid due to bins with zero variance in spectrum number (s) : 1。但要注意的是, 不要写成 `ig **-10 35-**`, 因为这指的是忽略掉能道 10 以下以及能道 35 以上的数据。

友情提示: 如果利用 XSPEC 做能谱拟合, 常常需要对能谱并道。用户可以自行并道, 也可以使用 GRPPHA 软件并道。以上是以 ME 为例子说明了模拟过程, HE 和 LE 的模拟过程与此类似, 只是使用的响应和本底文件不同。需要强调的是, HE 是每个探测单体各自模拟的, HE 共有 17 个观测源的探测单体, 用户得到这 17 个能谱后, 可以联合拟合 (HE 总共有 18 个探测单体, 编号为 0-17, 其中编号为 16 的单体为盲探测单体, 不观测源)。而 ME 和 LE 模拟出来的直接是总能谱。为了方便用户使用, 我们对 HE、ME、LE 的模拟也各提供了一个模拟程序例子, 在本节首提到的压缩包 `user_spec_2020.zip` 中的 `example` 文件夹中, 用户可根据自身情况决定是否使用。例子为 TCL 语言编写的程序, 在 XSPEC 中直接用@即可调用, 例如:

```
XSPEC12>@inputmodel.xcm
```

```
XSPEC12>@HE.tcl
```

如有问题请联系 jjin@ihep.ac.cn。

10.6 提案提交工具

10.6.1 提案征集页面

“慧眼卫星信息发布网站”发布“提案征集公告”, 并在提案征集期内, 通过提案征集界面 (<http://proposal.ihep.ac.cn/proposal/index.jspx>) 收集观测提案。

10.6.2 账号管理及权限

提案申请采用账号进行管理，中科院高能物理研究所内用户可以直接用所内邮箱账号密码登陆，所外用户需要注册账号。然后，通过账号登录后按提案要求完成提案申请。

申请者可通过申请界面的“Proposal list”查询提案状态，在提案征集截止期之前可以对提案进行更新修改。

征集期结束后，科学用户分系统将观测提案（提案数据库）移交科学研究支撑分系统开展提案评估。

10.6.3 提案提交

（1）提案人默认为登录的用户，提案征集截止期过后不能修改。

（2）提案信息指提案的基本信息，包括标题、摘要、目标类型、科学目标简述和紧急级别（针对 ToO）等。目标类型目前主要分为六类：活动星系核、X 射线双星、脉冲星、超新星遗迹、弥散源和其它类型。

（3）观测目标按照观测模式可选择定点观测和小天区扫描两种。定点观测的观测字段包括源名称、源描述、Ra、Dec、目标能段、高能估计光子流量、中能估计光子流量、低能估计光子流量、有效观测时间、观测次数、最短观测时间以及其他特殊需求等；小天区观测的观测字段包括扫描区域、目标能段、扫描中心 Ra、扫描中心 Dec 和扫描半径等。

上传的科学意义说明附件及观测源的可行性分析附件。模板文件可参见 <http://hxmtweb.ihep.ac.cn/doc/281.jhtml>。

具体的提案提交说明参见：<http://enghxmt.ihep.ac.cn/doc/170.jhtml>。

注意：有关 HE 观测模式的注意事项

对于使用 HE 望远镜的观测提案，请务必注意如下事项：

（1）HE 主探测器具有正常增益模式和低增益模式（见 3.2.2），因此，所有使用

HE 望远镜的观测提案都需说明和论证 HE 主探测器采用何种增益模式。

- (2) HE 望远镜的观测提案仅限于选择定点或扫描观测模式，不能选择伽马射线全天监测。

如前所述,HE 望远镜的主探测器在进行定点或扫描观测时,同时可利用 CsI 探测器数据进行伽马射线全天监测(见 3.2.2)。但由于 CsI 的数据采集不受定点或扫描观测模式的影响,仅跟 HE 主探测器的增益模式有关(见 3.2.2),而增益模式要优先考虑 NaI 探测器做定点或扫描观测的需求,不具备随意调整的条件。

- (3) HE 望远镜的观测提案默认使用 NaI 探测器的数据进行定点或扫描观测。如果需要 CsI 探测器的数据,需要在提案中明确论证必要性。CsI 的数据格式跟 NaI 类似,都是事例数据。因为 CsI 的数据量比 NaI 大得多,强烈建议用户在确有必要时才申请 CsI 数据。

