

慧眼-HXMT卫星

科学运行和成果简介

慧眼-HXMT卫星科学应用 宋黎明

中国科学院高能物理研究所

写在前面的话

慧眼、EP运行都很成功，也有很好的互补性：

- 1) EP成像观测，灵敏度很高，可以很好地识别爆发现象；慧眼是准直型望远镜，可以对亮源观测，数据统计量高，堆积效应小；
- 2) EP低能能力很强（0.5 ~ 8 keV），慧眼是宽波段（1-250 keV）；
- 3) EP和慧眼卫星都在进行巡天观测，联合观测可以对天体源的证认、长期演化、宽能段性质等进行深入研究，有很好的合作潜力；

主要内容

一、慧眼-HXMT卫星简介

二、观测模式与科学运行

三、研究成果

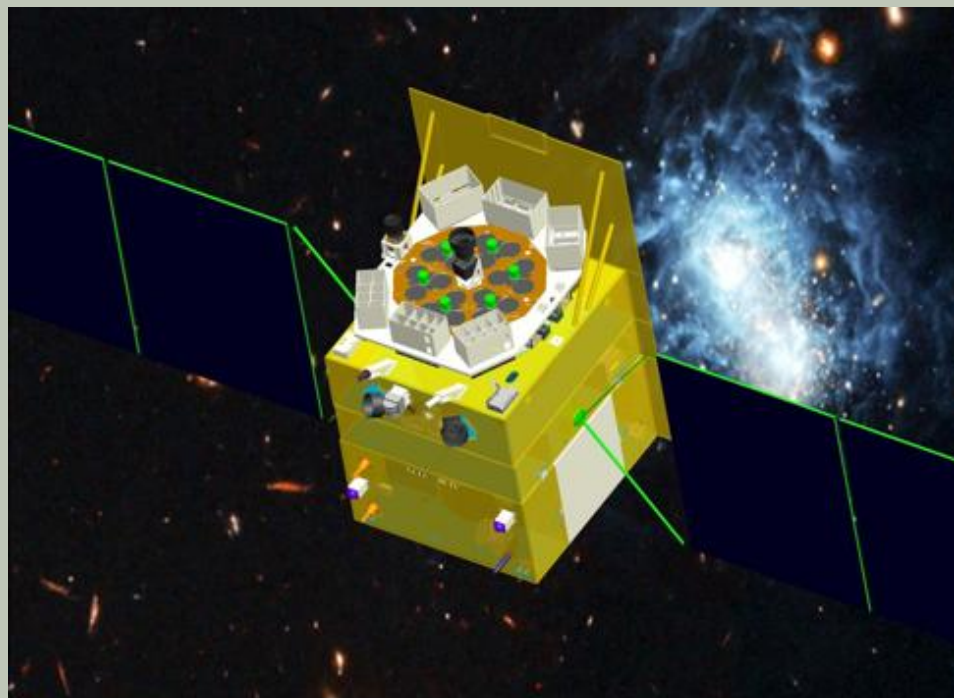
四、结语

一、慧眼-HXMT卫星及载荷

慧眼卫星主要科学目标：

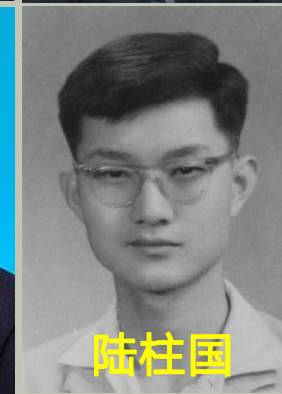
- 对银盘面进行系统和长期扫描巡天监测；
- 观测X射线双星以研究强引力场或强磁场中的运动和辐射机制；
- 监测研究伽马射线暴和引力波电磁对应体（补增）；
- X射线脉冲星导航在轨验证。

一、慧眼-HXMT卫星简介



慧眼卫星于1993年提出，2011年立项，2017年6月15日在酒泉卫星发射基地升空，2018年1月30日通过国防科工局组织的在轨测试验收，1月31日正式交付使用，目前已在轨稳定运行8年2个月。

一、慧眼-HXMT卫星简介

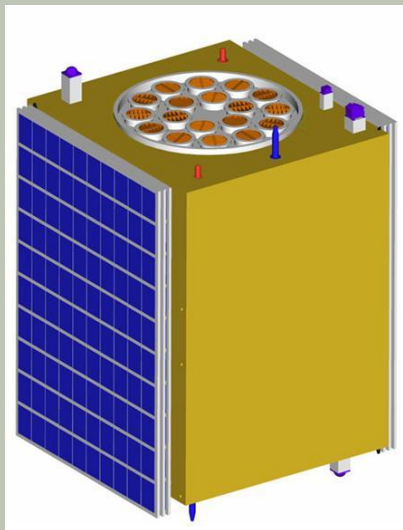


中国的空间X射线天文探测始于1970年代，利用高空气球运载硬X射线望远镜在约40公里高空进行高能天文观测。同时，利用国外卫星的开放数据开展天体物理研究，发展了直接解调成像等多种创新的方法。**慧眼的技术和思想起源于1970年代。**

一、慧眼-HXMT卫星简介

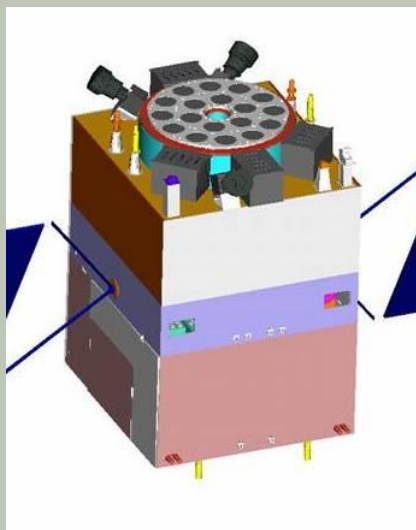
在直接解调成像方法和球载硬X射线实验的基础上，高能所在1993年提出硬X射线调制望远镜（HXMT）卫星项目并开始预研；18年后的2011年3月，国家正式批准立项。

< 2005



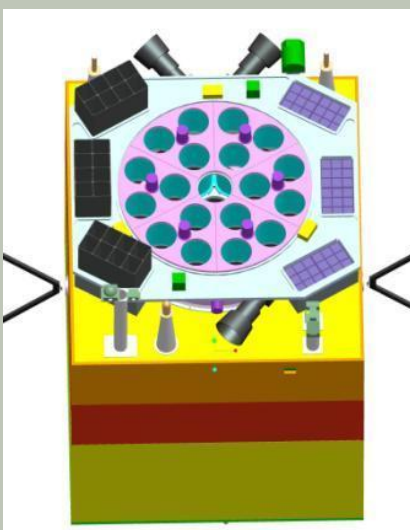
只有高能X射线望远镜阵列

2005



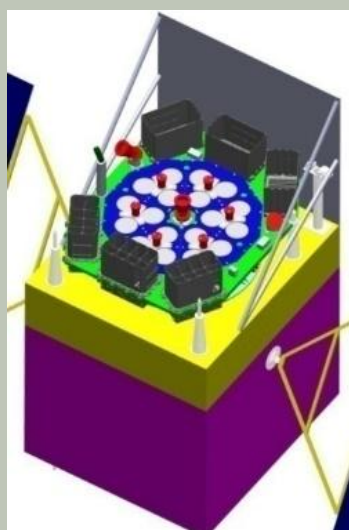
增加低能X射线望远镜

2006



增加中能X射线望远镜

2010



优化设计

2017



发射运行

一、慧眼-HXMT卫星简介

慧眼-HXMT卫星工程项目2011年3月由国防科工局、财政部联合批准立项，同时也是中国科学院空间科学战略性先导科技专项第一批立项的卫星项目之一。经费来源渠道分别由民用航天科研经费和空间科学先导专项经费共同支持。

- **科工局支持：**卫星平台、运载火箭，高能X射线望远镜（HE）、空间环境监测器（SEM）、望远镜整体支撑主结构。
- **空间科学先导专项支持：**中能X射线望远镜（ME）和低能X射线望远镜（LE）以及地面应用系统。

一、慧眼-HXMT卫星简介

特点：准直型，适于研究强源

- 1. 大面积**
- 2. 宽能段1-250keV**
- 3. 高时间分辨**
- 4. 小的死时间**
- 5. 无堆积效应**

卫星结构图

星敏感器

以观察到的恒星为基准，与星图中恒星的位置做对比，来确定卫星的姿态。

中能X射线望远镜 (ME)

包括互成 60° 夹角的3个探测器机箱，观测能段5000~3万电子伏，探测面积952平方厘米，由1728路半导体探测器组成。与常规的气体探测器相比，半导体探测器有着更强的能量分辨率，即分光能力，可以精细识别不同能量的光子。中能X射线望远镜的观测能段与高能和低能X射线望远镜有着很宽重叠，可以用来交叉验证。

遮阳板

屏蔽太阳光对设备的干扰

高能X射线望远镜 (HE)

最主要的观测设备，包括18个圆柱形的碘化钠/碘化铯复合晶体探测器，观测能段2万~25万电子伏，探测面积5100平方厘米，是在这一能段的空间天文卫星中探测面积最大的。望远镜由准直器限定视场，探测器中碘化钠晶体位于上方，用来观测天体的硬X射线，下方的碘化铯晶体记录来自背面的X射线和带电粒子，用来排除背景噪声。同时碘化铯晶体记录的背景信号可用来监测伽马射线暴。

低能X射线望远镜 (LE)

也由呈 60° 夹角的3个探测器机箱组成，观测能段1000~1.5万电子伏，探测面积384平方厘米，包括96路特殊设计的X射线CCD探测器，其时间分辨率1毫秒，远高于普通的X射线CCD探测器，主要研究天体在软X射线能段的快速光变。由于软X射线的能量较低，因此要求探测器需要在 $-80\sim-50^\circ\text{C}$ 的低温状态下工作以降低噪声。

一、慧眼-HXMT卫星简介

探测器	LE: SCD, 384 cm ² ; ME : Si-PIN, 952 cm ² HE : NaI/CsI, 5000 cm ²
能区覆盖	LE: 1-15 keV; ME: 5-30 keV; HE: 20-250 keV GRB mode: 200-3000 keV
时间分辨率	HE: 25μs; ME: 20μs; LE: 1ms
能量分辨率	LE: 2.5% @ 6 keV ME: 8% @ 17.8 keV HE: 19% @ 60 keV
视场	LE: 6°×1.5°; 6°×4°; 60°×3°; blind; ME: 4°×1°; 4°×4°; blind; HE: 5.7°×1.1°; 5.7°×5.7°; blind

一、慧眼-HXMT卫星简介

慧眼-HXMT最初的设计思想，是利用创新的直接解调成像这种方法上的创新，通过仪器设计和运行模式的结合，将对观测仪器的要求转化为对观测控制的要求，达到利用简单仪器抢先实现中高能区全天巡天这一重要目标。

仪器设计：准直型，大视场，宽波段，大面积，强化观测调制

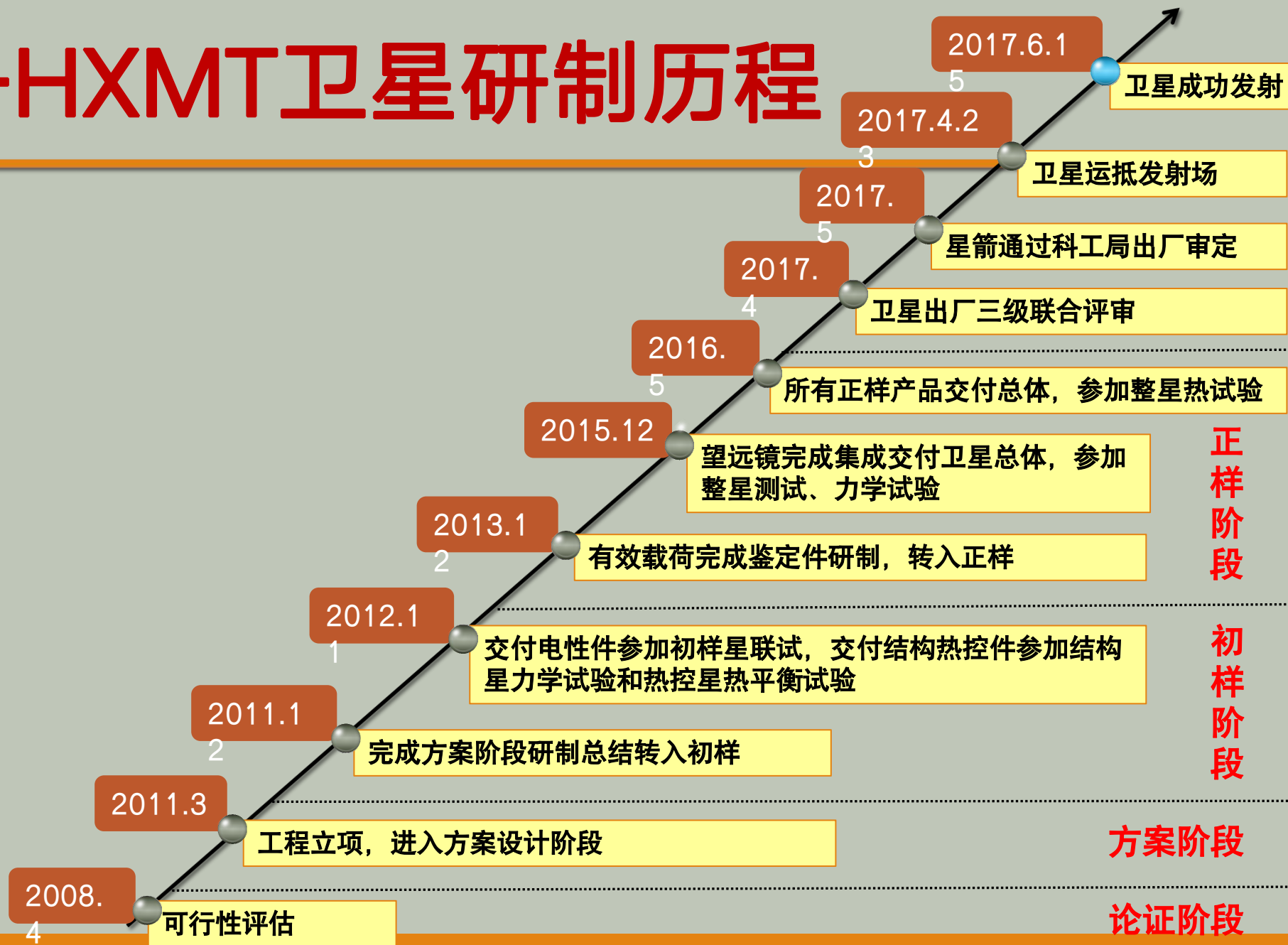
观测优势：覆盖能段宽、灵敏度高、时间精度高、死时间小、光子计数高、对强源观测没有光子堆积效应

具备对天体亮源多波段快速光变的研究能力

存在问题：本底复杂，标定困难，不容易避开其它源影响

慧眼-HXMT卫星研制历程

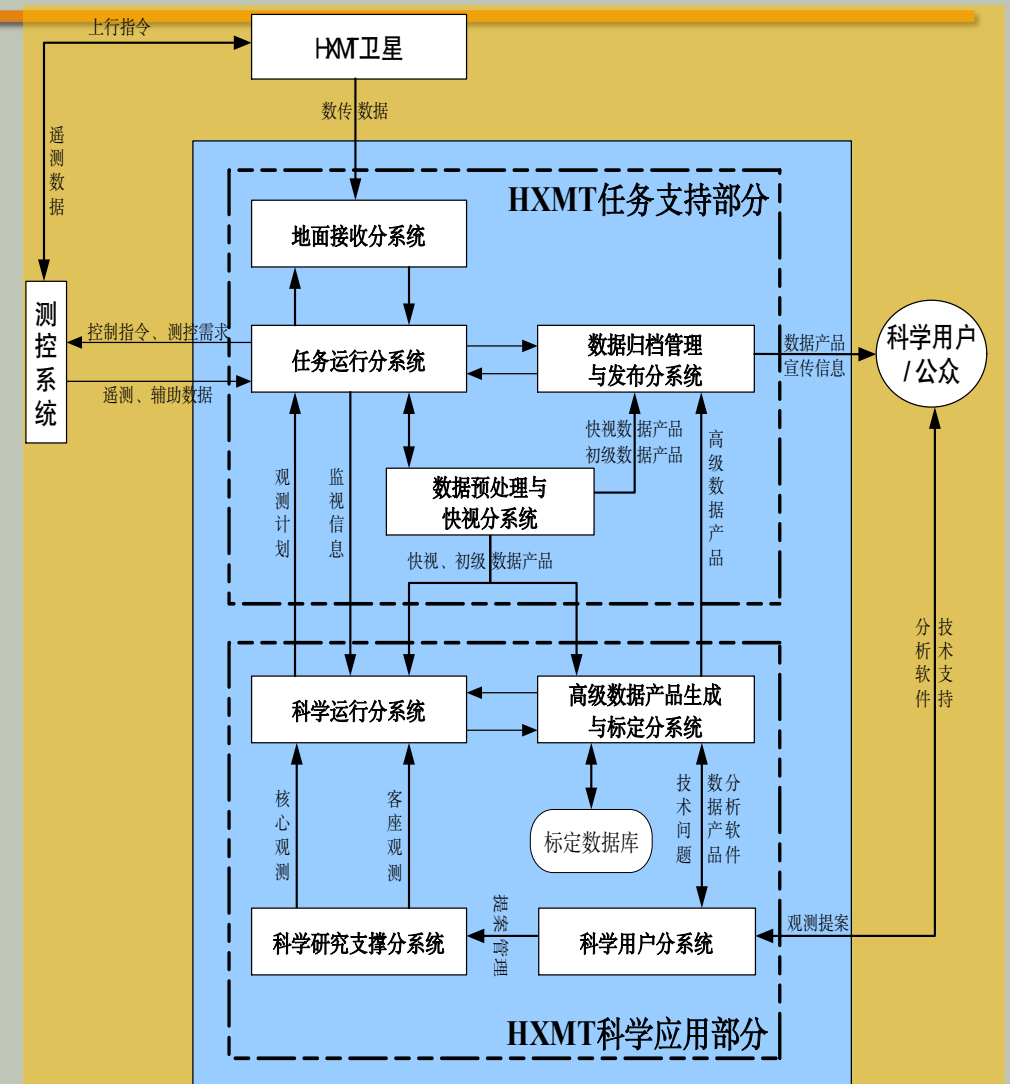
有效载荷研制历程



一、慧眼-HXMT卫星简介

- 慧眼-HXMT地面应用系统分为**任务支持**和**科学应用**两部分。
 - **任务支持部分**包括任务运行分系统、地面接收分系统、数据预处理与快视分系统、数据档案管理与发布分系统。（空间中心承担）
 - **科学应用部分**包括科学运行分系统、高级数据产品生成与标定分系统、科学用户分系统、科学研究支撑分系统。（高能所承担）

