

慧眼-HXMT前六年在轨本底回顾*

廖进元[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 回顾了慧眼-硬X射线调制望远镜(Insight-Hard X-ray Modulation Telescope, 简称慧眼-HXMT)在轨运行前6 yr的本底情况, 包含各载荷在轨本底的地理分布、能谱和时变特征以及长期演化. 除此之外, 还对慧眼-HXMT各载荷在轨本底的估计方法进行了回顾, 综合介绍了各载荷的本底模型以及本底估计的精度. 从总体上看, 慧眼-HXMT的在轨本底符合预期, 各载荷本底模型能够对在轨本底的能谱和光变进行可靠的估计.

关键词 航天器: 仪器, 方法: 数据分析, X射线: 本底
中图分类号: P111; **文献标识码**: A

1 引言

慧眼-HXMT (Insight-Hard X-ray Modulation Telescope)是中国第1颗通用型空间X射线望远镜, 从2017年6月15日发射至今, 在X射线天文领域取得了丰硕的成果^[1]. 其上搭载了3个主要载荷, 分别是低能望远镜(Low Energy telescope, LE)^[2]、中能望远镜(Medium Energy telescope, ME)^[3]以及高能望远镜(High Energy telescope, HE)^[4]. 3个主载荷的协同使用, 使得慧眼-HXMT具有宽能段、大有效面积和高时间分辨的特点. 慧眼-HXMT的主要性能参数列于表1.

慧眼-HXMT的大部分科学成果源自对河内X射线源的定点观测任务^[5-6]. 在这些观测中, 慧眼-HXMT获得的数据里同时包含X射线源的物理信号和不同比例的本底信号. 为了获得可靠的物理分析结果, 本底的准确估计就显得尤为重要. 除河内已知X射线源的定点观测之外, 慧眼-HXMT还具有两大主要任务, 分别是银道面扫描巡天和 γ 射

线暴全天监测. 这两个任务具有不同观测策略, 因此也就有不同的本底特征以及本底估计方法. 对于 γ 射线暴全天监测, 采用暴前和暴后观测平均的方式进行本底估计^[7]; 对于银道面扫描巡天, 本底信号则采用将源的调制信号扣除后进行平滑的方法进行估计^[8]. 相较于银道面扫描巡天和 γ 射线暴全天监测, 慧眼-HXMT定点观测的本底估计要复杂很多. 由于慧眼-HXMT是准直型望远镜, 不仅没有聚焦成像型望远镜那样直接从图像中得到准确本底的能力, 例如, 牛顿多镜面X射线空间望远镜(X-ray Multi-Mirror Mission, XMM-Newton)^[9-10]和钱德拉X射线天文台(Chandra X-ray Observatory)^[11], 也没有像其他一些准直型望远镜那样采用传统的on-off观测模式, 例如, *BeppoSAX*/PDS (Satellite per Astronomia X/Phoswich Detection System)^[12-13]和*RXTE*/HEXTE (Rossi X-ray Timing Explorer/High Energy X-ray Timing Experiment)^[14-16], 因此慧眼-HXMT需要针对其自身特点去构建定点观测中的本底估计方法. 为了更加准

2024-10-11收到原稿, 2025-01-02收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12333007)、国家重点研发计划(2021YFA0718500)、中国科学院国际合作项目(113111KYSB20190020)资助

[†]liaojinyuan@ihep.ac.cn

确地对本底进行估计, 慧眼-HXMT基于其自身的特点构建了本底模型^[17-19].

表 1 低能望远镜、中能望远镜以及高能望远镜的主要载荷参数
Table 1 Main instrumental parameters of LE, ME and HE

	LE	ME	HE
Detector type	Swept Charge Device	Si-PIN	Phoswich
Energy range /keV	0.7–13	5–40	20–250
Geometrical area/cm ²	384	952	5096
Small FoV (FWHM)	1.6° × 6°	1° × 4°	1.1° × 5.7°
Large FoV (FWHM)	4° × 6°	4° × 4°	5.7° × 5.7°

慧眼-HXMT运行在一个轨道高度550 km, 倾角43°的近地圆轨道上. 先前的工作表明^[17-22], 慧眼-HXMT运行轨道上的空间环境复杂, 各种粒子与卫星平台以及载荷仪器相互作用产生多种本底成分^[23-24]. 其中, 宇宙线质子对慧眼-HXMT的本底贡献最大, 而电子、中子、宇宙X射线本底(Cosmic X-ray Background, CXB)以及地球反照 γ 射线也