11 参考文献

- Abbott, B.P., Abbott, R., Abbott, T.D., et al. 2016, *Phy. Rev. Lett.*, 116, 061102
- Abbott, B.P., Abbott, R., Abbott, T.D., et al. 2017a, *Phy. Rev. Lett.*, 119, 161101
- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2017b, *ApJ*, 848, L12
- Aartsen, M. G., Abbasi, R., et al. (IceCube Collaboration), 2013, *Science* 342, 1242856
- Aartsen, M.G., Abbasi, R., et al. (IceCube Collaboration), 2014, *Phys. Rev. Lett.* 113, 101101
- Aartsen, M. G. & Ackermann, M., et al. (IceCube Collaboration), 2018, *Science*, 361, 1378
- Baumgartner, W.H., Tueller, J., Markwardt, C. B., et al. 2013, *ApJS*, 207, 19
- Berger, M., van der Klis, M., van Paradijs, J., et al. 1996, *ApJ*, 469, 13
- Bird, A.J., Bazzano, A., Malizia, A., et al. 2016, *ApJS*, 223, 15
- Cao, X.L., Jiang, W.C., Meng, B., et al. (*Insight-HXMT* team) 2020, *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* 63, 249504
- Buisson, D.J.K., Fabian, A.C., et al., 2019, *MNRAS*, 490, 1350
- Chen, Y., Cui, W.W., Li, W., et al. (*Insight-HXMT* team) 2020, *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* 63, 249505
- Chen, Y.P., Zhang, S., Zhang, S.N., et al. (*Insight-HXMT* team) 2012, *ApJL*, 752, 34
- Chen, Y.P., Zhang, S., Qu, J.L., et al. (*Insight-HXMT* team) 2018, *ApJL*, 864, 30

-
- Chen, Y. P., Zhang, S., Zhang, S. N., et al. (*Insight-HXMT team*) 2019, JHEAp, 24, 23
- Doroshenko, V., Zhang, S.N., Santangelo, A., et al. (*Insight-HXMT team*) 2020, MNRAS, 491, 1857
- Duncan, R.C. & Thompson, C. 1992, ApJ, 392, 9
- Fabian, A.C., Buisson, D.J.K., et al., 2020, MNRAS, 493, 5389
- Frank, J., King, A., & Raine, D. J. 2002, Accretion Power in Astrophysics: Third Edition, ed. Frank, J., King, A., & Raine, D. J. (Cambridge University Press)
- Ge, M.Y., Lu, F. J., Qu, J. L., et al. 2012, ApJS, 199, 32
- Ge, M.Y., Yan, L. L., Lu, F. J., et al. 2016, ApJ, 818, 48
- Ge, M.Y., Zhang, S.N., Lu, F.J., et al. (*Insight-HXMT team*) 2020a, ApJ, 896,55
- Ge, M.Y., Ji, L., Zhang, S.N., et al. (*Insight-HXMT team*) 2020b, ApJL, 899, 19
- George, G., et al. 1999, NIM A, 428, 348
- Gierlinsk, M. & Zdziarski, A.A. 2005, MNRAS, 363, 1349
- Godet, O., Beardmore, A. P., Abbey, A. F., et al. 2009, A&A, 494, 775
- Guan, J., Lu, F.-J., Zhang, S., et al. (*Insight-HXMT team*) 2020, JHEAp, 26, 11
- Guan, J., Tao, L., et al. (*Insight-HXMT team*) 2021, MNRAS, submitted
- Guo, C.C., Liao, J.Y., Zhang, S., et al. (*Insight-HXMT team*) 2020, JHEAp, 27, 44
- Huang, Y., Qu, J.L., Zhang, S.N., et al. (*Insight-HXMT team*) 2018, ApJ, 866, 122
- IceCube Collaboration, Aartsen, M. G., Ackermann, M., et al. 2018, Science, 361, eaat1378
- Ingram A. & Done, C. 2010, MNRAS, 405, 2447

Ji, L., Doroshenko, V., Santangelo, A., et al. (Insight-HXMT team) 2020, MNRAS, 491, 1851

Jia, S.M., Ma, X., Huang, Y., et al. (Insight-HXMT team) 2018, SPIE, 10704, 1

Jia, S.M., Bu, Q.C., Qu, J.L., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 25, 1

Kaaret, P., Piraino, S., Ford, E.C., et al. 1999, ApJ, 514, L31

Kong, L.D., Zhang, S., Chen, Y.P., et al. (Insight-HXMT team) 2020a, JHEAp, 25, 29

Kong, L.D., Zhang, S., Chen, Y.P., et al. (Insight-HXMT team) 2020b, ApJ, 902, 18