分为上行和下行两个流程。

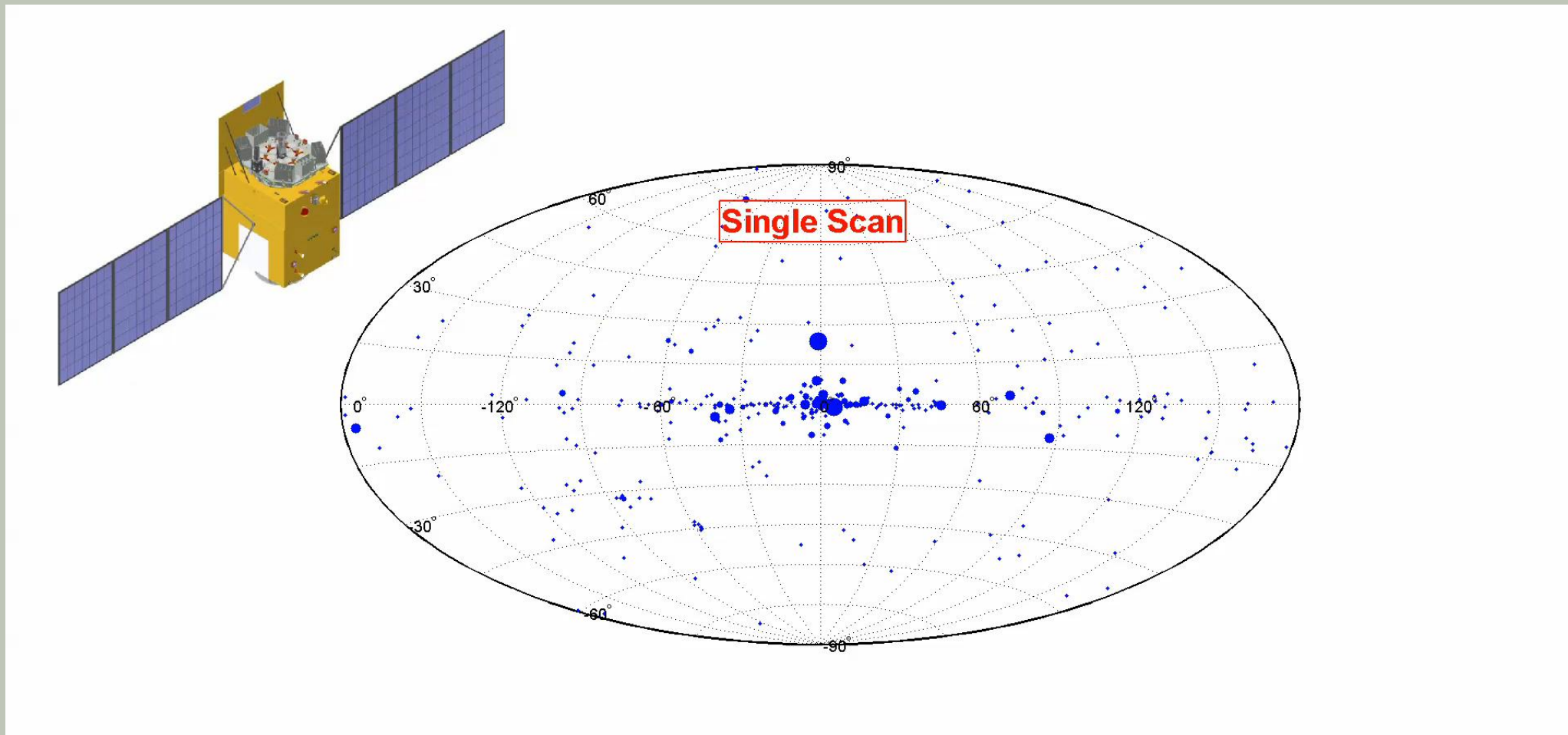


一、慧眼-HXMT卫星简介

科学应用部分研制历程

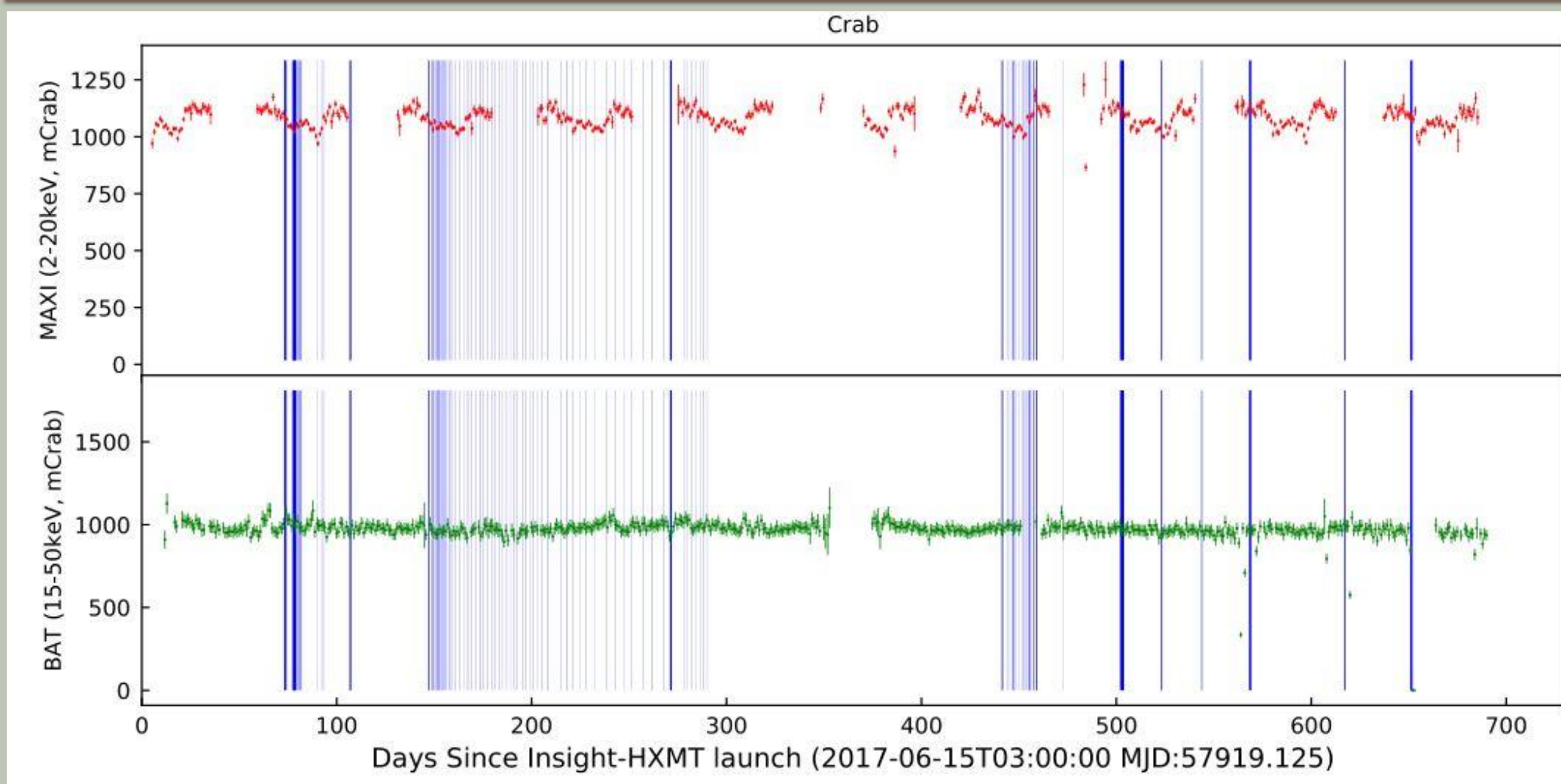


二、观测模式与科学运行（银道面重复扫描）

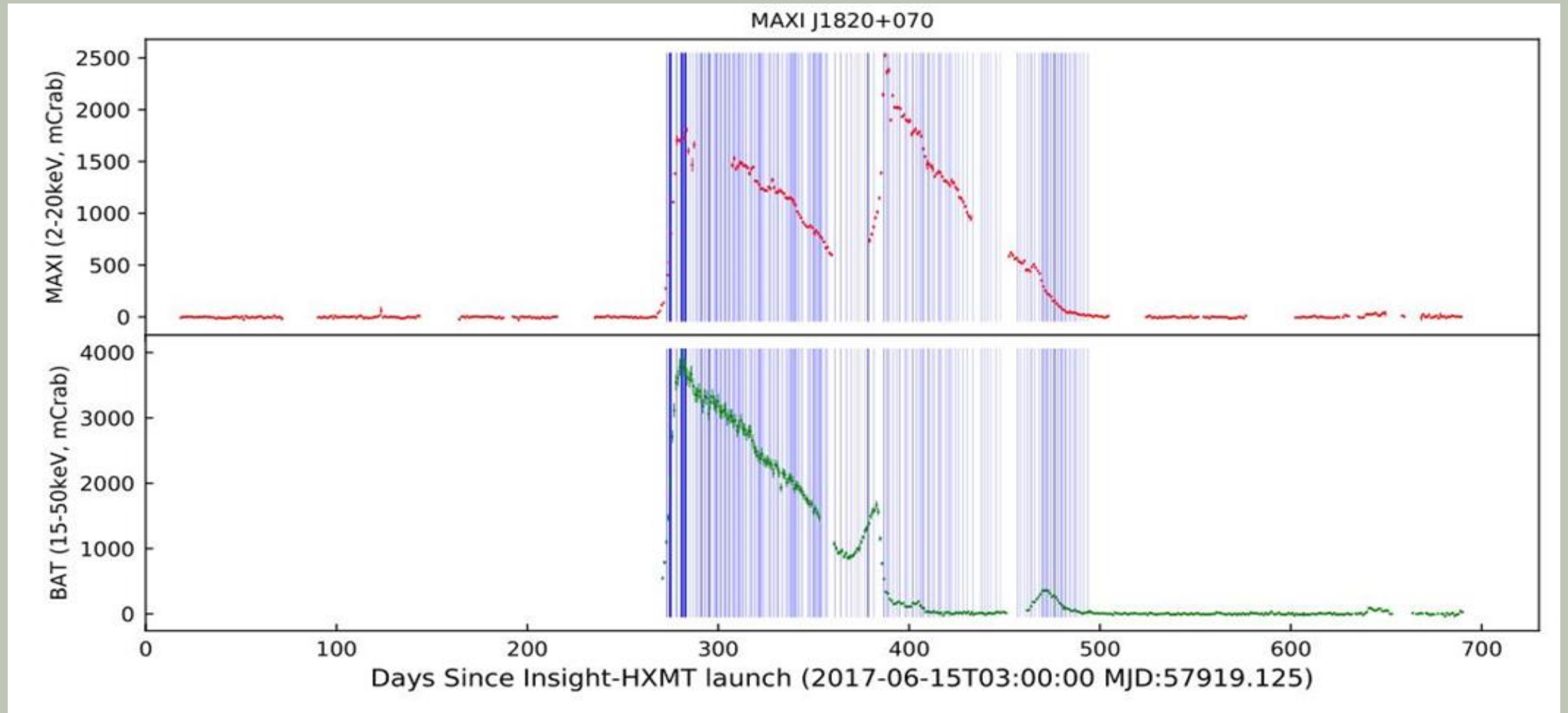


重复扫描Milky Way

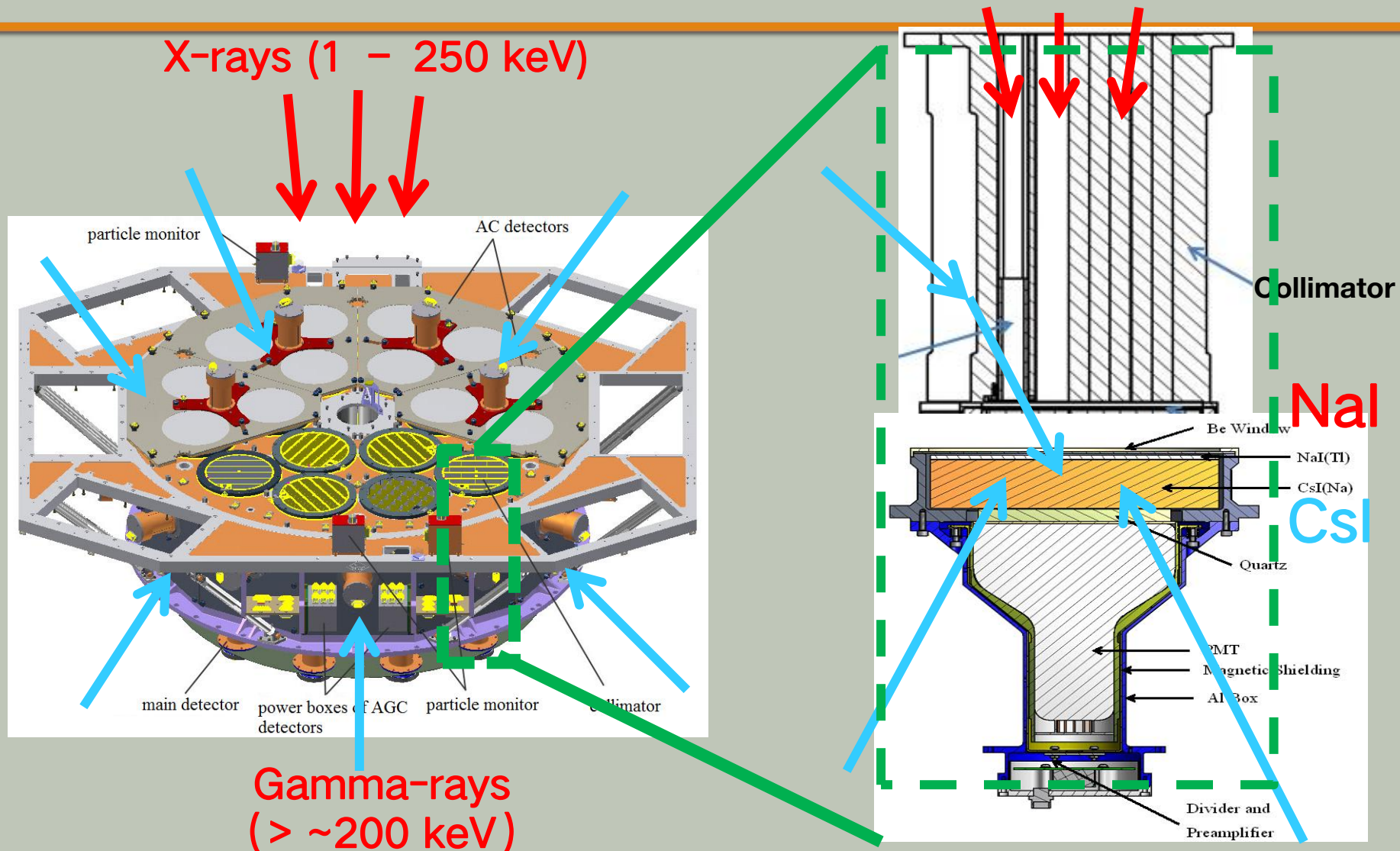
二、观测模式与科学运行（高频次监测）



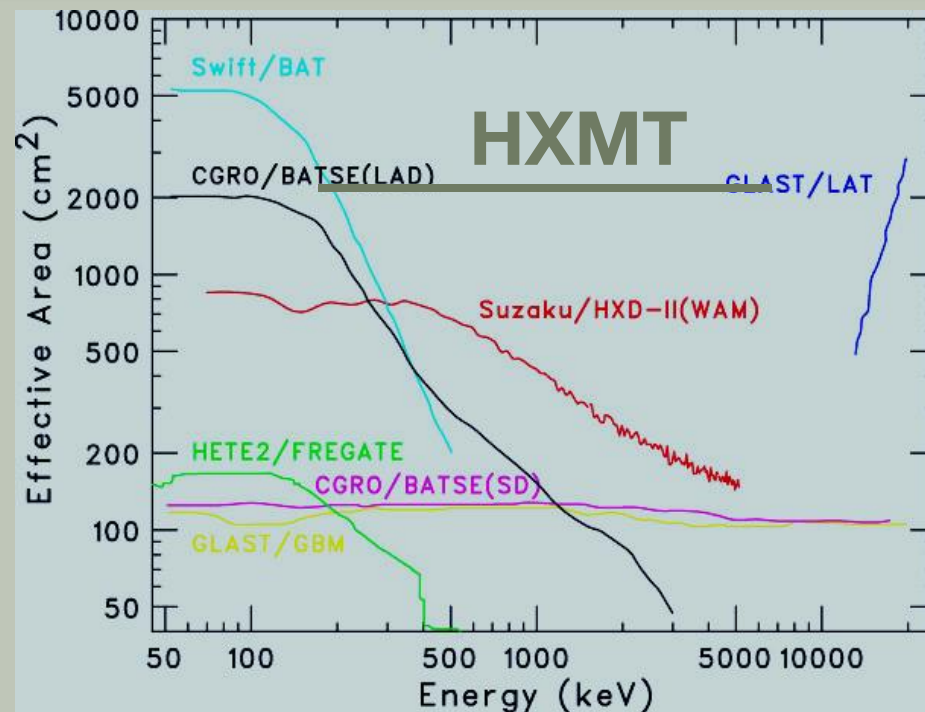
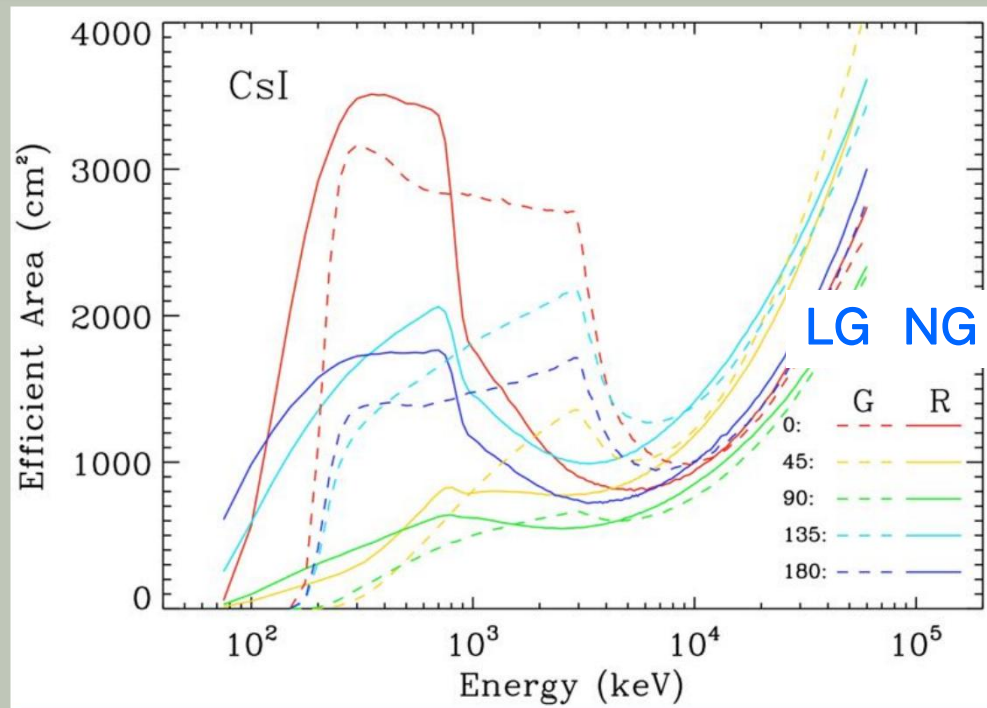
二、观测模式与科学运行（高统计量观测）