对本底有所贡献. 慧眼-HXMT在其顶部安装有粒子监测器(Particle Monitor, PM), 可用来探测环境中的质子(能量 $E > 20$ MeV)和电子($E > 1.5$ MeV)^[25]. 在轨运行前6 yr, PM计数率的地理分布变化很小, 不论是低纬度地区、高纬度地区, 还是南大西洋异常区(South Atlantic Anomaly, SAA). 但2022年以来, 由于太阳活动的增强导致大气密度增加, PM计数率整体有所下降. 我们在慧眼-HXMT本底中观察到一些长期的变化, 然而这不仅是太阳活动周期的原因, 在很大程度上与LE和ME探测器的辐照损伤以及HE遭受荷电粒子轰击的活化效应有关. 因此, 当我们回顾慧眼-HXMT的本底时, 既要关注其观测特征的演化, 还要考察本底模型的有效性.

本文综合回顾了慧眼-HXMT在轨运行前6 yr的本底情况. 将利用高银纬的空天区观测考察前6 yr内慧眼-HXMT 3个主要有效载荷的在轨本底, 包括各载荷的在轨本底观测特征和本底模型的系统误差分析. 表2展示了这些空天区观测的具体信息. 值得注意的是, 慧眼-HXMT的3个望远镜都有不同大小和方向的视场(FoVs). 图1和表1展示了这些视场的方位和参数信息. 对于LE和ME的定点观测, 推荐使用小视场探测器进行科学分析. 因此, 本文将LE和ME的观测特征和本底模型主要集中在这些探测器上. 本文的组织结构如下: 在第2-4节分别介绍LE、ME和HE的本底, 总结和结论则在第5节进行.

表 2 慧眼-HXMT前6 yr的本底观测信息
Table 2 Observation of *Insight*-HXMT background in six years

ObsID	Duration	Target ^a
P0101293 (001–191)	2017-11-02 to 2019-06-26	Blank Sky
P0202041 (001–161)	2019-07-10 to 2020-07-22	Blank Sky
P0301293 (001–115)	2020-08-06 to 2021-08-30	Blank Sky
P0401293 (001–115)	2021-09-14 to 2022-08-29	Blank Sky
P0501293 (001–103)	2022-09-28 to 2023-08-14	Blank Sky
P0101297 (201–217)	2017-09-13 to 2018-09-14	PSR B0540-69
P0101322 (001–001)	2017-07-19 to 2017-07-23	PSR B0540-69
P0114550 (001–003)	2017-09-20 to 2017-09-27	GW 170817

表2 续
Table 2 Continued

ObsID	Duration	Target ^a
P0101326 (001-018)	2017-07-08 to 2019-02-19	Cas A
P0202041 (200-208)	2019-07-13 to 2020-07-29	Cas A
P0302291 (001-020)	2020-08-23 to 2021-08-21	Cas A
P0402348 (001-015)	2021-09-17 to 2022-08-19	Cas A
P0502131 (001-022)	2022-09-22 to 2023-08-17	Cas A

^a The observations of the blank sky are used as background observations for LE, ME, and HE. The observations of PSR B0540-69, GW 170817, and Cas A are only used for background analysis in HE (as the sources are very weak for HE and can be considered as ‘blank sky’).