Kong, L.D., Zhang, S., Chen, Y.P., et al. (Insight-HXMT team) 2021, ApJL, 906, 2

Li, C.K., Lin, L., Xiong, S.L., et al. (Insight-HXMT team) 2021, Nature Astronomy accepted

Li, T.P., Xiong, S.L., Zhang, S.N., et al. (Insight-HXMT team) 2018, Science China Physics, Mechanics, and Astronomy, 61, 031011

Li, X.B., Li, X-F., Tan, Y., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 26, 64

Li, X.F., Liu, C.Z., Chang, Z., et al. (Insight-HXMT team) 2019, JHEAp, 24, 6

Liao, J.Y., Zhang, S., Chen, Y., et al. (Insight-HXMT team) 2020a, JHEAp, 27, 24

Liao, J.Y., Zhang, S., Lu, X.F., et al. (Insight-HXMT team) 2020b, 27, 14

Liu, B.S., et al. (Insight-HXMT team) 2021, to be submitted

Liu, C.Z., Zhang, Y.F., Li, X.F., et al. (Insight-HXMT team) 2020, Sci. China-Phys. Mech. Astron. 63, 249503

Luo, Q., Liao, J.Y., Li, X.F., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 27, 1

Lyne, A., Graham-Smith, F., Weltevrede, P., 2013, Science, 342, 598

Ma, X., Tao, L., Zhang, S.N., et al. (Insight-HXMT team) 2021, *Nature Astronomy*, 5, 94

Magdziarz, P., & Zdziarski, A.A. 1995, *MNRAS*, 273, 837

McHardy, I.M., Papadakis, I. E., Uttley, P., et al. 2004, *MNRAS*, 348, 783

Meszáros, P., Novick, R., Szentgyorgyi, A., et al. 1988, *ApJ*, 324, 1056

Molkov, S., Jourdain, E., Roques, J. P., et al. 2010, *ApJ*, 708, 403

Morgan, E.H., Remillard, R. A., Greiner, J. 1997, *ApJ*, 482, 993

Mukherjee, A. & Bhattacharyya, S. 2012 *ApJ*, 765, 55

Nang, Y., Liao, J., Sai, N., et al. (Insight-HXMT team) 2020, *JHEAp*, 25, 39

Revnivtsev, M., Gilfanov, M., Sunyaev, R., et al. 2003, *A&A*, 411, 329

Rodriguez, J., Grinberg, V., Laurent, P., et al. 2015, *ApJ*, 807, 17

Sai, N., Liao, J.-Y., Li, C., et al. (Insight-HXMT team) 2020, *JHEAp*, 26, 1

Sguera, V., Barlow, E. J., Bird, A. J., et al. 2005, *A&A*, 444, 221

Staubert, R., et al. 2021, in preparation

Tennant, A.F., Becker, W., Juda, M., et al. 2001, *ApJ*, 554, 173

Townsley, L.K., Broos, P. S., Nousek, J. A., et al. 2002, *NIMPA*, 486, 751

Tuo, Y.L., Ge, M.Y., Song, L.M., et al. (Insight-HXMT team) 2019, *RAA*, 19, 87

van den Heuvel, E.P.J., 2009, *Astrophysics and Space Science Library*, 359, 125

Wang, L.J., Ge, M.Y. et al. (Insight-HXMT team) 2020, *MNRAS*, 494, 1685

Wang, P.J., Kong, L.D., Zhang, S., et al. (Insight-HXMT team) 2020, *MNRAS*, 497, 5498

-
- Wang, Y.N., Ji, L., Zhang, S.N., et al. (Insight-HXMT team) 2020, ApJ, 896, 33
- Willingale, R., Aschenbach, B., Griffiths, R. G., et al. 2001, A&A, 365, 212
- Woods, P. M. & Thompson, C. 2006, in Compact stellar X-ray sources, eds. W. H. G. Lewin & M. van der Klis (Cambridge University Press)
- Xiao, G. C., Ji, L., Staubert, R., et al. (Insight-HXMT team) 2019, JHEAp, 23, 29
- Xiao, S., Xiong, S.L., Liu, C.Z., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 26, 58
- You, B., Li, C.Z., Wang, W., et al. (Insight-HXMT team) 2021, Nature Communication accepted
- Zanazzi, J.J. & Lai, D. 2015, MNRAS, 451, 695
- Zhang, S., Zhang, S.N., Lu, F.J., et al. (Insight-HXMT team) 2018, SPIE, 10699, 1
- Zhang, S.N., Li, T.P., Lu, F.J., et al. (Insight-HXMT team) 2020, Sci. China-Phys. Mech. Astron., 63, 249502
- Zhang, W., Smale, A. P., Strohmayer, T. E., et al. 1998, ApJ, 500, 171
- Zhang, Y., Ge, M.Y., Song, L.M., et al. (Insight-HXMT team) 2019, ApJ, 879, 61
- Zhao, X.F., Zhu, Y.X., Han, D.W., et al. (Insight-HXMT team) 2019, JHEAp, 23, 23
- Zhao, X.S., et al. 2021, ApJ, submitted
- Zheng, S.J., Zhang, S.N., Lu, F.J., et al. (Insight-HXMT team) 2019, ApJS, 244, 1