二、观测模式与科学运行（GRB探测）

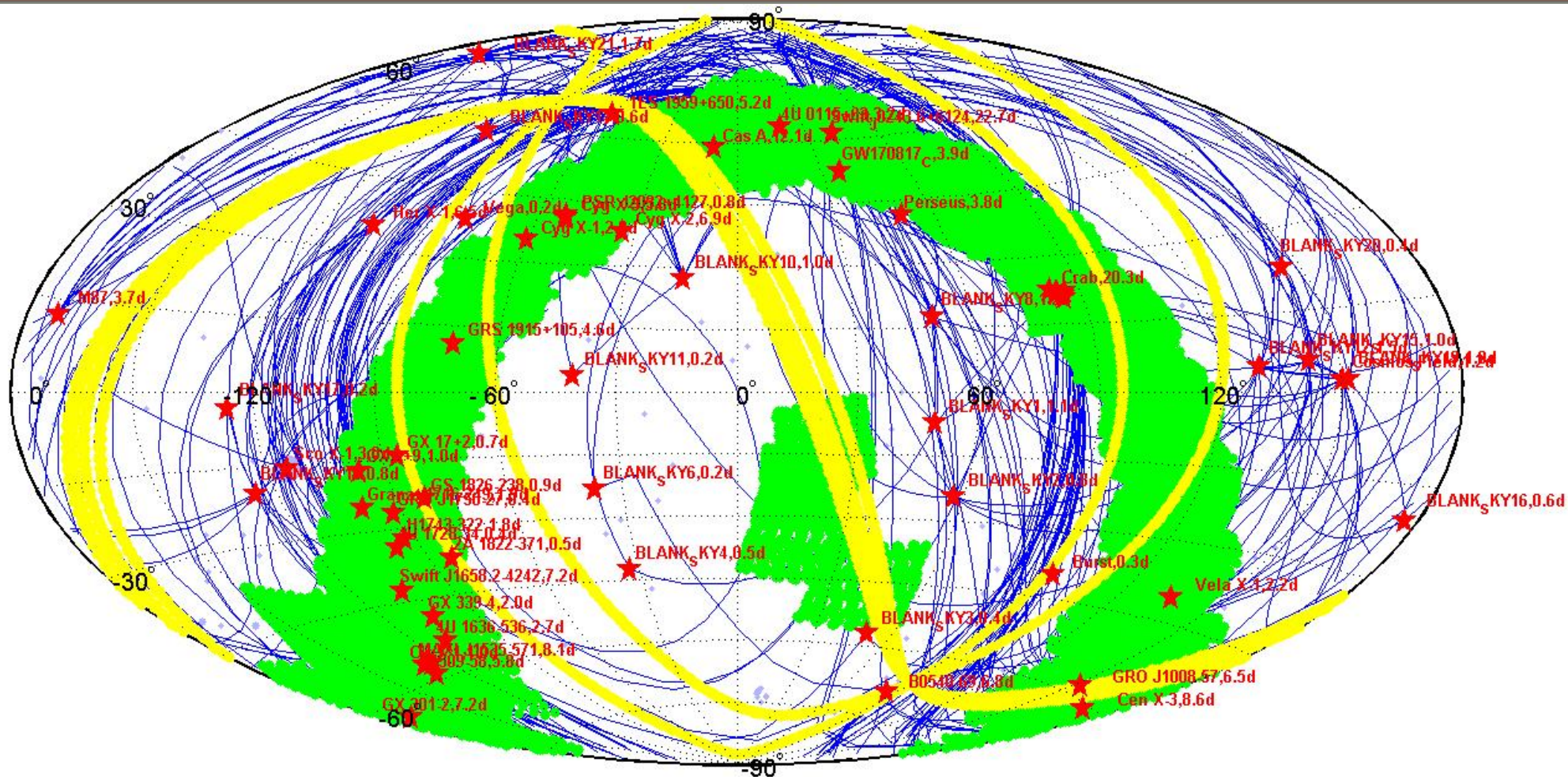


二、观测模式与科学运行（GRB探测）



- 在NG mode和LG mode，都可以进行GRB检测
- 视场范围：全天（除去地球遮挡部分）
- 在~MeV能段，有效面积达到~1000 cm^2 ，使其成为面积最大的GRB监测器之一。

二、观测模式与科学运行



部分已观测源在天球上的分布

二、观测模式与科学运行

观测源	等级 (A/B/C)	RA	DEC	提案类型	观测时间 (天)	提案号	任务号	PI（核心组成员加粗）	批准观测时间 (ks)	批准观测次数	实际观测时间	实际观测次数
Cen X-3	A	11:21:15.092	-60:37:25.628	核心-持续源	79	P0201012	T020101219	Prof. ShuZhang	500	10	150	3
GX 301-2		12:26:37.561	-62:46:13.260				T020101231	Prof. ShuZhang	400	10	135	3
Vela X-1		09:02:6.861	-40:33:16.896				T020101266	Prof. ShuZhang	1000	10	200	2
GX 17+2		C	18:16:1.389				-14:02:10.620	T020101230	Prof. ShuZhang	1500	10	200
Sco X-1	A	16:19:55.069	-15:38:25.020	客座-持续源	22	P0205034	T020503401	Dr. Shumei Jia	400	4	80	8
GX 3+1		17:47:56.000	-26:33:49.000			P0205037	T020503701	Dr. LianTao	20	1		
GX 340+0	B	16:45:47.700	-45:36:40.000			P0205037	T020503702	Dr. LianTao	20	1		
GX 349+2		17:05:44.492	-36:25:23.050			P0205042	T020504201	Dr. Angelo F. Gambino	100	1	110	4
OA0 1657-414		17:00:48.88	-41:39:21.46			P0205035	T020503503	Dr. Lorenzo Ducci	200	1		
Ser X-1		18:39:57.560	+05:02:9.600			P0205037	T020503703	Dr. LianTao	20	1	20	1
PSR J2022+3842	C	20:22:21.689	38:42:14.82			P0203022	T020302201	Dr. Yuanjie, Du	60	3	40	1
SSDS_205100+304000_7	B	20:51:00	30:40:00			P0205014	T020501402	Dr. JuGuan	100	2	100	2
SSDS_085200-461200_7		08:52:00	-46:12:00			P0205014	T020501401	Dr. JuGuan	150	3	50	1
Cas A	A	23:23:24	58:48:54			定标提案	48	P0202041	T020204123	Dr. LimingSong	800	8
Crab		05:34:31.940	+22:00:52.200	T020204101	Dr. LimingSong				450	9	210	4
M87		12:30:49.42	12:23:28	T020204124	Dr. LimingSong				200	2		
Tycho		00:25:13.99	64:08:40	T020204125	Dr. LimingSong				100	1		
Crab小天区扫描		05:34:31.940	+22:00:52.200	T020204126	Dr. LimingSong				1200	24	600	12
空天区观测	A				24	P0202041			980	98	500	50
银道面扫描					111	P0201013			9614	836	3982	362
					284				17814	1035	6877	465
4U 1636-536	A			ToO		P0201012	T020101212				50	5
Aql X-1	A						T020101216				290	27
Cir X-1	A						T020101220				210	21
Cyg X-1	A						T020101221				310	19
Cyg X-2	B						T020101222				85	6
Cyg X-3	B						T020101223				225	15
GRO J1008-57	B						T020101226				110	6
GS 1826-238	A						T020101229				45	1
MAXI J1348-630	C						T020101201				520	29
SGR 1935+2154	B					P0204025	T020402511				5	50
GRS 1915+105	B					P0205033	T020503301				140	3
MAXI J1348-630	-					P0214002	T021400201				110	7
EXO 1846-031	-					P0214050	T021405001				800	42
PKS 1502+106	-					P0214051	T021405101				40	4
XTE J1739-28	-					P0214054	T021405401				25	1
SWIFT J1845.7-0037	-					P0214055	T021405501				140	7
IGR J19294+1816	-					P0214056	T021405601				100	6
MAXI J0637-430	-					P0214057	T021405701				400	18
											3605	267

二、观测模式与科学运行

卫星 在轨运行8年



轨道高度 ~530 km

轨道倾角 43°

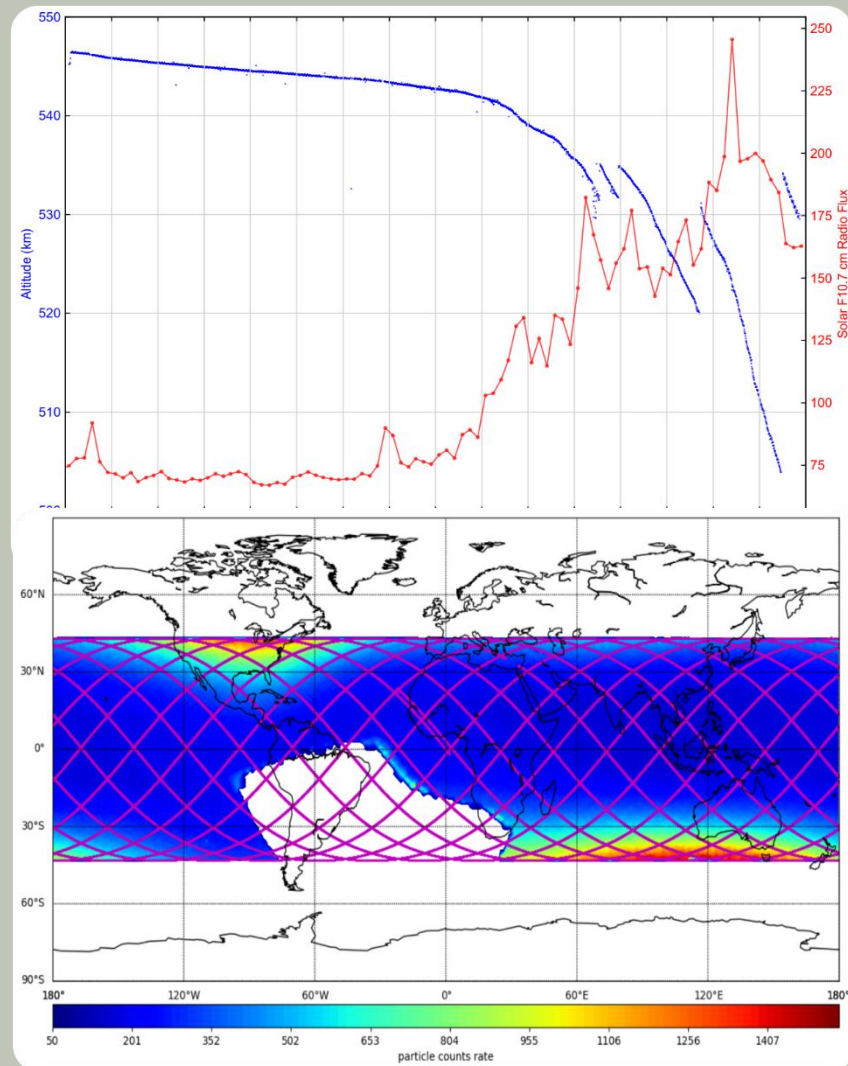
卫星重量 ~2500 kg

设计寿命 4 年

太阳避免角 70°

轨道控制 2025年2月25~2月28日

25年轨控耗费燃料~20kg, 现剩余~129.8kg



轨道高度

轨道足点

二、观测模式与科学运行

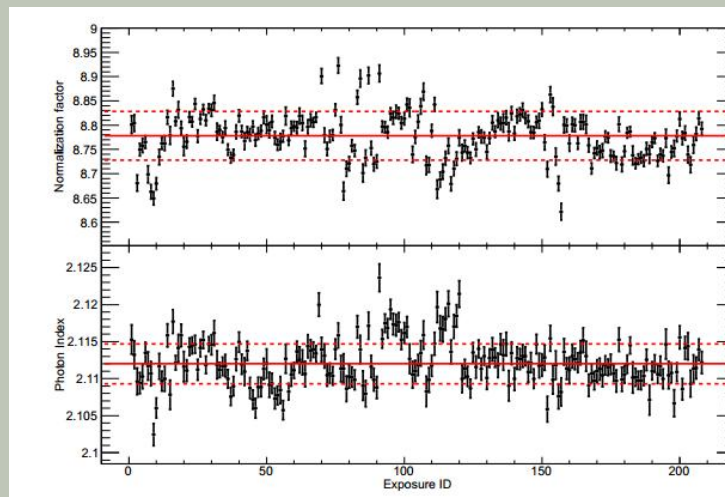
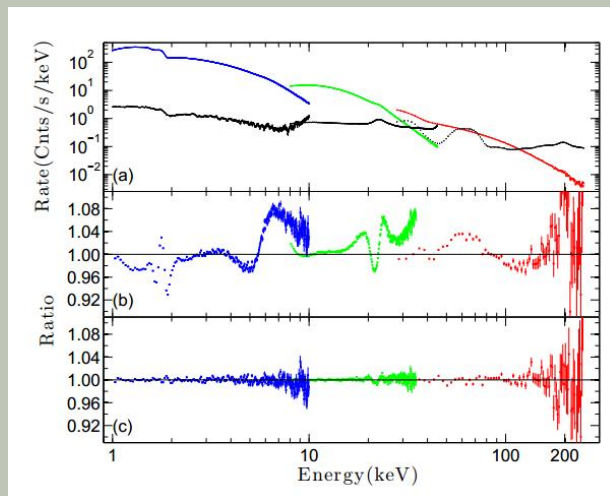


Table 4: The biases and scatter of Crab parameters for HE, ME and LE. Normalization factor is N and power-law photon index is Γ .

	Exposure	Observation times	N_{bias}	$N_{scatter}$	Γ_{bias}	$\Gamma_{scatter}$
HE	500s-1000s	18	0.6%	5.2%	0.003%	0.7%
	1000s-2000s	56	1.7%	4.3%	0.16%	0.6%
	2000s-3000s	79	2.4%	3.6%	0.24%	0.6%
	>3000s	82	2.8%	2.9%	0.3%	0.4%
	>1000s	217	2.4%	3.5%	0.25%	0.51%
ME	500s-1000s	13	-3.8%	8.0%	-0.88%	1.53%
	1000s-2000s	74	-2.0%	4.5%	-0.40%	0.91%
	2000s-3000s	128	-1.0%	4.4%	-0.24%	0.84%
	>3000s	41	-0.08%	3.9%	-0.07%	0.79%
	>1000s	243	-1.2%	4.4%	-0.26%	0.86%
LE	500s-1000s	22	0.18%	0.75%	0.22%	0.14%
	1000s-2000s	102	0.21%	0.73%	0.12%	0.13%
	2000s-3000s	83	0.17%	0.37%	0.08%	0.13%
	>3000s	23	0.33%	0.36%	0.11%	0.07%
	>1000s	208	0.21%	0.57%	0.10%	0.13%

标定结果，能谱拟合在各个能段的系统误差：

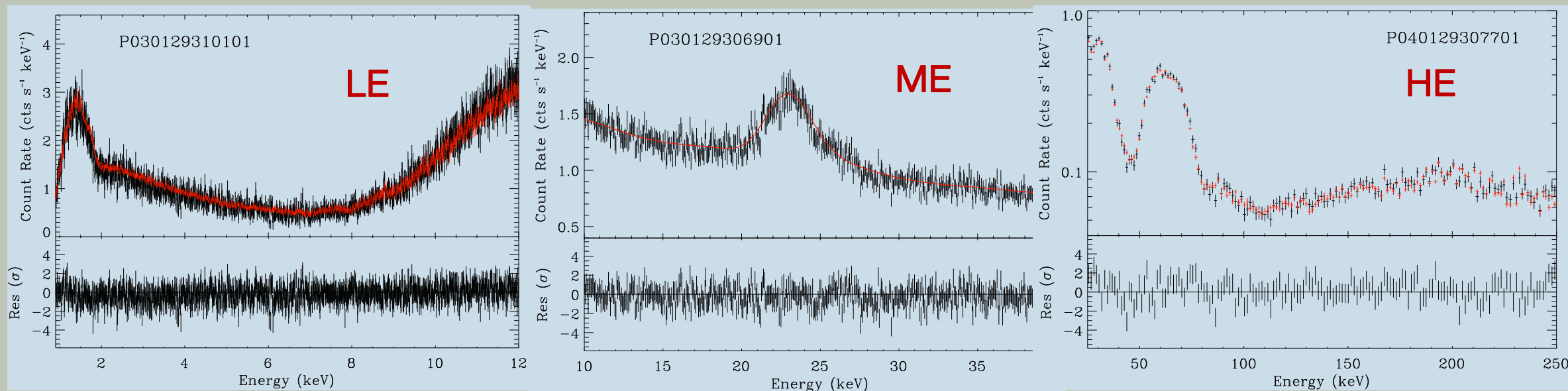
HE： 在28-120 keV系统误差小于2%，在120 keV以上系统误差在2%-10%；

ME： 在10-35 keV系统误差为1.5%；

LE： 在1-7 keV之间系统误差为1%，在7-10 keV之间为2%。

(2020, JHEAp, 27)

二、观测模式与科学运行



本底模型持续进行更新，本底估计精度满足项目指标以及科学分析要求。

本底估计系统误差：

- LE (2-10keV) : 4.6%
- ME (10-40keV) : 1.6%
- HE (25-250keV) : 2.1%

二、观测模式与科学运行

轮次	征集时间	提案数	观测申请	观测时间	ToO
AO01	2016.8-9	90	517	2017.11-2019.06	39
AO02	2019.1-2	35	349	2019.07-2020.07	26
AO03	2020.4-5	34	329	2020.08-2021.07	16
AO04	2021.4-5	33	333	2021.08-2022.08	30
AO05	2022.4-5	43	339	2022.09-2023.08	30
AO06	2023.4-6	50	337	2023.09-2024.08	10
AO07	2024.4-6	49	330	2024.09-2025.08	5
AO08	2024.4-6	48	592	2024.09-2025.08	/

2025年4月

第八轮提案征集

发布第八轮提案征集公告及更新白皮书V7.0（中英文）

2025年4-6月

面向国内外用户公开征集提案

2025年7-8月

提案初筛

技术评估

科学评估

遴选及评级

征集结果

共征集到有效观测提案
49个

观测申请592个



核心观测（定点）

88.7Ms



银道面扫描

2.2Ms



客座观测

77.6Ms



标定及本底观测

2.4Ms

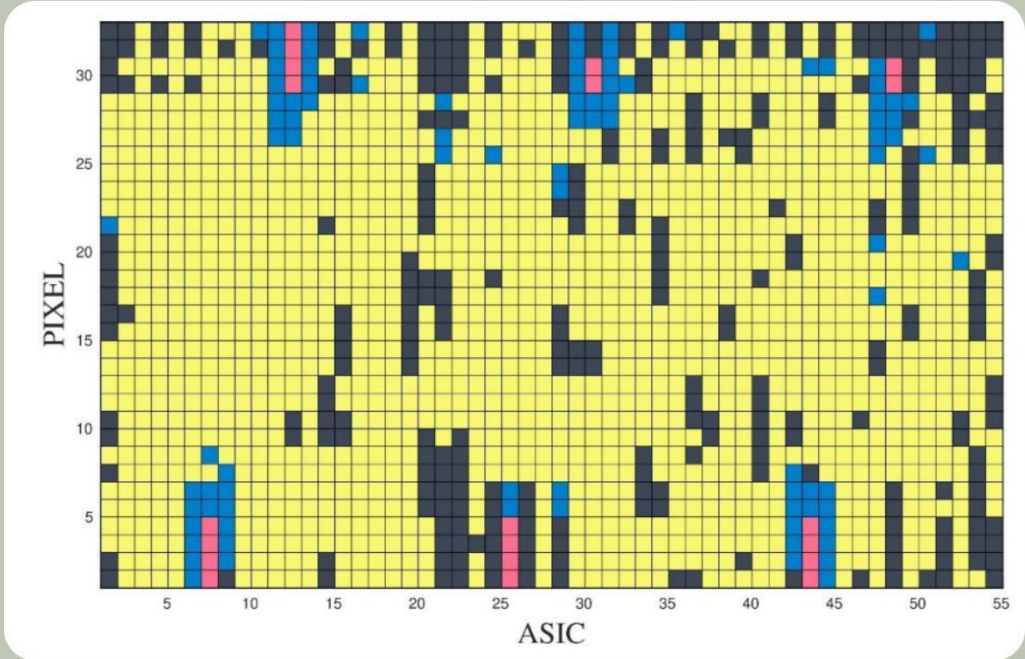
二、观测模式与科学运行

三个望远镜情况



- 在轨温度 满足设计指标
- 时间系统 工作正常
- 高能载荷 18个工作正常
- 中能载荷 关闭像素298个 (17%)
- 低能载荷 关闭CCD8个 (8%)