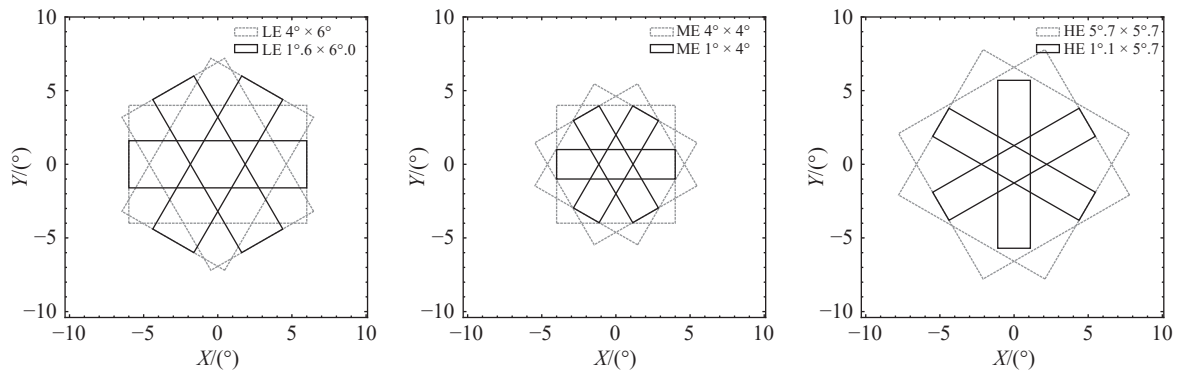


图 1 低能望远镜、中能望远镜以及高能望远镜的视场

Fig. 1 FoVs of LE, ME and HE

2 低能X射线望远镜

LE由一系列SCD (Swept Charge Device)探测器组成, 几何面积为 384 cm^2 , 探测能段为 $0.7\text{--}13 \text{ keV}$. LE有3个望远镜机箱, 相互之间的视场方向差是 60° . 每个机箱包含20个小视场探测器(其中一些是相继损坏的)、6个大视场探测器以及2个全遮挡探测器(准直器被铝盖封住). 被封住的小视场探测器设计用于测量粒子本底, 而被封住的大视场探测器植入了 ^{55}Fe 放射性同位素以监测能量响应. 在慧眼-HXMT前6 yr的运行中, 一些LE探测器已经损坏并被关闭. LE坏探测器的详细信息可以从慧眼-HXMT数据分析软件中包含的“坏探测器FITS文件”中获得. 图2展示了一个空天区的LE光

变曲线, 显示出LE本底的典型轮廓以及一系列典型特征. 整个时间范围可以分为仪器的异常和正常阶段. 在异常阶段, 由于相对较大的视场, LE通常受到大量低能荷电粒子和可见光的干扰, 这些粒子从准直器进入并难以准确估计. 在严重情况下, LE探测器将因在轨存储溢出而饱和. 仪器的正常阶段可以分为3种类型. 首先是地球遮挡的时间间隔, 在这段时间内, 具有不同视场探测器的光变曲线重合, 并且没有记录到任何CXB光子. 其次是“计数暴发”时间段, 小视场和大视场探测器都可以检测到“计数暴发”. 此外, “计数暴发”通量基本上与视场大小成正比. 最后, 既没有地球遮挡又没有“计数暴发”的时间段被视为好时间(Good Time Interval, GTI), 而通常的科学分析只使用GTI数

据. 为了准确估计本底, 本底分析软件不仅要进行常规GTI判断, 还要进行小视场和大视场探测器计

数率的比较^[17]. 下面将展示LE本底的观测特征以及前6 yr内本底模型的有效性.

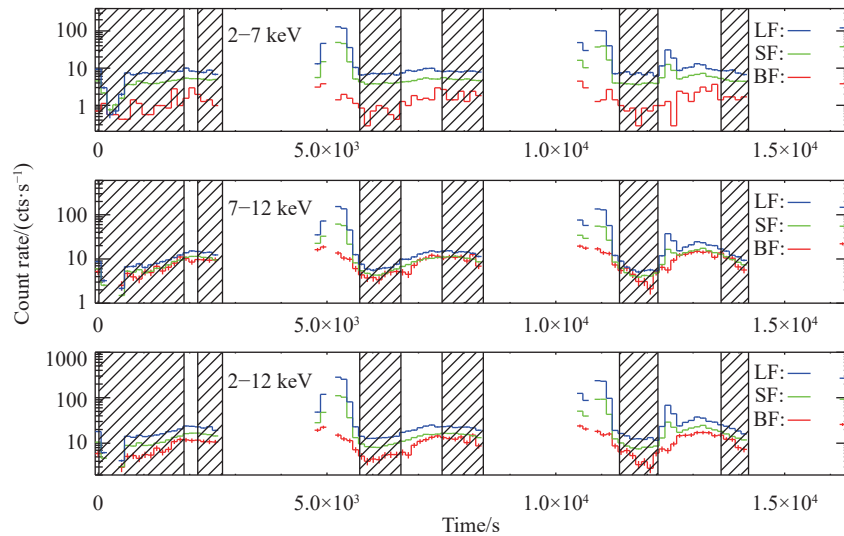


图 2 LE大视场(blue)、小视场(green)以及全遮挡探测器(red)在不同能段的光变曲线(观测号: P050129303501). 好时间被标记为阴影区域.