12 慧眼卫星发表文章列表

下面给出基于慧眼卫星发射以来的文章列表，包括已发表文章、已接收和投稿文章（截止到 2020 年 3 月 24 日）。更详细和更新的文章列表参见网址：

<http://hxmtweb.ihep.ac.cn/papers.jhtml>

12.1 已发表文章列表

1) HXMT identification of a non-thermal X-ray burst from SGR J1935+2154 and with FRB 200428

Li, C.K., Lin, L., Xiong, S.L., et al. (Insight-HXMT team) 2021, Nature Astronomy,

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01302-6>

2) Insight-HXMT observations of jet-like corona in a black hole X-ray binary MAXI J1820+070

You, B., Tuo, Y.L., Li, C.Z., et al. (Insight-HXMT team) 2021, Nature Communication, 12, 1025

3) Discovery of the highest energy oscillations in a black hole X-ray binary with Insight-HXMT

Ma, X., Tao, L., Zhang, S.N., et al. (Insight-HXMT team) 2021, Nature Astronomy, 5, 94

4) No pulsed radio emission during a bursting phase of a Galactic magnetar

Lin, L., Zhang, C. F., Wang, P., et al. 2020, Nature, 857, 63

5) Insight-HXMT Observations of a Possible Fast Transition from the Jet- to Wind-dominated State during a Huge Flare of GRS 1915+105

Kong, L.D., Zhang, S., Chen, Y.P., et al. (Insight-HXMT team) 2021, ApJL, 906,2

6) Switches between accretion structures during flares in 4U 1901+03

Ji, L., Ducci, L., Santangelo, A., et al. (Insight-HXMT team) 2021, MNRAS, 501,2522

-
- 7) The influence of the Insight-HXMT/LE time response on timing analysis
Zhou, D.K., Zheng, S.J., Song, L.M., et al. (Insight-HXMT team) 2021, RAA, 21,5
- 8) A search for prompt gamma-ray counterparts to fast radio bursts in the Insight-HXMT data
Cristiano, C., Marongiu, M., Martone, R., et al. (Insight-HXMT team) 2020, A&A, 637, 69
- 9) Discovery of delayed spin-up behavior following two large glitches in the Crab pulsar, and the statistics of such processes
Ge, M.Y., Zhang, S.N., Lu, F.J., et al. (Insight-HXMT team) 2020, ApJ, 896,55
- 10) The evolution of the braking index of PSR B0540—69 after its spin-down rate transition
Wang, L.J., Ge, M.Y. et al. (Insight-HXMT team) 2020, MNRAS,494,1685
- 11) Timing analysis of 2S 1417-624 observed with NICER and Insight-HXMT
Ji, L., Doroshenko, V., Santangelo, A., et al. (Insight-HXMT team) 2020, MNRAS, 491, 1851
- 12) Insight-HXMT observations of Swift J0243.6+6124: the evolution of RMS pulse fractions at super-Eddington luminosity
Wang, P.J., Kong, L.D., Zhang, S., et al. (Insight-HXMT team) 2020, MNRAS, 497, 5498
- 13) Two Complete Spectral Transitions of Swift J0243.6+6124 Observed by Insight-HXMT
Kong, L.D., Zhang, S., Chen, Y.P., et al. (Insight-HXMT team) 2020, ApJ, 902,18
- 14) Hot disk of the Swift J0243.6+6124 revealed by Insight-HXMT

Doroshenko, V., Zhang, S. N., Santangelo, A., et al. (Insight-HXMT team) 2020, MNRAS, 491, 1857

15) Constraining the transient high-energy activity of FRB 180916.J0158+65 with Insight-HXMT follow-up observations

Cristiano, C., Orlandini, M.; Frontera, F., et al. (Insight-HXMT team) 2020, A&A, 642, 160