满足科学观测需求

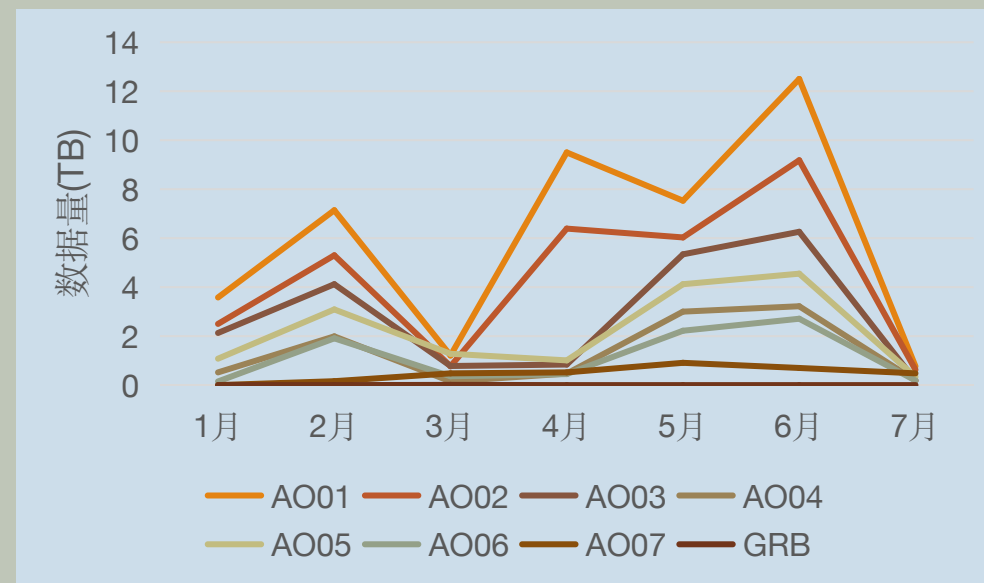
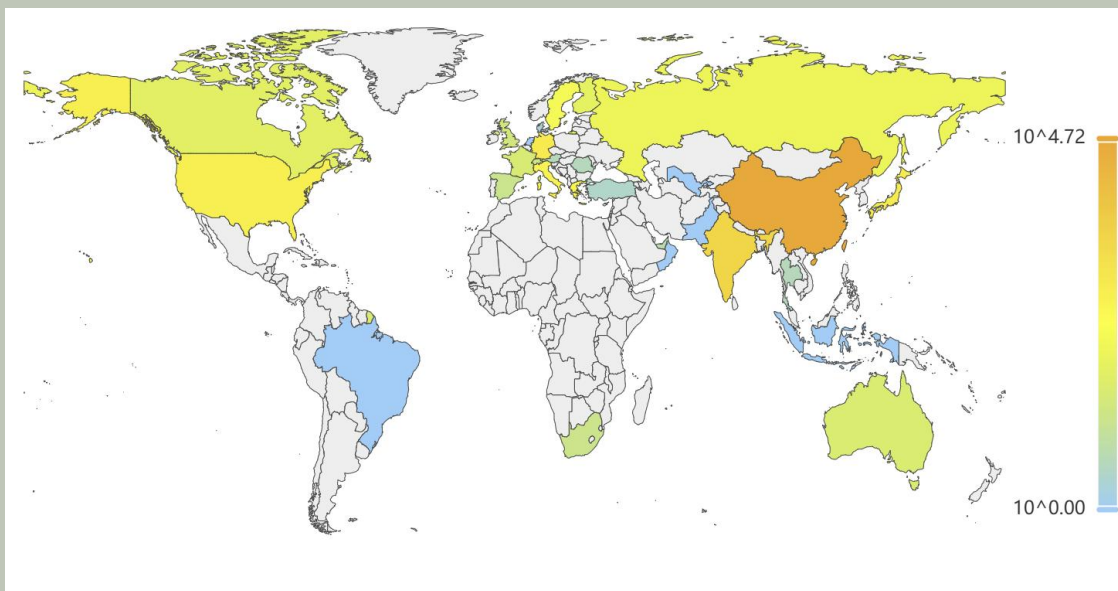


CCD_ID	关闭时间 (UTC)	视场
29	2017-06-24T15:37:26	小
87	2017-06-24T15:37:26	小
1	2017-07-28T20:00:30	大
15	2017-09-15T06:06:55	大
69	2019-04-14T19:36:29	大
54	2019-06-18T15:44:11	小
76	2020-06-30T19:42:13	小
33	2024-07-18T01:30:21	大

二、观测模式与科学运行

累计产生有效一级定点观测数据产品4338条；分13个批次公开释放一级数据产品共计约142.4TB；数据公开率超过92%。

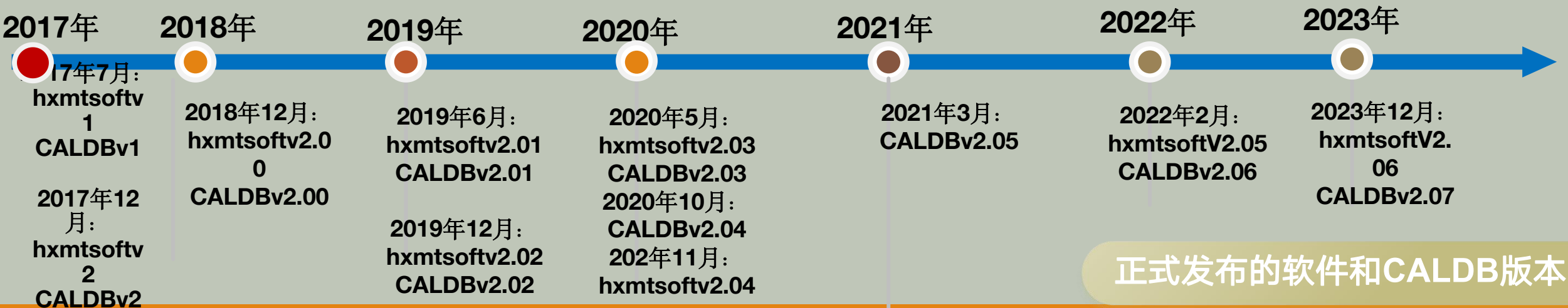
数据公开下载网址：<http://archive.hxmt.cn/proposal>
<http://hxmt.nssdc.ac.cn>



二、观测模式与科学运行

在国际通用**HEADAS**架构下开发，与国际上其他卫星的数据分析软件和标定数据库（CALDB）使用方式一致：

- 2023年12月：发布数据分析软件v2.06和CALDBv2.07。
- **软件更新**：修正bug，更新坏探测器文件，本底模型文件，根据用户需求提供新的功能模块，Pipeline优化等。
- **同时发布**：更新说明，软件和CALDB安装说明，用户手册



正式发布的软件和CALDB版本

监

Th

sc

sh

数据分析软件2.02更新说明

Insight-HXMT卫星用户数据分析软件2.02更新说明 [pdf]

1. 标定工具

- HE/ME/LE改进了PSF算法，并更新了相应的标定工具。

2. HE数据分析软件

- HE使用了新的本底数据库，脉冲宽度的推荐选择从20-70改为54-70（目前用户软件的默认参数是54-70）。
- hepical模块默认去掉大部分CsI的事例，以便加快HE数据分析后续步骤的运行速度。

3. ME数据分析软件

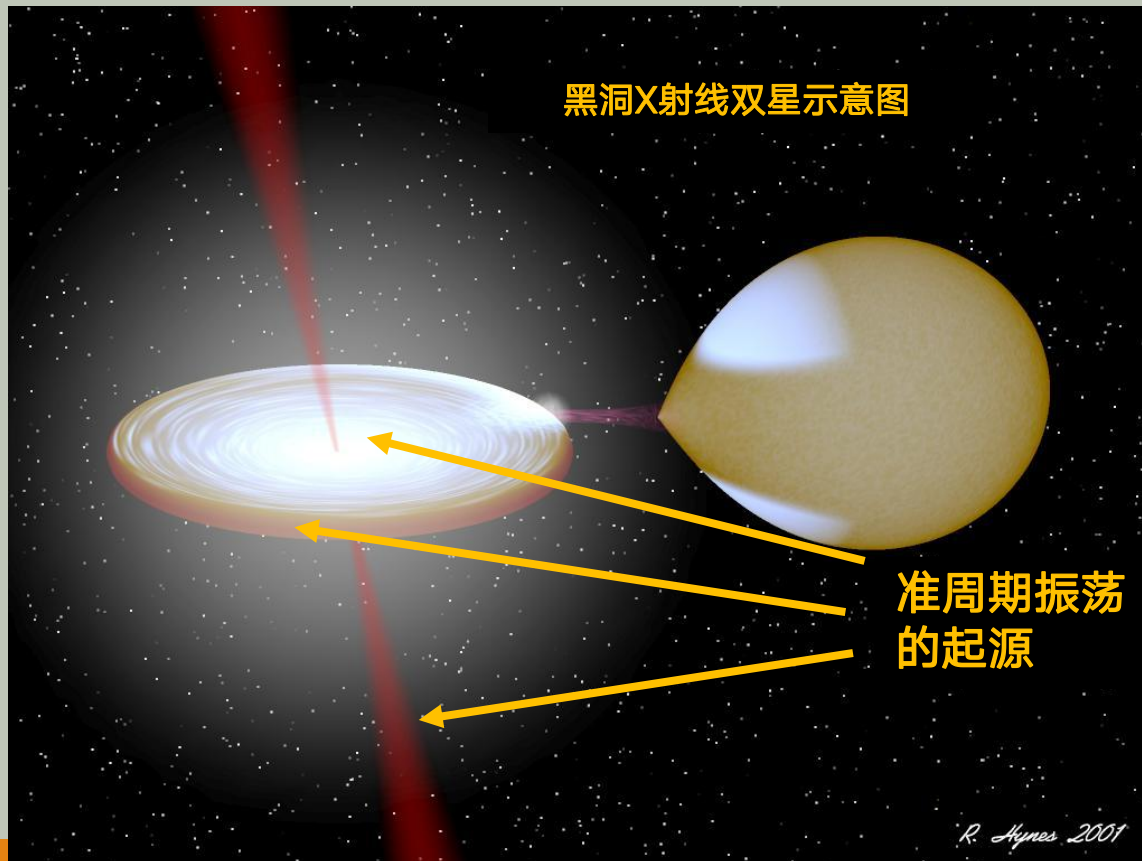
- 更新了megti的算法
- 向用户开放了动态选择好像素的功能，因此各相关模块有如下改动：
 - megti模块增加了一个输入和一个输出接口（详见用户手册），

三、研究成果

- 开拓了黑洞和中子星双星系统硬X射线快速光变和能谱研究的新窗口
 - 将黑洞系统准周期振荡的能量上限提高了10倍左右
 - 直接测量到宇宙中最强的磁场
 - 发现中子星双星系统、GRB的一系列高能辐射新现象
- 以最高灵敏度和数据质量发现快速射电暴（FRB）的高能电磁对应体，提供了丰富的高能辐射信息
- 完成了国际上最高精度的脉冲星导航试验，为航天器自主导航进行了重要技术探索和验证

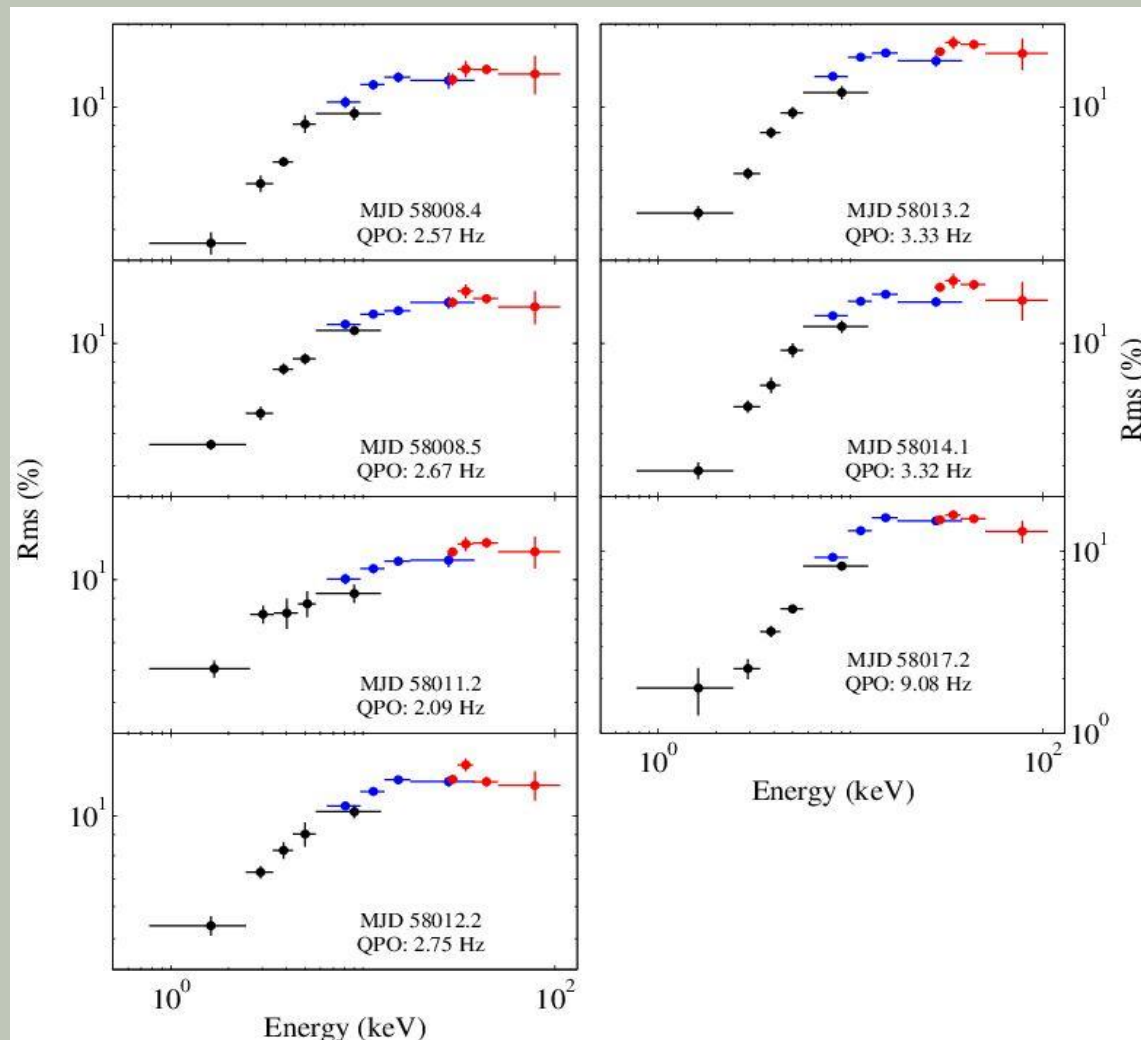
三、研究成果—高能准周期震荡QPO

X射线双星是一个黑洞或中子星与一个正常恒星组成的双星系统。正常恒星的物质在强引力作用下落向中子星或黑洞，并在该过程中发出强烈的X射线辐射。



准周期振荡（QPO）是天体的流强在中心频率附近范围内的准周期变化行为，是黑洞双星系统中最主要的时变特征之一。QPO可能起源于黑洞双星系统的吸积盘、高温电子冕（对低能光子的Compton化）或者喷流（相对论粒子？）。~100keV以上的辐射产生于热辐射的可能性很小，因此对QPO起源将提供强烈的限制。

三、研究成果—高能准周期振荡QPO

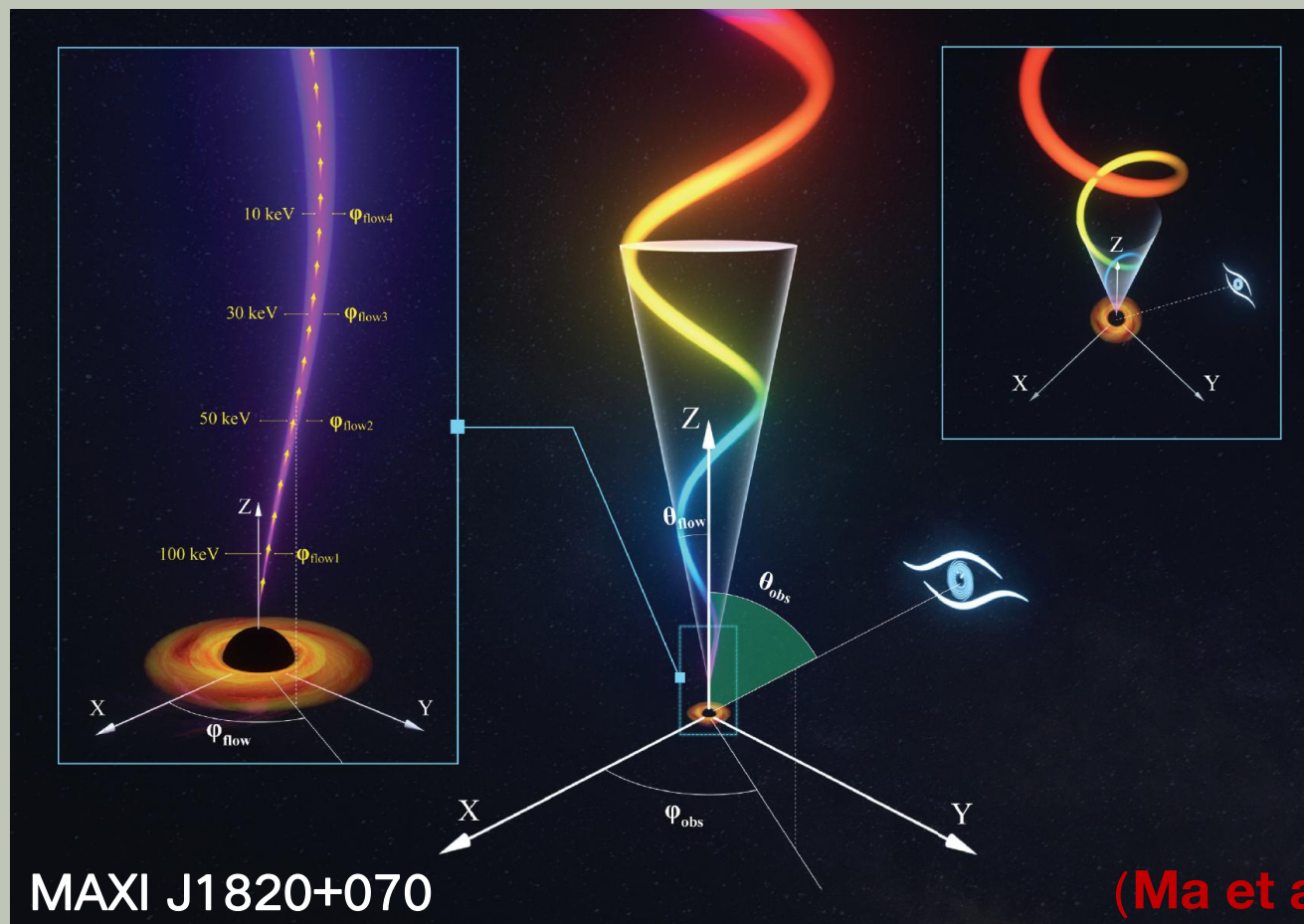


慧眼卫星对黑洞候选体MAXI J1535-571进行了高频定点观测，观测时间覆盖了爆发演化过程中的态转换过程，首次将准周期振荡研究从 $<30\text{keV}$ 延伸到 $\sim 100\text{keV}$ 。并且发现RMS在 $\sim 20\text{keV}$ 处存在拐折。