Fig. 2 Light curve of the LE large (blue), small (green) and blocked (red) FoV detectors in different energy bands (ObsID: P050129303501). The good time interval is marked with shadows.

2.1 LE本底观测特征和其长期演化

图3显示了2020年6月30日之前和之后LE本底地理分布的对比. 可以看到, LE本底随着地理经度(lon)和地理纬度(lat)的分布没有改变, 但强度显著增加. 图4(左)展示了小视场探测器在同一地理区域($55^\circ < \text{lon} < 210^\circ$, $-15^\circ < \text{lat} < 15^\circ$)每年的本底能谱. 可以看到, 能谱在低能端变化不明显, 而在高能端则表现出较明显的演化. 其中前4 yr, 高能端的本底水平由于设备辐照损伤而逐渐增加(细节见下文); 从第5年开始, 高能端的本底水平则由于卫星轨道上荷电粒子水平的下降而下降. 本底能谱上的各种谱线, 由于等值宽度较低并且随LE能量分辨率的下降而持续变宽, 从而越来越不显著直到难以目测, 有关本底谱线(如: 能量, 展宽)以及探测器的详情可参考慧眼-HXMT在轨运行和标定方面的工作^[26]. 正如地面模拟^[22]和先前在轨观测所证明的, LE本底可以简化为低能段主导的弥散X射线本底和高能段主导的粒子本底. 因此, 图3所示的两个地理分布之间的差异主要是由

于高能段的变化. 图4(右)显示了全遮挡探测器前6 yr的本底能谱, 结果与小视场探测器的结果一致. 正如Zhang等人所述^[22], 慧眼-HXMT的本底可以由各种入射产生. 入射后立即记录的本底称为瞬时本底, 而入射后长时间记录的本底(小时至月)称为延时本底. 值得注意的是, 由CXB和宇宙射线质子引起的本底都是瞬时本底. LE本底光变曲线在前6 yr内变化很小. 最明显的特征是低能段的计数率稳定, 而在高能段受地磁场的显著调制, 这也在图2中显示出来.

LE全遮挡探测器的本底能谱形状不随地理位置而改变, 并可以用来表征小视场探测器的粒子本底能谱形状^[17]. LE本底模型正是利用了这一特性来提供简单可靠的本底估计. 尽管LE本底在前6 yr内有所演化, 但变化并不十分显著(图3). 从图4可以看出, 小视场和全遮挡探测器具有类似的演化趋势, 即随着在轨时间的增加, 能谱能量范围的下限变得更高, 计数率也随之增加. 对于LE探测器, 大信号可以同时记录在多个像素中的几个分

裂事件中. 然而, 只有高于一定阈值的事件才会被记录并参与后续的分裂事件重建. 例如, 能量为 E 的大信号可以记录为两个能量为 E_0 和 E_1 的信号 ($E_0 + E_1 = E$). 如果 E_1 小于阈值, 这个大信号将被视为能量为 E_0 的单事件. 随着LE探测器辐照损伤的增加, 噪声信号的分布变得更广. 为了消除噪声信号对工作能量带来的影响, 阈值也被调整得更高. 这将提高LE探测器的低能限, 如图4中能谱的低能段所示. 此外, 在阈值调整前可以记录并参与分裂事件重建的小信号, 在此之后将不会超过阈值, 即在阈值调整后, 之前可以重建的双事件将不再被重建. 随着阈值的提高, 更大比例的双事件将不会被重建, 而会被视为能量更低的单事件. 如图4所示, 本底能谱在前4 yr的演化趋势是高能端每年向左移动. 因此, 前4 yr LE高能端本底的增长趋势本质上是LE探测器辐照损伤的结果. 此外, 全遮挡探测器在能谱可能会与超阈信号峰混合, 因此本底模型中全遮挡探测器的有效使用能段也需要做相应调整.