16) Comparison of simulated backgrounds with in-orbit observations for HE, ME, and LE onboard Insight-HXMT

Zhang J., Li, X.B., Ge, M.Y., et al. (Insight-HXMT team) 2020, Ap&SS, 365, 158

17) Insight-HXMT Firm Detection of the Highest-energy Fundamental Cyclotron Resonance Scattering Feature in the Spectrum of GRO J1008-57

Ge, M.Y., Ji, L., Zhang, S.N., et al. (Insight-HXMT team) 2020, ApJL, 899, 19

18) The Evolution of the Broadband Temporal Features Observed in the Black-hole Transient MAXI J1820+070 with Insight-HXMT

Wang, Y.N., Ji, L., Zhang, S.N., et al. (Insight-HXMT team) 2020, ApJ, 896, 33

19) GRB 200415A: A Short Gamma-Ray Burst from a Magnetar Giant Flare?

Yang, J., Chand, V., Zhang, B.B., et al. 2020, ApJ, 899, 106

20) An underlying clock in the extreme flip-flop state transitions of the black hole transient Swift J1658.2-4242

Bogensberger, D., Ponti, G., Jin, C., et al. 2020, A&A, 641, 101

21) Constraining the X-Ray-Infrared Spectral Index of Second-timescale Flares from SGR 1935+2154 with Palomar Gattini-IR

De, K., Ashley, M.C. B.; Andreoni, I., et al. 2020, ApJL, 901, 1

22) Super-Eddington Accretion onto the Galactic Ultraluminous X-Ray Pulsar Swift J0243.6+6124

Tao, L., Feng, H., Zhang, S.N. et al. (Insight-HXMT team) 2019, ApJ, 873, 19

23) In-orbit demonstration of X-ray pulsar navigation with the Insight-HXMT satellite

Zheng, S.J., Zhang, S.N., Lu, F.J., et al. (Insight-HXMT team) 2019, ApJS, 244, 1

24) Insight-HXMT observations of Swift J0243.6+6124 during its 2017-2018 outburst

Zhang, Y., Ge, M.Y., Song, L.M., et al. (Insight-HXMT team) 2019, ApJ, 879, 61

25) Insight-HXMT observations of the Crab pulsar

Tuo, Y.L., Ge, M.Y., Song, L.M., et al. (Insight-HXMT team) 2019, RAA, 19, 87

26) Insight-HXMT observations of 4U 1636-536: Corona cooling revealed with single short type-I X-ray burst

Chen, Y.P., Zhang, S., Qu, J.L., et al. (Insight-HXMT team) 2018, ApJL, 864, 30

27) Insight-HXMT observations of the new black hole candidate MAXI J1535-571: timing analysis

Huang, Y., Qu, J.L., Zhang, S.N., et al. (Insight-HXMT team) 2018, ApJ, 866, 122

28) Insight-HXMT observations of the first binary neutron star merger GW170817

Li, T.P., Xiong, S.L., Zhang, S.N., et al. (Insight-HXMT team) 2018, SCPMA, 61, 1011

29) The Insight-HXMT mission and its recent progresses

Zhang, S., Zhang, S.N., Lu, F.J., et al. (Insight-HXMT team) 2018, SPIE, 10699, 1

30) Insight-HXMT science operations

Jia, S.M., Ma, X., Huang, Y., et al. (Insight-HXMT team) 2018, SPIE, 10704, 1

31) In-orbit calibration status of the Insight-HXMT

Li, X.B., Song, L.M., Li, X.F., et al. (Insight-HXMT team) 2018, SPIE, 10699, 69

32) The readout design of Si-PIN detector in HXMT

Luo, T., Meng, B., Chen, Y., et al. (Insight-HXMT team) 2018, SPIE, 10709, 2

33) Design and applications of scientific ground segment for HXMT Satellite

Zheng, S.J., et al. (Insight-HXMT team) 2018, Spacecraft Engineering, 27, 162

34) Preliminary evaluation for scientific observations application of HXMT Satellite

Jia, S.M., Huang, Y., Ma, X., et al. (Insight-HXMT team) 2018, Spacecraft Engineering, 27, 168

35) In-orbit calibration data processing of HXMT Satellite

Li, X.B., Ge, M.Y., Li, X.F., et al. (Insight-HXMT team) 2018, Spacecraft Engineering, 27, 143

36) Multi-messenger observations of a binary neutron star merger

Abbott, B.P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. (Insight-HXMT team) 2017, ApJL, 848, 12