➤ 强烈支持准周期振荡的非热辐射起源。

三、研究成果—离黑洞最近的相对论喷流

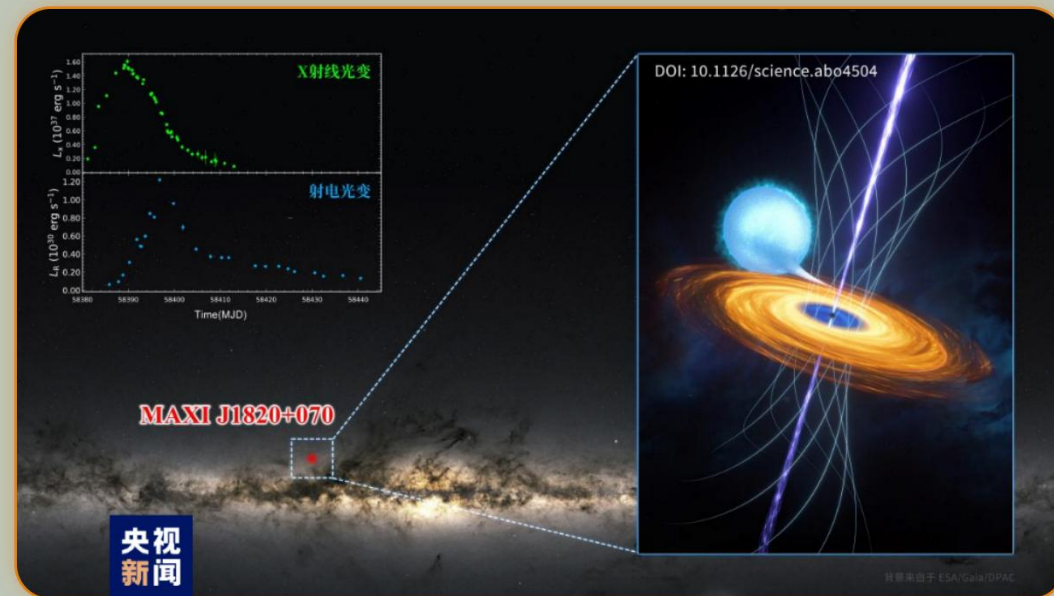
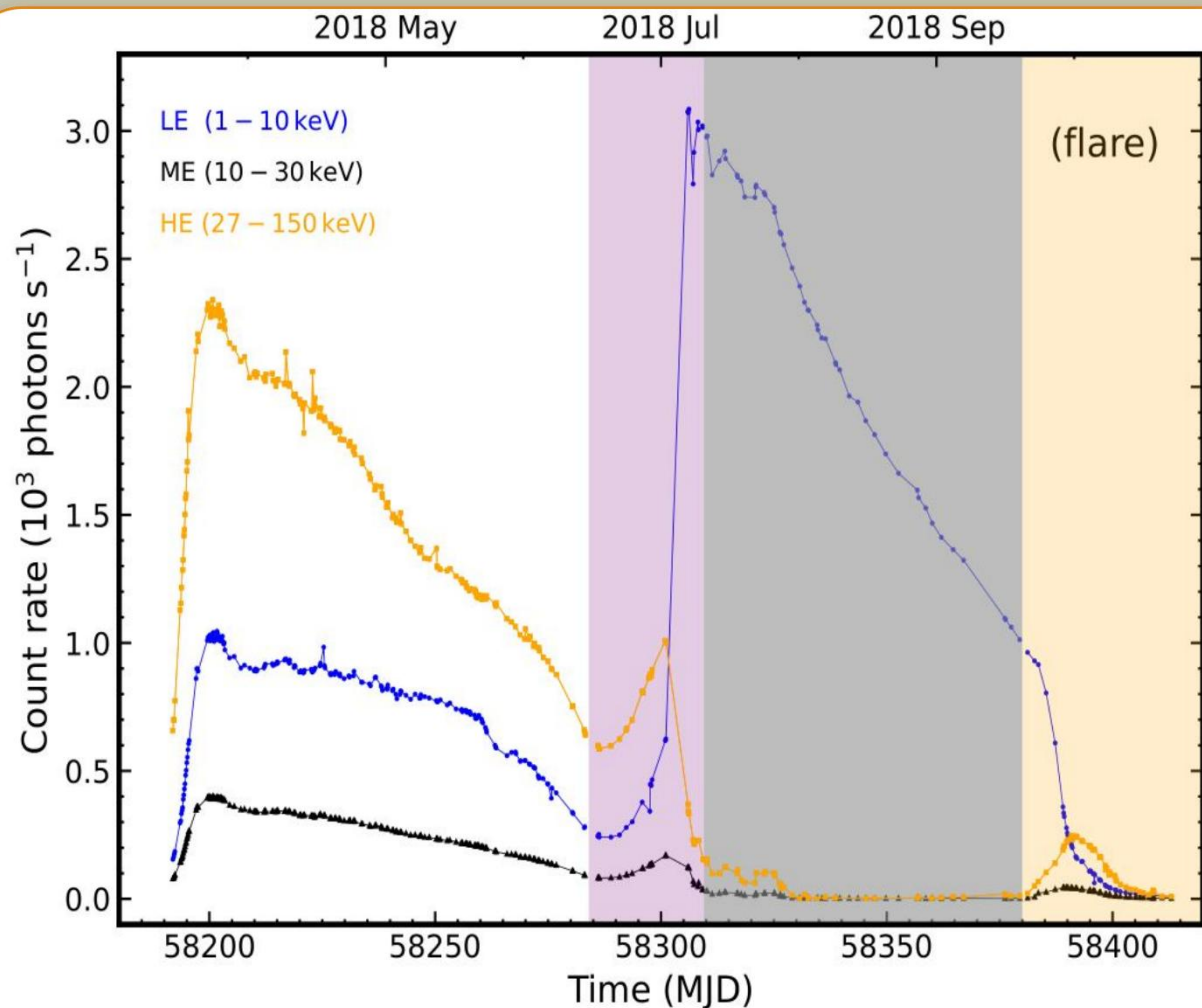
慧眼观测结果：低频QPO是喷流的进动效应，也是距离黑洞最近的相对论喷流



(Ma et al. Nature Astronomy, 2020)



三、研究成果—吸积过程中的磁囚禁盘



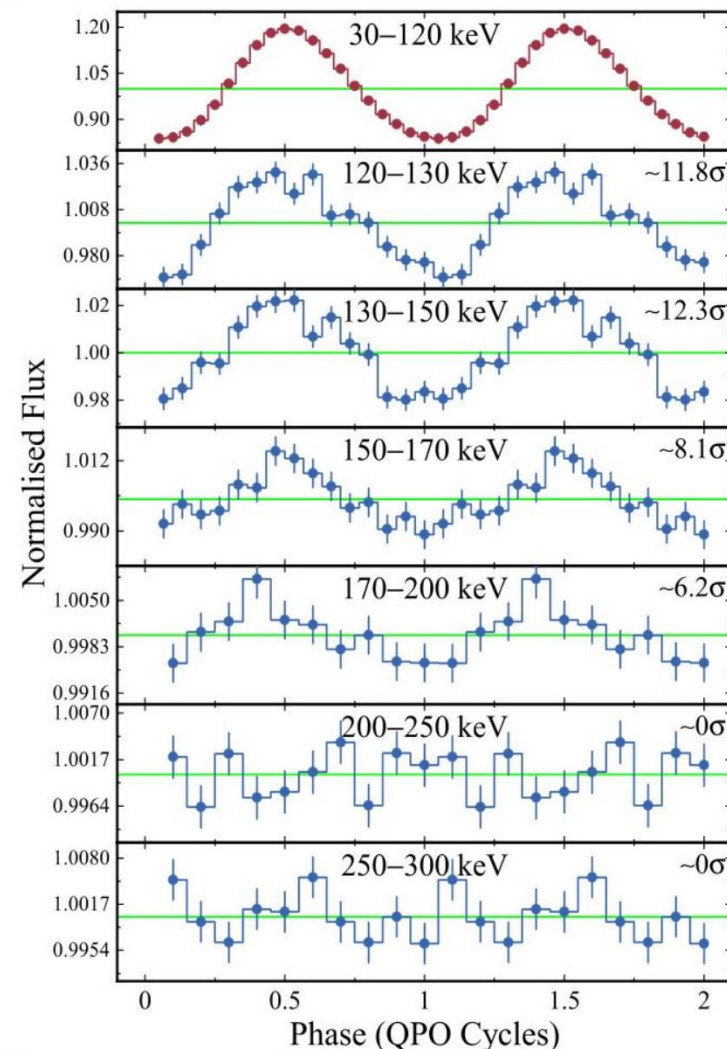
利用慧眼对黑洞MAXI J820-070的高频次和宽波段观测数据，结合多波段数据，首次揭示吸积流中的磁场输运过程及黑洞附近热吸积流中形成磁囚禁盘的完整过程，迄今为止磁囚禁盘存在的最直接观测证据，2023年9月1日正式发表于《Science》。

三、研究结果—高能准周期振荡QPO

创新性地将**希尔伯特-黄变换**应用到黑洞双星系统的准周期振荡信号分析中，获得了**分相位**的能谱及参数。

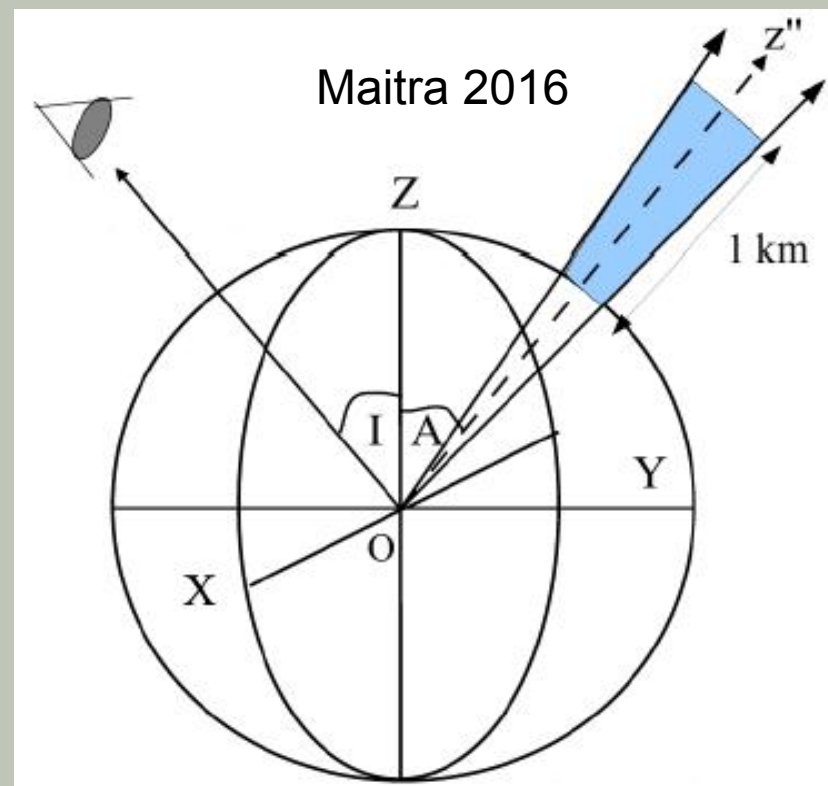
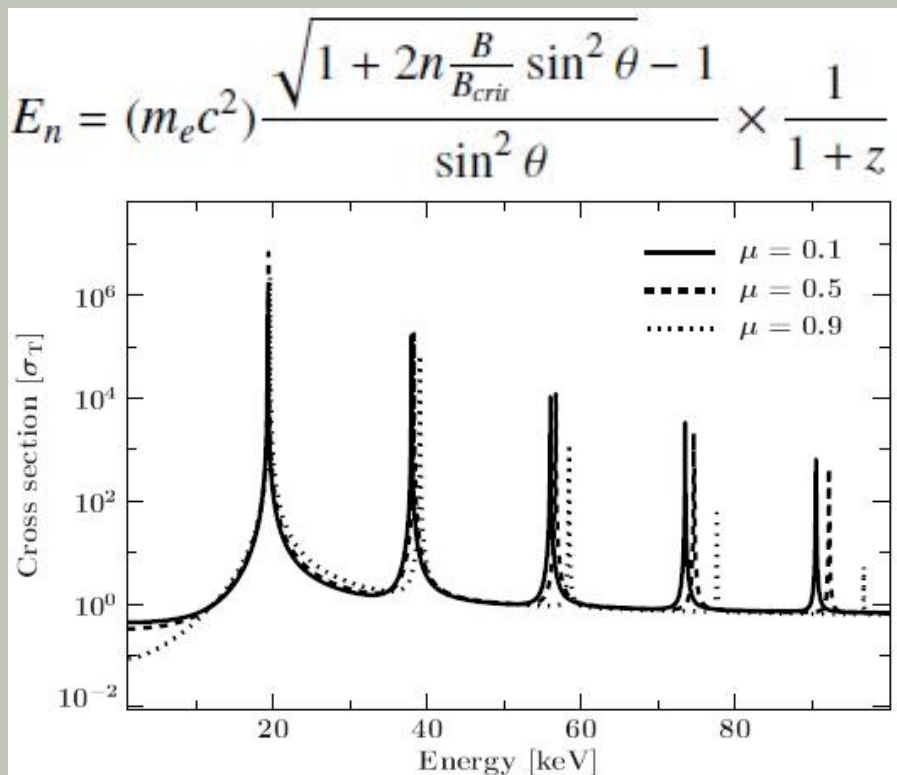
打破了慧眼保持的准周期信号**能量上限的记录**，采用新方法后准周期信号的能量上限从100 keV提升至接近200 keV。

(Shui Q. et al. 2024, ApJL)



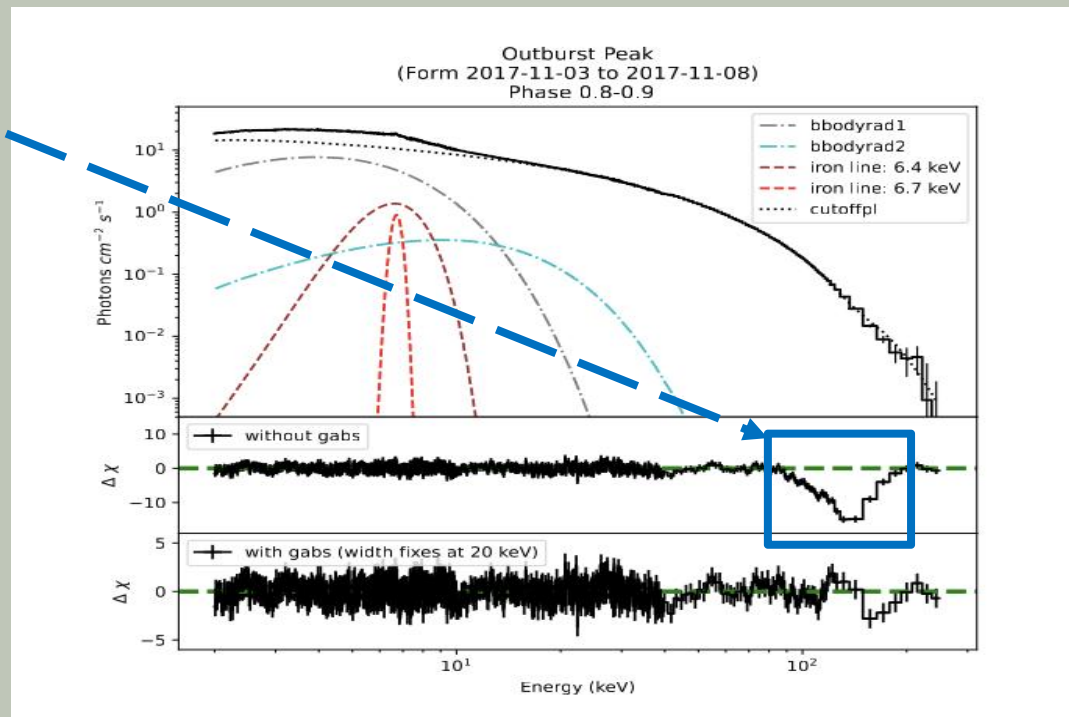
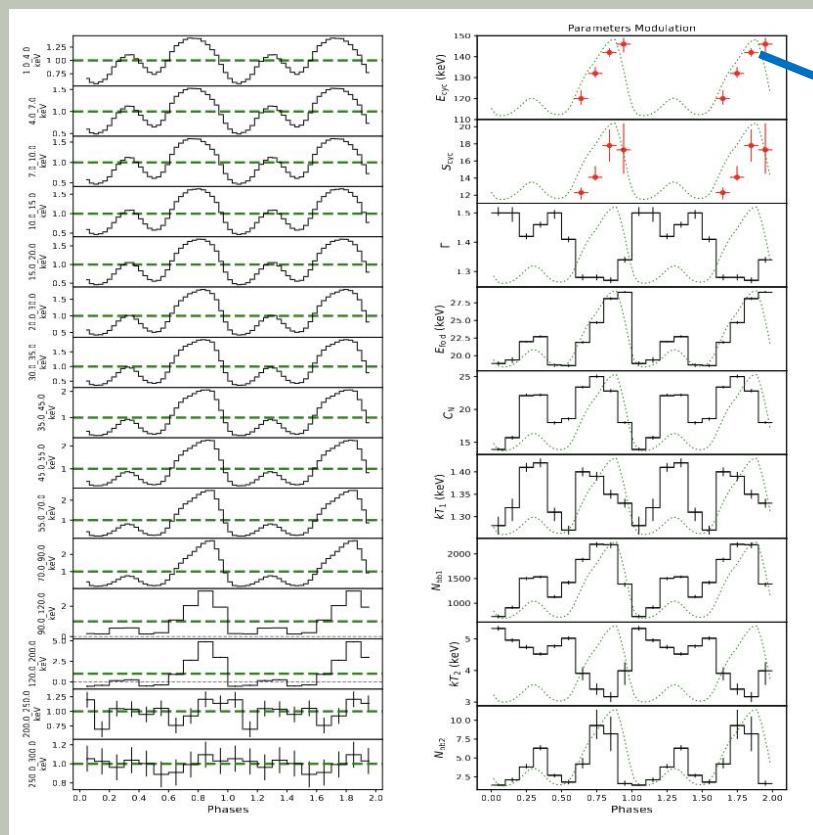
三、研究成果-最强磁场直接测量