12.2 已接收文章列表

1) X-ray reprocessing in accreting pulsar GX 301-2 observed with Insight-HXMT

Ji, L., V. Doroshenko, V. V. Suleimanov, V., et al. (Insight-HXMT team) 2020, MNRAS accepted

2) A variable ionized disk wind in the black-hole candidate EXO 1846-031

Wang, Y.N., Ji, L., Garcia, J.A., et al. (Insight-HXMT team) 2020, ApJ accepted

3) Timing analysis of the black hole candidate EXO 1846–031 with Insight-HXMT monitoring

Liu, H.X., Huang, Y., Xiao, G.C., et al. (Insight-HXMT team) 2020, RAA accepted

12.3 已投稿文章列表

1) Physical origin of the unphysical spin evolution of MAXI J1820+070

Guan, J. , et al. (Insight-HXMT team) 2021, submitted to ApJ

2) The peculiar spectral evolution of the new X-ray transient MAXI J0637-430: a small black hole filling the mass gap?

Ma R.C., et al. (Insight-HXMT team) 2021, submitted to ApJ

3) Disk vs wind accretion in X-ray pulsar GX 301-2

Liu J.R., et al. 2021, submitted to MNRAS

4) A peculiar correlation of cyclotron resonant energy and luminosity in X-ray pulsar GRO J1008-57

Wang W., et al. (Insight-HXMT team) 2021, submitted to ApJ

5) Confirming the Spin Parameter of the Black Hole in Cygnus X-1 using the Insight-HXMT

Zhao X.S., et al. 2021, submitted to ApJ

6) The 2018 failed outburst of H 1743–322: Insight-HXMT, NuSTAR and NICER Views

Wang P.J., et al. (Insight-HXMT team) 2021, submitted to MNRAS

7) Spectral evolution of X-ray pulsar 4U 1901+03 during 2019 outburst based on Insight-HXMT and NuSTAR observations

Armin Nabizadeh, et al. 2020, submitted to A&A

8) The study on energy limits of kHz QPOs in Sco X-1 by the RTE and Insight-HXMT

Jia, S.M., et al. (Insight-HXMT team) 2020, submitted to ApJ

9) Quasi-periodical flux oscillations of the X-ray burst from a magnetar and

associated with the fast radio burst FRB~200428

Ge M.Y., et al. (Insight-HXMT team) 2020, submitted to Science

10) HXMT-insight observation on Rapid Burster: broad band spectra of type-II X-ray bursts

Chen Y.P., et al. (Insight-HXMT team) 2020, submitted to ApJ

11) Noiseless high-energy flux from MAXI J1631-479 in its Hard-Intermediate State observed with Insight-HXMT

Bu Q.C., et al. (Insight-HXMT team) 2020, submitted to ApJ

12) Broad-band X-ray spectra and timing of the accretion-powered millisecond pulsar Swift J1756.9-2508 during its 2018 and 2019 outbursts

Li Z.S., et al. 2020, submitted to A&A

13) Testing evolution of LFQPOs with mass accretion rate in GRS 1915+105 with Insight-HXMT

Liu H.H., et al. (Insight-HXMT team) 2020, submitted to ApJ

14) QPOs and Orbital elements of X-ray binary 4U 0115+63 during the 2017 outburst observed by insight-HXMT

Ding, Y.Z., et al. (Insight-HXMT team) 2020, submitted to MNRAS

15) Aperiodic X-ray flares discovered in black-hole transient MAXI J1820+070 with Insight-HXMT

Wang, Y.N., et al. (Insight-HXMT team) 2019, submitted to ApJ

12.4 中国科学（物理学力学天文学）慧眼卫星专刊文章

1) Overview to the Hard X-ray Modulation Telescope (Insight-HXMT) Satellite

Zhang, S.N., Li, T.P., Lu, F.J., et al. (Insight-HXMT team) 2020,

Sci. China-Phys. Mech. Astron. 63, 249502

- 2) The High Energy X-ray telescope (HE) onboard the Insight-HXMT astronomy satellite

Liu, C.Z., Zhang, Y.F., Li, X.F., et al. (Insight-HXMT team) 2020, Sci. China-Phys. Mech. Astron. 63, 249503

- 3) The Medium Energy X-ray telescope (ME) onboard the Insight-HXMT astronomy satellite

Cao, X.L., Jiang, W.C., Meng, B., et al. (Insight-HXMT team) 2020, Sci. China-Phys. Mech. Astron. 63, 249504

- 4) The Low Energy X-ray telescope (LE) onboard the Insight-HXMT astronomy satellite