在强磁场中，电子绕磁力线回旋运动会呈现出量子态（朗道能级）。电子在不同能级的跃迁会吸收光子，会形成回旋吸收线。**回旋吸收线是直接测量致密星磁场强度的唯一途径。**



三、研究成果-最强磁场直接测量

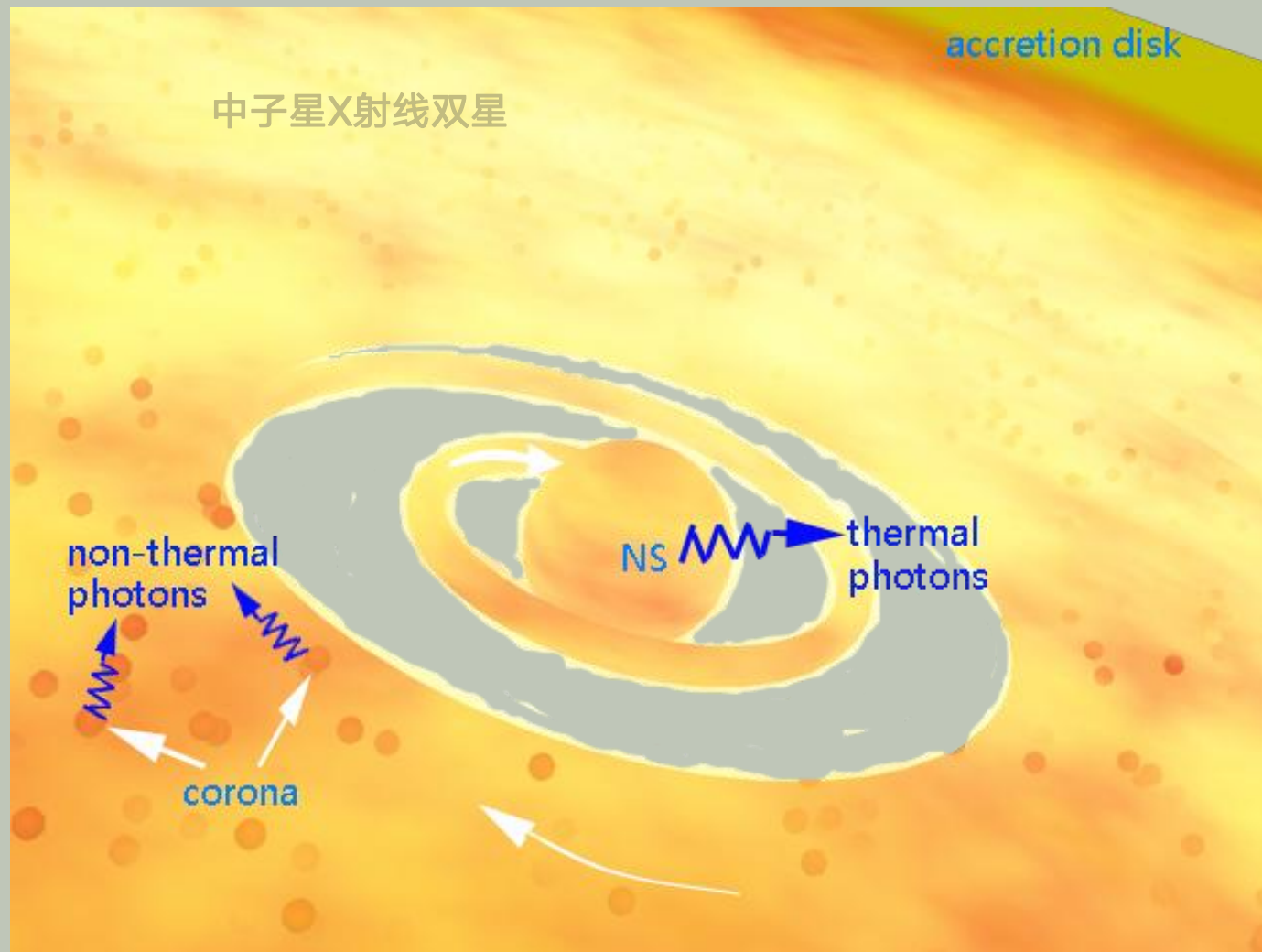
高能X射线望远镜在30-250 keV能段有约5000平方厘米的几何面积，
慧眼多次刷新回旋吸收线能量以及宇宙最强磁场的直接测量记录



6-18 σ 显著性探测到基频回旋吸收线146 keV，
16 亿特斯拉磁场，成为最强磁场纪录。

Kong et al. 2022, ApJL

三、研究成果-冕冷却

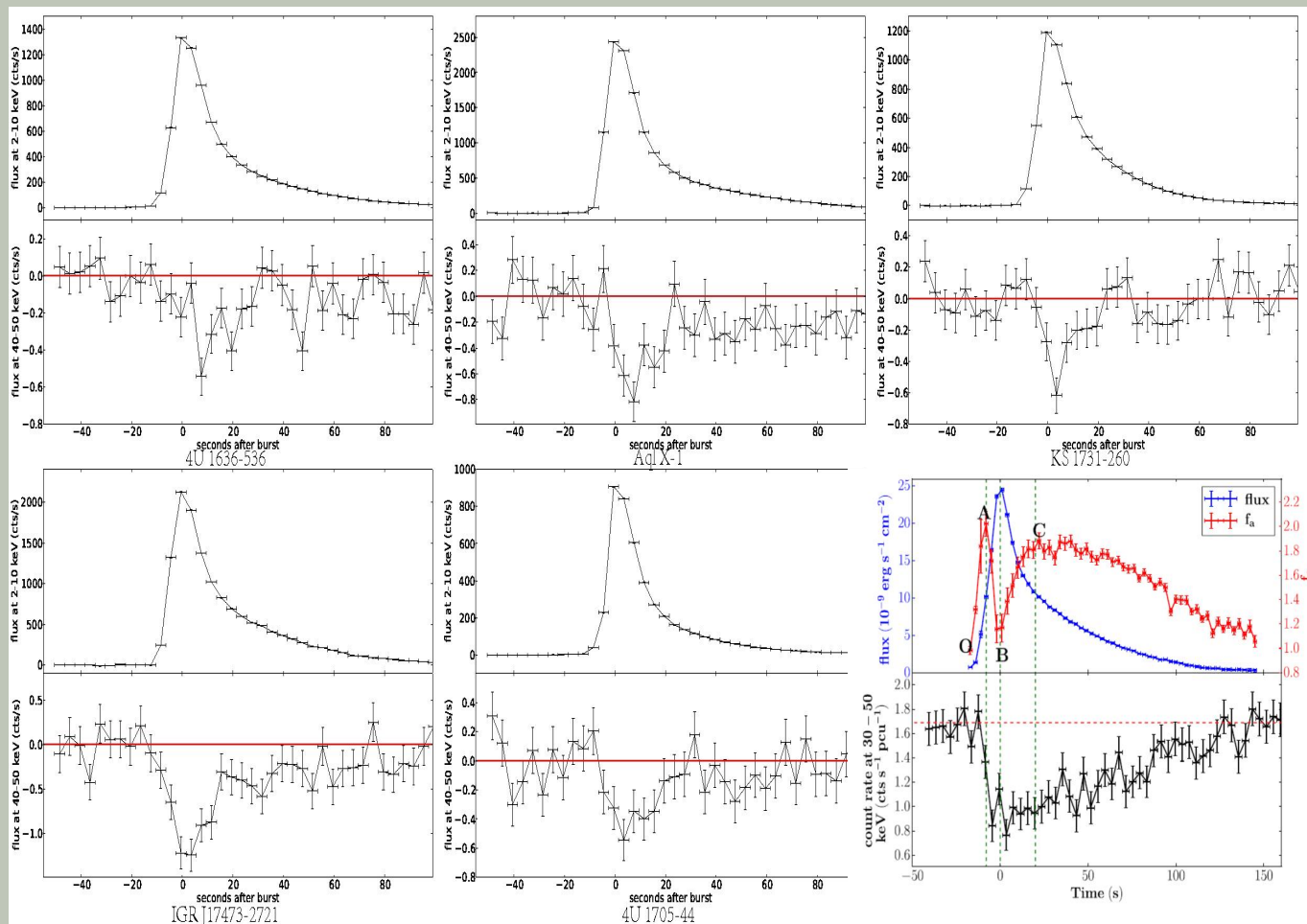


中子星表面附近笼罩着温度高达几亿度的高温电子冕。高能光子被认为是热光子与冕中热电子发生逆-Compton作用的结果。

热核暴是中子星从伴星中吸积的物质堆积在中子星表面，（密度、压力、温度）到达临界值后突然发生的核聚变。

猜想：热光子增多会造成冕中电子的冷却，造成热光子和硬光子之间流量的反相关。

三、研究成果-冕冷却

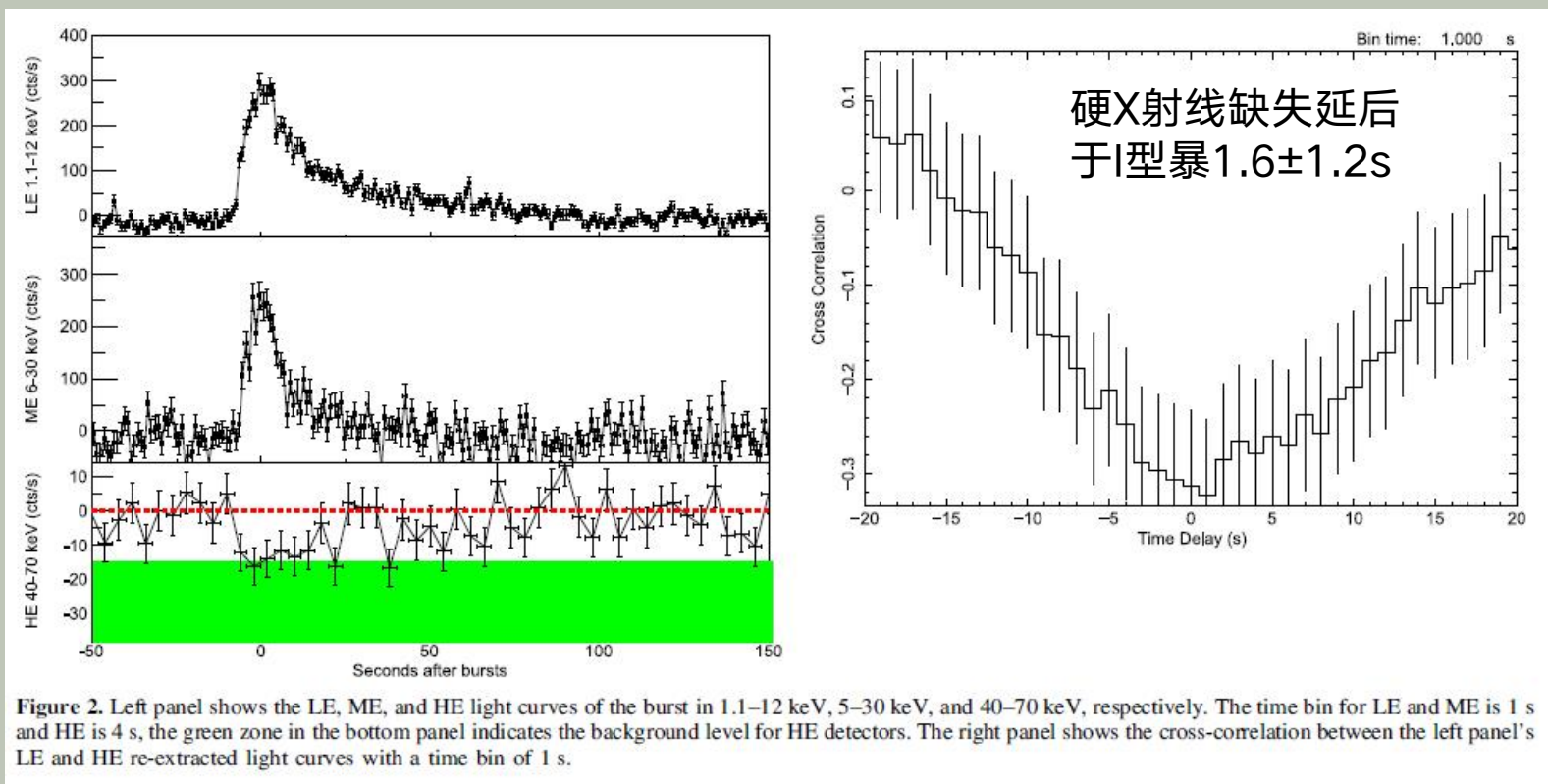


在慧眼-HXMT之前，通过合并美国RXTE卫星对热核暴观测数据，我们在多个中子星系统中发现了暴期间硬X射线的缺失，被认为是冕被热核暴冷却的证据。

由于是合并了多个暴的结果，且软、硬X射线光子是由同一个探测器探测，这个结果在当时被质疑容易受到RXTE/PCA死时间的影响。

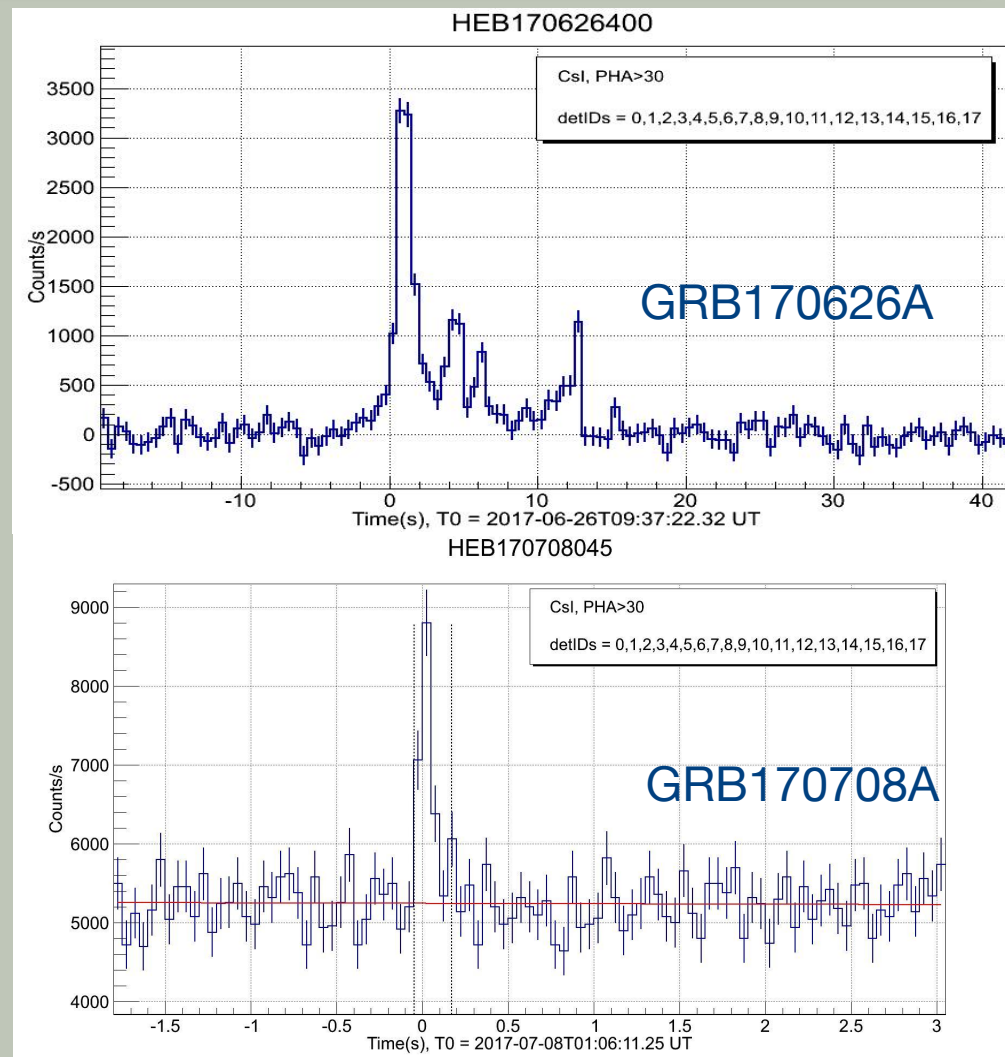
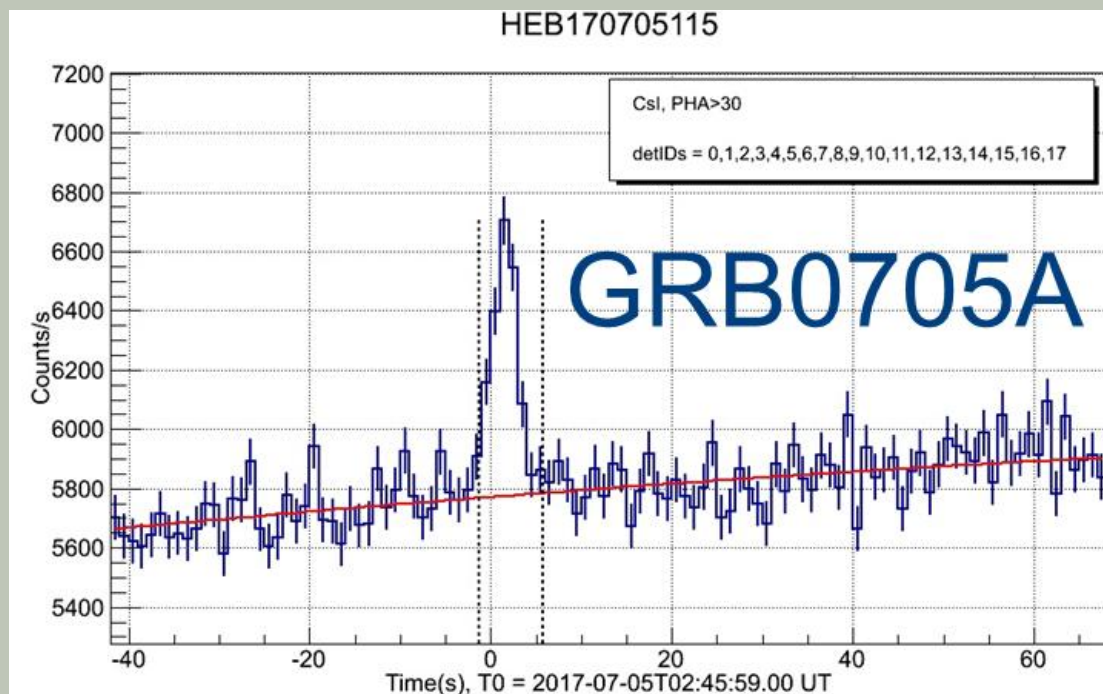
三、研究成果-冕冷却

慧眼对4U 1636-536的一个热核暴观测中，发现了暴发期间硬X射线的缺失，由此确认了冕的冷却，排除了探测器死时间的影响，并给出了高温电子冕被冷却和重新加热的时标在1.5秒左右。