Chen, Y., Cui, W.W., Li, W., et al. (Insight-HXMT team) 2020, Sci. China-Phys. Mech. Astron. 63, 249505

12.5 JHEAp 慧眼专辑

- 1) Insight-HXMT observation on 4U 1608 – 52: evolving spectral properties of a bright type-I X-ray burst

Chen, Y.P., Zhang, S., Zhang, S.N., et al. (Insight-HXMT team) 2019, JHEAp, 24, 23

- 2) A modified direct demodulation method applied to Insight-HXMT Galactic plane scanning survey

Guan, J., Lu, F.-J., Zhang, S., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 26, 11

- 3) Diagnostic of the spectral properties of Aquila X-1 by Insight-HXMT snapshots during the early propeller phase

Gungor, C., Ge, M., Zhang, S., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 25, 10

- 4) The background model of the medium energy X-ray telescope of Insight-HXMT

Guo, C.C., Liao, J.Y., Zhang, S., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 27, 44

5) Insight-HXMT study of the timing properties of ScoX-1

Jia, S., Bu, Q., Qu, J., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 25, 1

6) Joint analysis of energy and RMS spectra from MAXI J1535-571 with Insight-HXMT

Kong, L.D., Zhang, S., Chen, Y.P., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 25, 29

7) In-flight calibration of the Insight-Hard X-ray Modulation Telescope

Li, X., Li, X-F., Tan, Y., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 26, 64

8) Ground-based calibration and characterization of the HE detectors for Insight-HXMT

Li, X.F., Liu, C.Z., Chang, Z., et al. (Insight-HXMT team) 2019, JHEAp, 24, 6

9) Background model for the low-energy telescope of Insight-HXMT

Liao, J.Y., Zhang, S., Chen, Y., et al. (Insight-HXMT team) 2020a, JHEAp, 27, 24

10) Background model for the high-energy telescope of Insight-HXMT

Liao, J.Y., Zhang, S., Lu, X.F., et al. (Insight-HXMT team) 2020b, 27, 14

11) Design and calibration of the high energy particle monitor onboard the Insight-HXMT

Liu, C., Lu, X., Li, X., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 26, 77

12) Calibration of the instrumental response of Insight-HXMT/HE CsI detectors for gamma-ray monitoring

Luo, Q., Liao, J.Y., Li, X.F., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 27, 1

13) In-orbit calibration to the point-spread function of Insight-HXMT

Nang, Y., Liao, J., Sai, N., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 25, 39

14) Methodology and performance of the two-year Galactic plane scanning survey of Insight-HXMT

Sai, N., Liao, J.-Y., Li, C., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 26, 1

15) Insight-HXMT insight into switch of the accretion mode: the case of the X-ray pulsar 4U 1901+03

Tuo, Y.L., Ji, L., Tsygankov, S.S., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 27, 38

16) Constant cyclotron line energy in Hercules X-1 - joint Insight-HXMT and NuSTAR observations

Xiao, G.C., Ji, L., Staubert, R., et al. (Insight-HXMT team) 2019a, JHEAp, 23, 29

17) Timing analysis of Swift J1658.2–4242's outburst in 2018 with Insight-HXMT, NICER and AstroSat

Xiao, G.C., Lu, Yu, Ma, X., et al. (Insight-HXMT team) 2019b, JHEAp, 24, 30

18) Deadtime calculation method of the High Energy X-ray telescope (HE) onboard the Insight-HXMT satellite

Xiao, S., Xiong, S.L., Liu, C.Z., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 26, 58

19) The observation of the South Atlantic Anomaly with the particle monitors onboard Insight-HXMT

Zhao, H., Liu, C.Z., Li, X.Q., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 26, 95

20) Confirming the spin parameter of the black hole in Cygnus X-1 using the Insight-HXMT

Zhao, X.S., Gou, L.J., Dong, Y.T., et al. (Insight-HXMT team) 2020, JHEAp, 26, 53

21) Studies on the time response distribution of Insight-HXMT/LE

13 第三轮提案执行情况总结

AO-03 的常规观测任务包括：29 个 A 类，批准有效观测时间约 4.4 Ms；6 个 B 类，批准有效观测时间约 1.6 Ms；6 个 C 类，批准有效观测时间约 0.7 Ms；以及银道面巡天，批准有效观测时间约 4.8 Ms，共计约 11.5 Ms。目前，已完成 6.6 Ms 的常规观测，根据 AO-03 的长期观测规划及执行情况，常规观测可以按计划完成。若因特殊原因不能全部完成，常规 A 类观测将自动顺延至 AO-04。