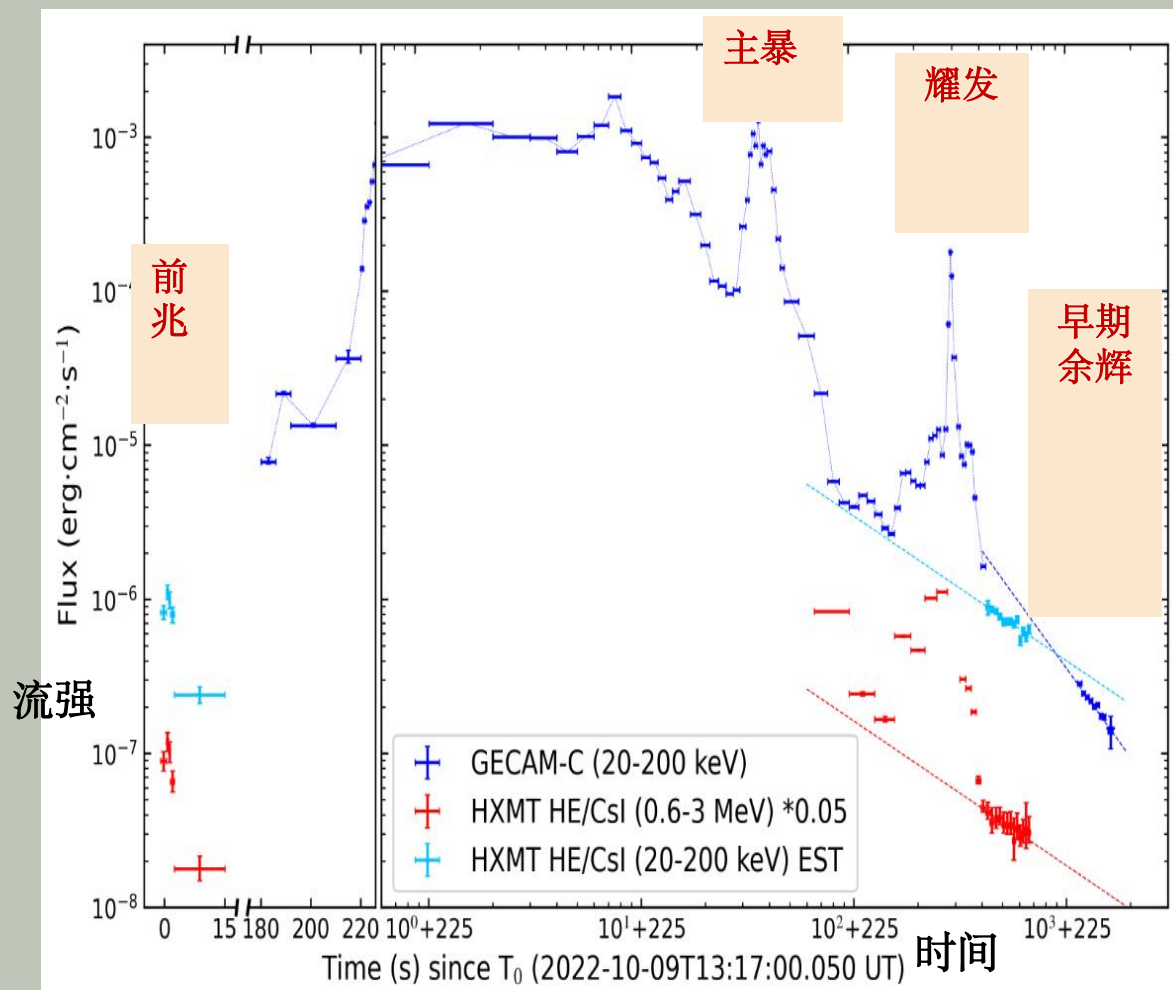


三、研究成果-伽马射线暴探测

到2024年3月底，慧眼共探测到346个伽马暴，其中34个为慧眼卫星单独的探测结果。



三、研究成果--探测到迄今最亮GRB



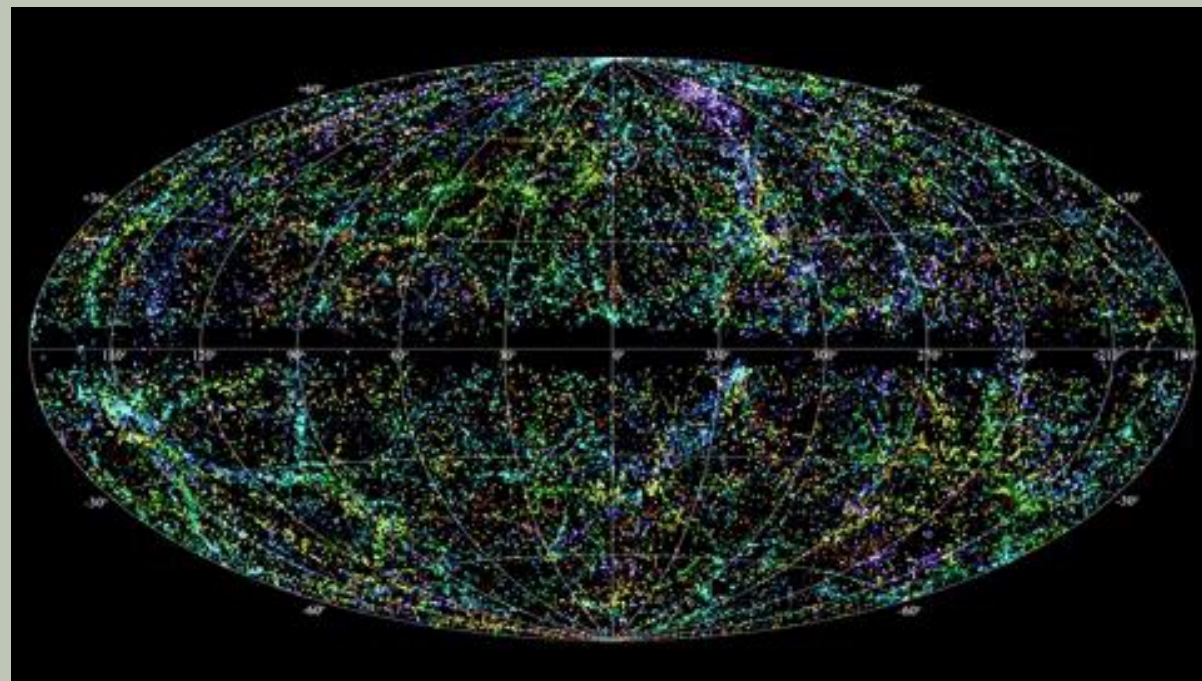
在硬X射线和软伽马能段精确刻画从前兆辐射到主暴、耀发以及早期余辉的辐射性质：

- ① 最大亮度，将亮度记录提升50倍；
- ② 最大的各向同性等效能量，高达 $1.5 \times 10^{55} \text{ erg}$ ；
- ③ 极为狭窄而明亮的喷流

2023年3月28日新闻联播报道

张冰教授(内华达大学拉斯维加斯分校)：“本次慧眼和极目的观测研究对于深入理解伽马暴这种极端宇宙爆发现象提供了崭新的视角”

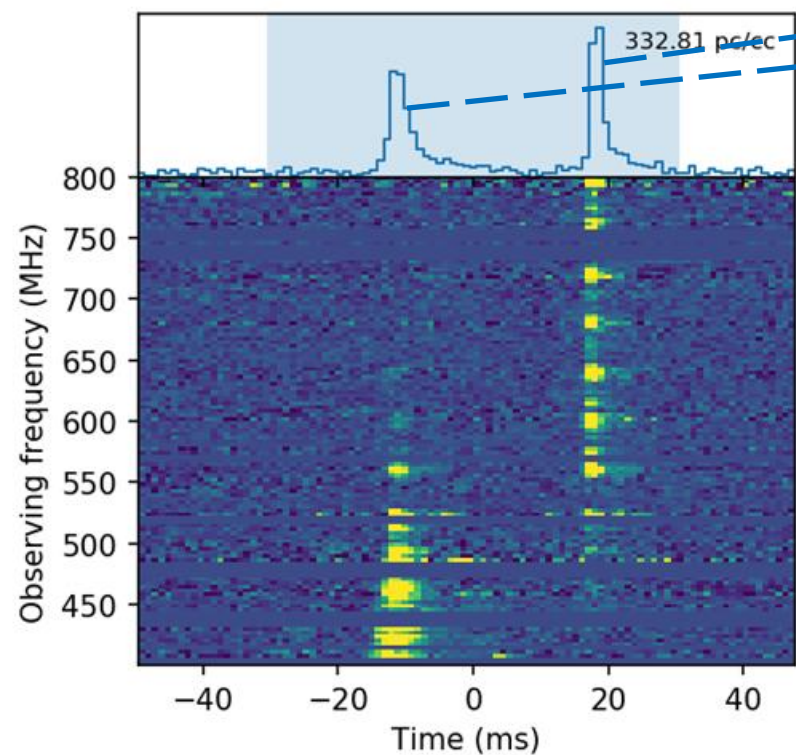
三、研究成果-发现快速射电暴来自磁星



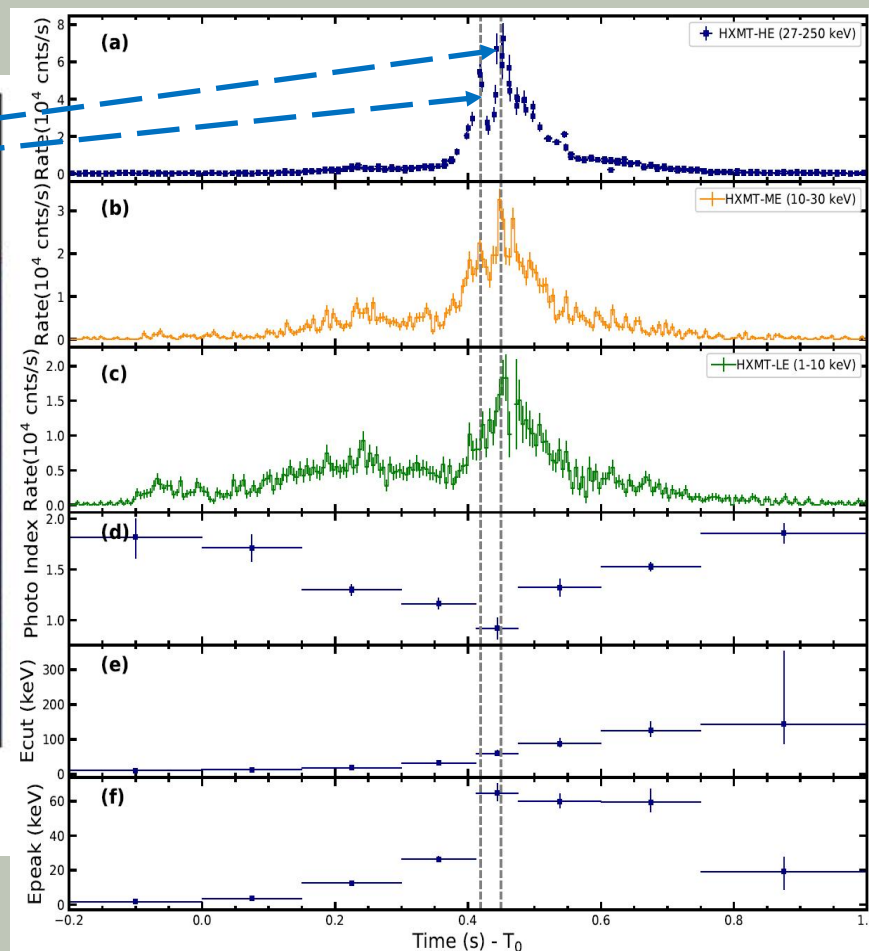
快速射电暴，表现为毫秒射电脉冲，到达地球的时间和方向比较随机，某些方向有重复暴发信号，未发现对应天体。

有很多的猜想：磁星暴发？中子星碰撞？外星人通讯？

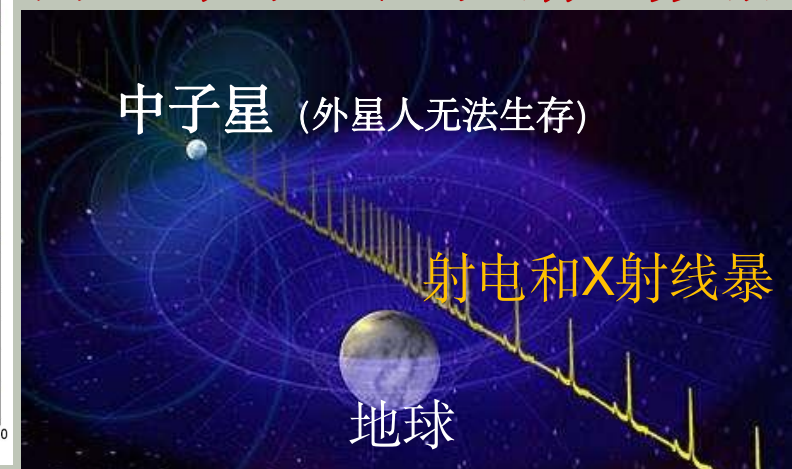
三、研究成果-发现快速射电暴来自磁星



2020年4月28号快速射电暴

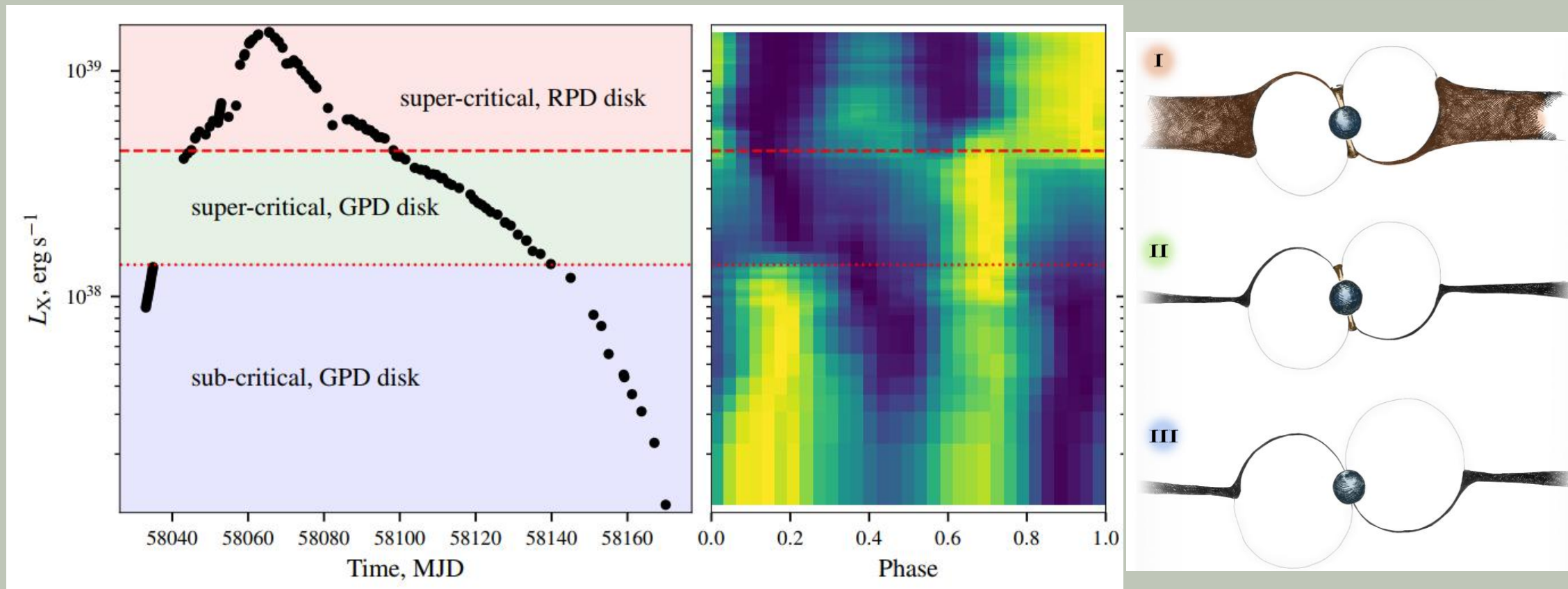


FRB 200428 & SGR
J1935+2154
同一时刻慧眼的X射线数据



李承奎、林琳、熊少林等, 2021, 自然·天文 (arXiv:2005.11071,)

三、研究结果—辐射状态改变



慧眼-HXMT对Swift J0243.6+6124爆发演化进行了高频次的大量观测，发现随着光度的演化脉冲轮廓在特定流强处存在两次突变。这种突变对应着围绕中子星旋转的物质盘从气体热压力主导转变为辐射压主导的过程。**这是首次在中子星X射线双星系统中直接观测到这种轮廓的突变。**

三、研究成果—脉冲星导航

脉冲星好比GPS卫星，可以发出稳定的周期性脉冲信号，航天器通过观测脉冲星可以实现自主导航。慧眼卫星通过观测脉冲星，可以将轨道精度确定到10公里以内。

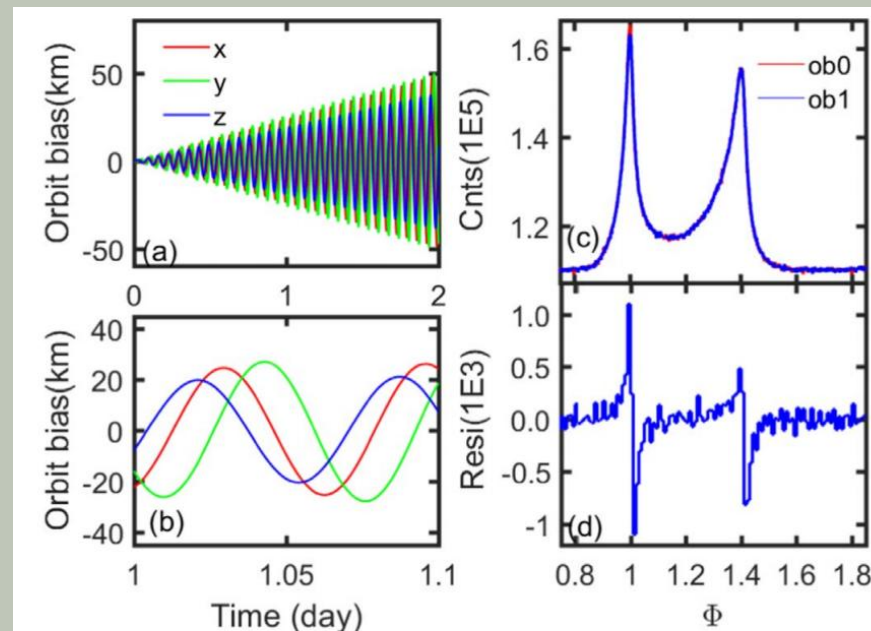
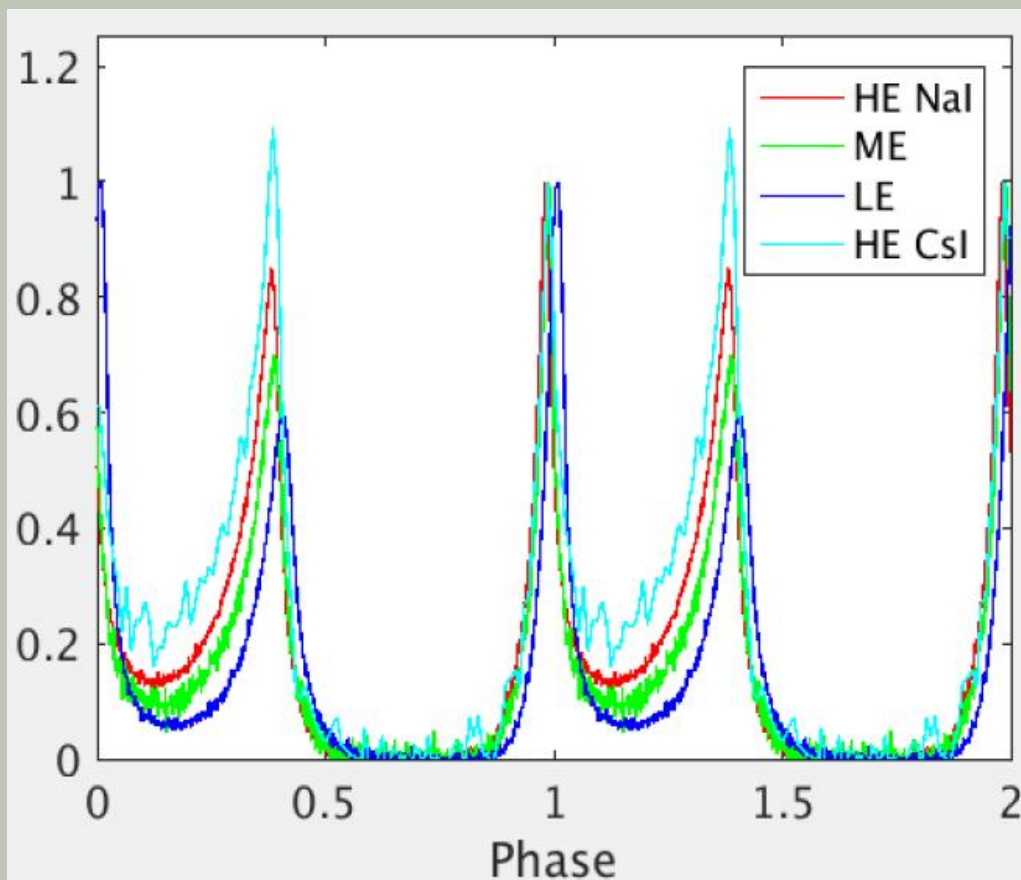
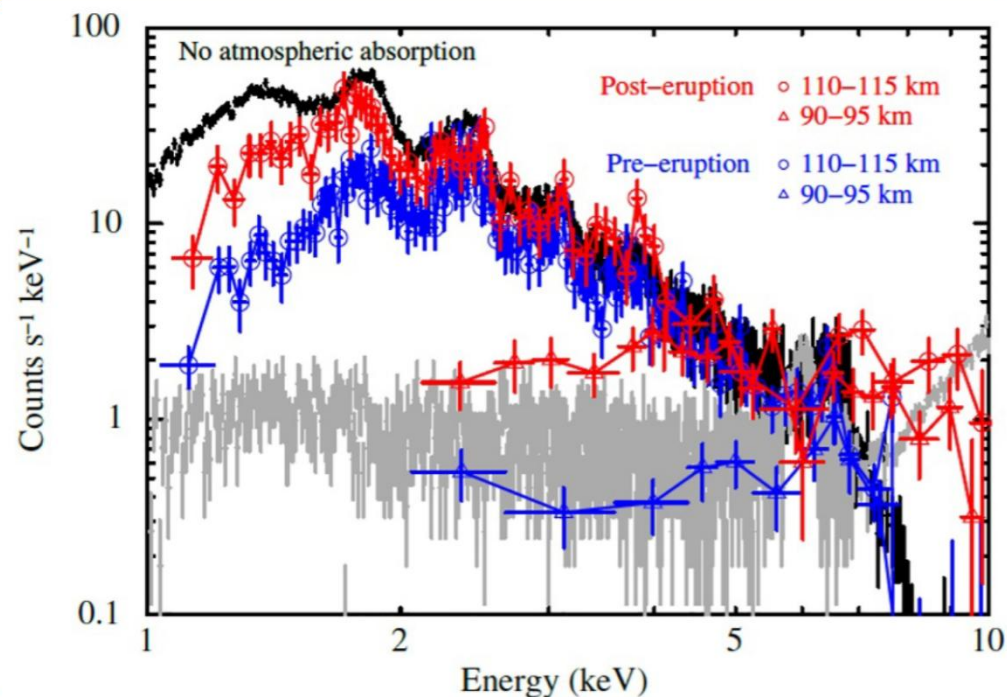


Figure 1. Orbit deviation due to the change of initial orbit element “semimajor axis” by 200 m and its effects on the profile. (a) Orbit deviations for two days. (b) Zoomed-in of the orbit deviations. (c) Distortion of the pulse profile induced by the change of the initial element. The red line represents the “standard” profile generated with “ob0,” and the blue line represents the distorted profile generated with “ob1.” (d) Differences between the “standard” profile and the distorted profile.

三、研究成果—地球高层大气密度



利用慧眼卫星对仙后座 A 的观测数据，首次通过地球大气掩食测量了火山爆发前后 90-150 公里高度范围内的大气密度；该研究为理解火山爆发对地球大气的影响提供了重要的观测证据和理论支持。

Geophysical Research Letters^{*}

RESEARCH LETTER

10.1029/2024GL112025

Key Points:

- Neutral density profiles in the MLT were measured before and after Tonga's huge volcanic eruption on 15 January 2022
- Shortly after the eruption, a strong and long-lasting neutral density depletion was found near the epicenter
- Density profiles after the eruption showed wavy structures with a typical wavelength of either ~20 km (vertical) or ~1,000 km (horizontal)

Correspondence to:

S. Katsuda,
katsuda@mail.saitama-u.ac.jp

Citation:

Katsuda, S., Shinagawa, H., Fujiwara, H., Jin, H., Miyoshi, Y., Miyoshi, Y., et al. (2024). X-raying neutral density disturbances in the mesosphere and lower thermosphere induced by the 2022 Hunga-Tonga volcano eruption-explosion. *Geophysical Research Letters*, 51, e2024GL112025. <https://doi.org/10.1029/2024GL112025>

AGU ADVANCING EARTH AND SPACE SCIENCES



X-Raying Neutral Density Disturbances in the Mesosphere and Lower Thermosphere Induced by the 2022 Hunga-Tonga Volcano Eruption-Explosion

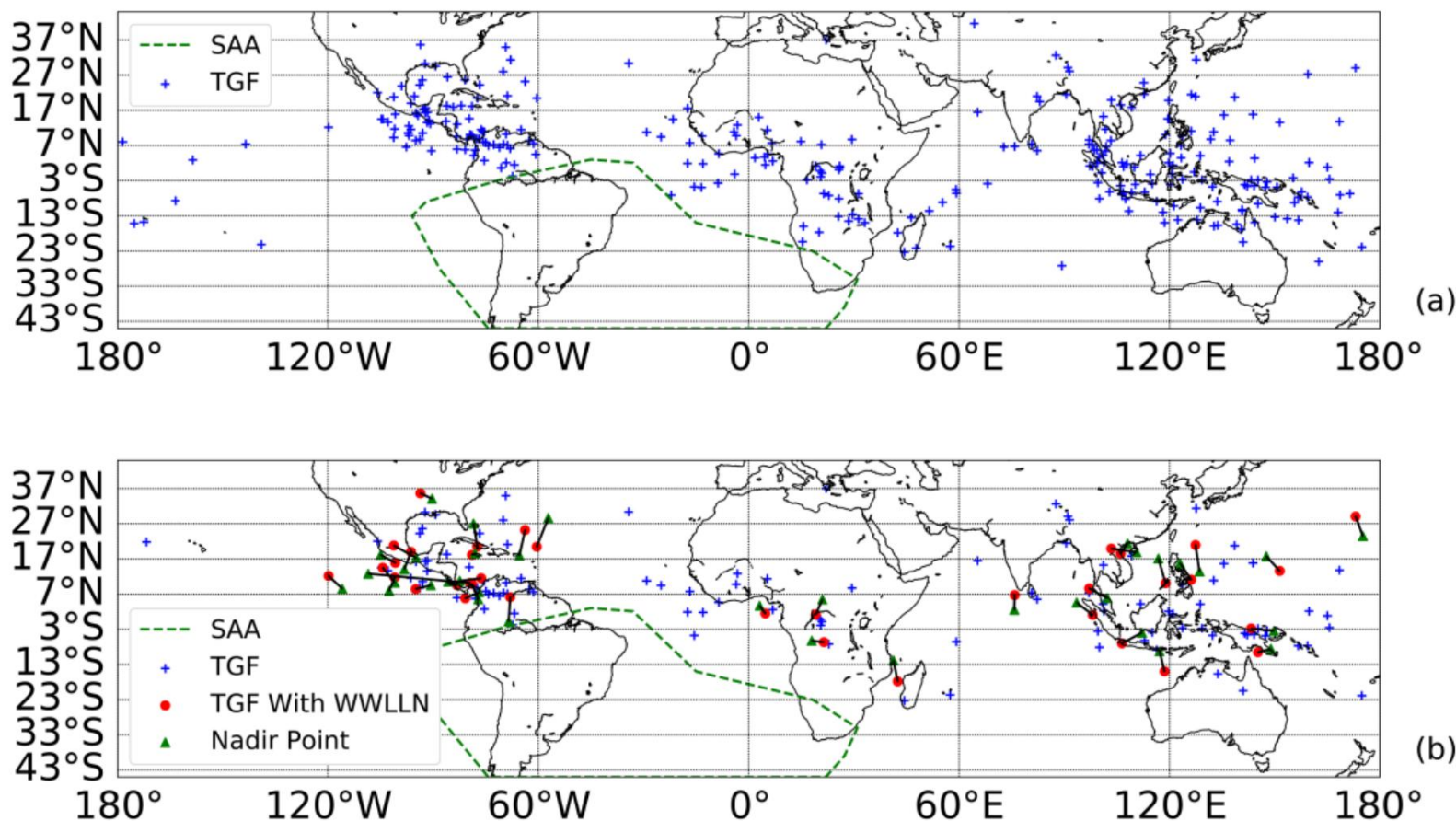
Satoru Katsuda¹, Hiroyuki Shinagawa², Hitoshi Fujiwara³, Hidekatsu Jin⁴, Yasunobu Miyoshi⁵, Yoshizumi Miyoshi⁶, Yuko Motizuki^{1,7}, Motoki Nakajima⁸, Kazuhiro Nakazawa⁹, Kumiko K. Nobukawa¹⁰, Yuichi Otsuka⁶, Atsushi Shinbori⁶, Takuya Sori⁶, Chihiro Tao⁴, Makoto S. Tashiro^{1,11}, Yuuki Wada¹², and Takaya Yamawaki¹

¹Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Sakura, Japan, ²International Research Center for Space and Planetary Environmental Science, Kyushu University, Fukuoka, Japan, ³Faculty of Science and Technology, Seikei University, Tokyo, Japan, ⁴National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan, ⁵Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, Fukuoka, Japan, ⁶Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan, ⁷RIKEN Nishina Center, Wako, Japan, ⁸School of Dentistry at Matsudo, Nihon University, Matsudo, Japan, ⁹Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe, Nagoya University, Nagoya, Japan, ¹⁰Faculty of Science and Engineering, Kindai University, Higashi-Osaka, Japan, ¹¹Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagami-hara, Japan, ¹²Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita, Japan

Abstract We present X-ray observations of the upper atmospheric density disturbance caused by the explosive eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH) volcano on 15 January 2022. From 14 January to 16 January, the Chinese X-ray astronomy satellite, *Insight-HXMT*, was observing the supernova remnant Cassiopeia A. The X-ray data obtained during Earth's atmospheric occultations allowed us to measure neutral densities in the altitude range of ~90–150 km. The density profiles above 110 km altitude obtained before the major eruption are in reasonable agreement with expectations by both GAIA and NRLMSIS 2.0 models. In

Satoru K. et al. 2024, GRL
Xue W. et al. 2023, ApJS

三、研究成果—地球伽马闪(TGF)



前4年的数据识别出了282个明亮的TGF。在中纬度地区(30°至43°)检测到的TGF较为罕见，而且与低纬度地区(30°以内)的TGF在特性上并无显著差异。

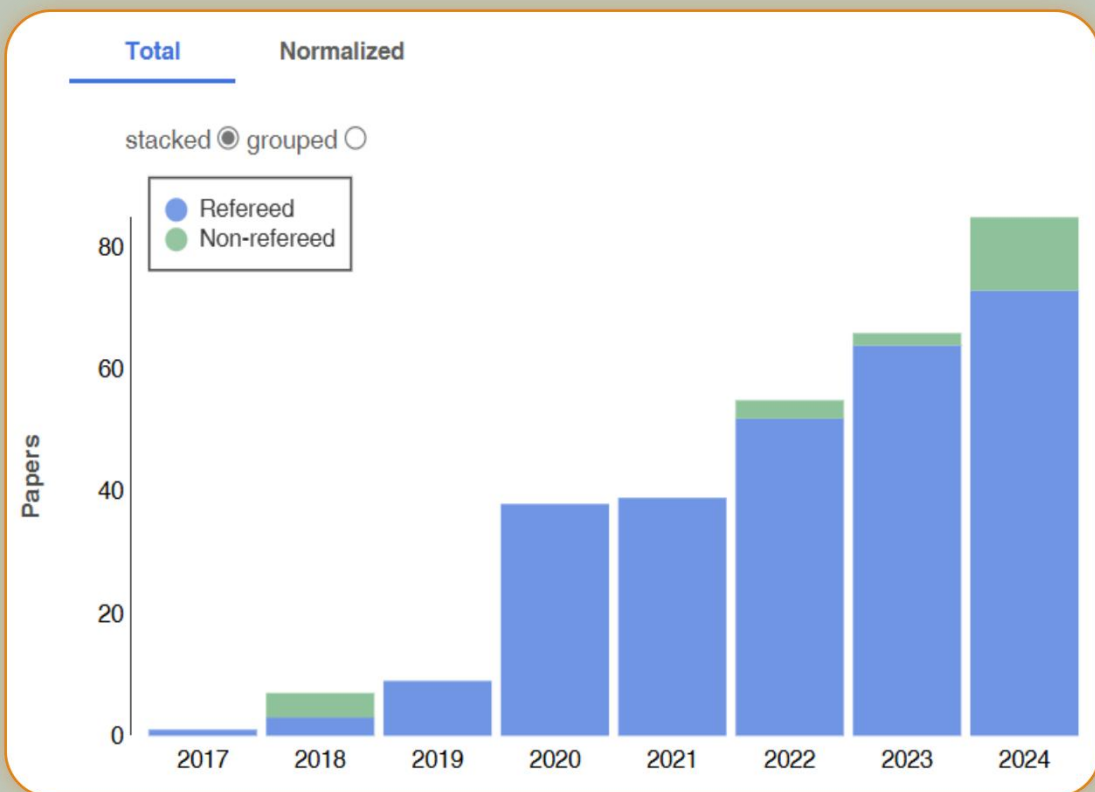
HE测得的TGF硬度比率似乎与GF的持续时长无关，这与先前的研究有所不同。

尽管HE是为天文观测而专门设计的，但它实际上是一个多用途仪器，适用于研究来自地球的能辐射现象。

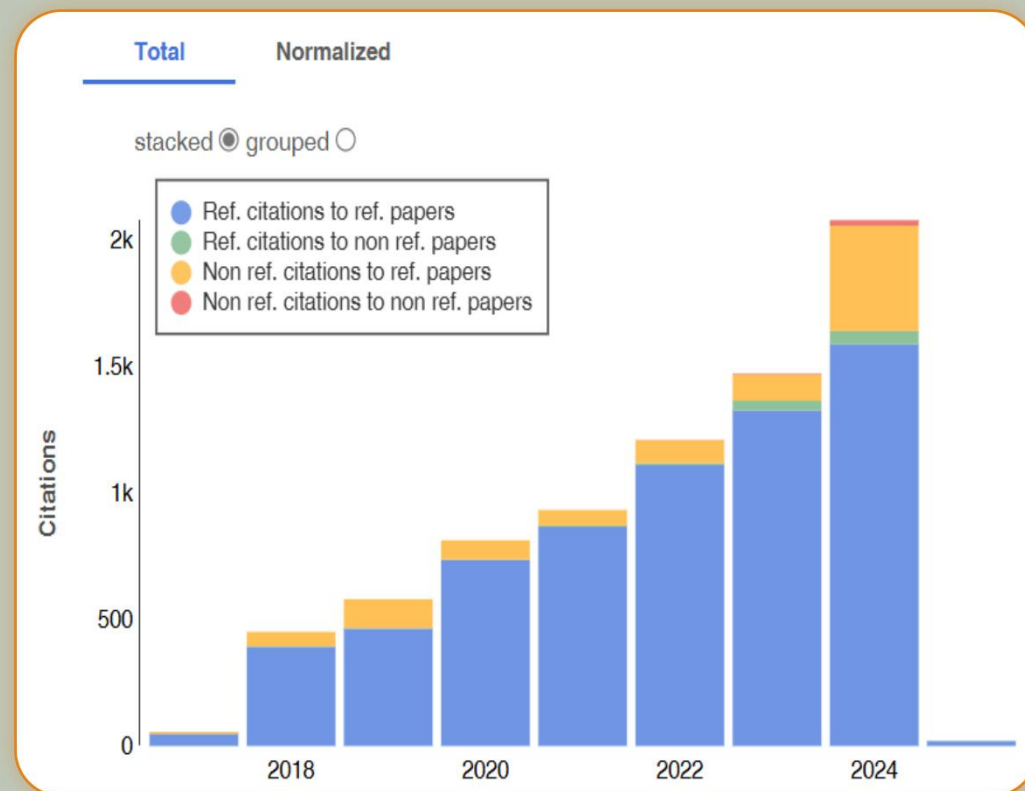
三、研究成果—学术影响力

使用慧眼卫星的数据或结果发表的论文和引用都在不断增加
(数据来自美国NASA ADS网站: 320+7600 截止2024.12)

论文



引用



四、结语-和天体物理相关的NOBEL奖

- ❑ 1967年----对核反应理论的贡献，建立了恒星能量来源的理论
- ❑ 1974年----射电综合孔径技术、脉冲星的发现
- ❑ 1978年----宇宙微波背景辐射的发现
- ❑ 1983年----恒星结构和演化（包括白矮星结构）、元素合成理论
- ❑ 1993年----脉冲双星的发现（间接验证了广义相对论）
- ❑ 2002年----宇宙中微子、宇宙X射线掠射观测
- ❑ 2006年----宇宙微波背景辐射黑体谱以及各项异性
- ❑ 2011年----通过观测超新星距离发现宇宙加速膨胀
- ❑ 2017年----直接探测到引力波
- ❑ 2019年----现代宇宙学和系外行星搜寻方法
- ❑ 2020年----黑洞存在的证明与发现

四、结语-未来可期

随着更多空间天文卫星的升空，高能天体物理研究将进入黄金时代。慧眼卫星、DEMPLE和EP、GECAM、SVOM都取得了很多的研究成果，但还有很多的问题需要深入的思考：

- 1) 大量的数据需要深入的数据分析，新的数据分析手段如何发挥作用？
- 2) 如何发挥联合探测的优势、发挥多信使的研究优势，推动天体物理和时域天文的发展？
- 3) 宇宙是极端条件实验室，在物理学酝酿突破的现阶段，天体物理能够做出哪些贡献？

未来可期，天体物理的未来是光明的，宇宙有足够的空间容纳你的想象力。

谢谢大家!