在 AO-03 已批准的 ToO 观测中，已触发并开展观测的有 9 个，其中 A 类 5 个，B 类 2 个，C 类 2 个，共计有效观测时间约 1.5Ms；临时 ToO 观测有 7 个，有效观测时间约 2.1 Ms。AO-03 中的 ToO 均不会顺延至 AO-04。

截至 2021 年 2 月 28 日，慧眼卫星 AO-03 观测任务及完成情况见下表，详情可查询网页，<http://www.hxmt.cn/ShortPlan.jhtml>。

	Grade	No.	Source name	RA	DEC	Target ID	Approved time (ks)	Approved number	Observation time (ks)	Observation Number
normal sources	A	1-16	Blank sky	-	-	16 sources	1280	128	600	60
		17	GX 9+1	18:01:31	-20:31:48.000	T030101001	100	1	120	1
		18	Crab	05:34:31.200	22:00:36	T030229001	750	15	600	11
		19	Cas A	23:23:29	10:48:36	T030229101	900	9	500	6
		20	SSDS_054631+220036_7	05:46:31.200	22:00:36	T030229201	420	12	380	11
		21	GRS 1915+105	19:15:12	10:57:00	T030507301	10	1		
		22	Cyg X-1	19:58:22	35:12:00.000	T030507101	10	1		
		23	Cyg X-3	20:32:26	40:57:36.000	T030507201	10	1		
		24	Mrk 421	11:04:26	38:12:36.000	T030307501	60	6		
		25	FRB180916J0158+65	01:58:00.744	+65:43:00.120	T030307701	90		110	6
		26	4U 1700-377	17:03:58	-37:50:24.000	T030507801	150	1	100	1
		27	Cyg X-1	19:58:22	35:12:00.000	T030507901	180	18	200	19
	28	Her X-1	16:57:50	35:20:24.000	T030308001	200	1	300	1	
	29	GX 349+2	17:05:44	-36:25:23.160	T030508801	200	10	200	10	
	30-79	Galaxy plane scan	-	-	50 areas	4800	836	2900	504	
	B	1	Cyg X-1	19:58:22	35:12:00	T030101101	170	17		
		2	GRS 1915+105	19:15:12	10:57:00	T030101201	170	17	260	26
		3	OA0 1657-415	17:00:49	-41:39:21.5	T030507401	200	1		
		4	4U 1636-53	16:40:55	-53:45:00.000	T030508401	300	15		
		5	GX 340+0	16:45:48	-45:36:39.960	T030508701	400	20		
		6	GX 5-1	18:01:10	-25:04:44.040	T030508601	400	20		
	C	1	Cyg X-3	20:32:26	40:57:36	T030101301	170	17	120	12
		2	4U 2206+54	22:07:56	+54:31:06.40	T030507001	55	1	80	2
3		Mrk 501	16:53:53	39:45:36.000	T030307601	45	6			
4		GX 301-2	12:26:36	-62:46:12.000	T030508101	80	10	120	12	
5		4U 1728-34	17:31:58	-33:49:48.000	T030508301	300	15			
6		X2127+119	21:29:58	+12:10:01.200	T030508501	40	1			
approved ToO	A	1	4U 1608-52	243.18	-52.42	T030402101	300	30	170	8
		2	GX_339-4	255.71	-48.79	T030409301	200	20	90	9
		3	1A_0535+262	84.7274	26.3158	T030409901	150	15	180	18
		4	PSR J1846-0258	281.6039	-2.975	T030420201	50	1	10	1
		5	SGR_1935+2154	293.7317	21.8966	T030421201	50	1	40	5
	B	6	GX_339-4	255.71	-48.79	T030402401	600	60	120	12
		7	Aql_X-1	287.82	0.58	T030403401	200	30	430	39
	C	8	2S_1417-624	215.3	-62.7	T030405901	200	20	300	30
		9	Cyg X-2	326.17	38.32	T030406701	200	5	150	1
ToO	-	1	AT2019wey	68.847	55.3762	T031430901	1950	182	140	2
		2	FRB190711	328.25	-80.5	T031431101			30	6
		3	FRB190608	334.1458	-7.7833	T031431201			30	6
		4	SAS_062550-071948_7	96.46	-7.33	T031131301			-	6
		5	SAS_062550-041948_7	96.46	-4.33	T031131401			-	6
		6	SGR_1830-0645	277.6738	-6.7546	T031131501			10	1
		7	1A_0535+262	84.73	26.32	T031131601			1910	15
									2120	42