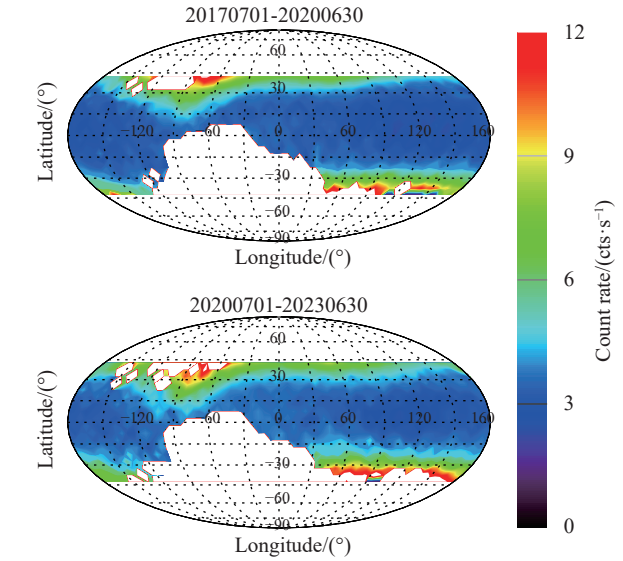
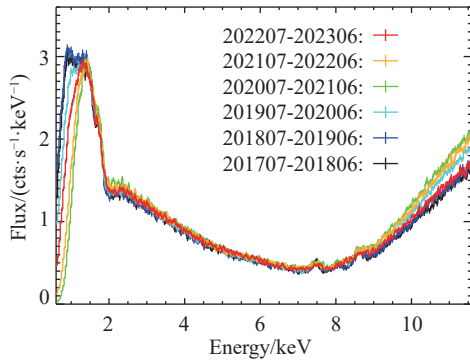


图 3 2020年6月30日之前(上图)和之后(下图)的LE小视场探测器本底的地理分布

Fig. 3 Geographical distributions of the background of LE small FoV detectors before (top) and after (bottom) on 30 June 2020

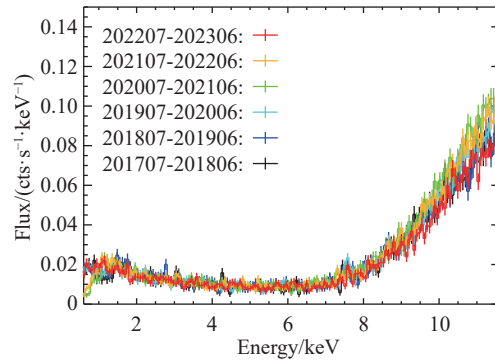


图 4 慧眼-HXMT在轨运行以来LE每年的本底能谱(左: 小视场; 右: 全遮挡)

Fig. 4 Spectra of the LE small (left) and blocked (right) FoV detectors for every year since *Insight*-HXMT operation in orbit

2.2 LE本底模型

本底模型的有效性需要被考查, 因为这对于科学分析至关重要. 按照早先发展的方法^[7], 我们对每次空天区观测进行本底估计. 图5显示了一个本底能谱估计的例子. 对于每一年, 本底模型的参数都会更新以保持本底估计的准确性, 然后对本底模型的系统误差进行了考察. 图6显示了自慧眼-HXMT发射以来每年2–10 keV之间不同能量段的

系统误差, 结果显示与发射初期两年相比, 系统误差并未发生显著变化, 即本底模型是稳定的, 能够给出准确的本底估计. 然而, 由于1.5 keV左右的数据经常受到电子噪声的影响, 检测阈值被调高, 因此本文仅给出了2 keV以上的系统误差.

3 中能X射线望远镜

如表1所示, ME是一台探测能段5–40 keV的

准直望远镜, 总几何面积为 952 cm^2 . 其由3个机箱共54个探测器组成, 每个探测器具有32个Si-PIN像素. 每个机箱均包含18个探测器, 其中15个具有小视场准直器、两个具有大视场准直器, 还有一个具有全遮挡准直器用于本底估计. ME本底特征在 高能段与LE有一些相似之处, 尤其是光变曲线特征和地理分布. 然而, 不同本底成分的比例差异很大, 在整个探测能段内粒子本底占主导地位^[19, 22]. 图7分别展示了ME本底在第1年和第6年的地理分布对比. 可以看出, 第6年的ME本底略高于第1年. 在SAA附近的区域($330^\circ < \text{lon} < 360^\circ$, $0^\circ < \text{lat} < 30^\circ$), 本底明显高于具有相似纬度的其他大多数地区. 这表明, 当卫星经过高粒子通量区域(例如SAA)时, ME本底首先会上升, 然后随时间下降, 即ME本底具有延时成分. 通过对比升轨(卫星轨迹由南向北)和降轨态(卫星轨迹由北向南)本底的地理分布(图7), 我们发现ME本底具有相对较强的短时标延时成分, 并且导致ME本底的长时间演化. 为了提高本底估计的准确性, 本底模型的参数应该针对每一年给出.

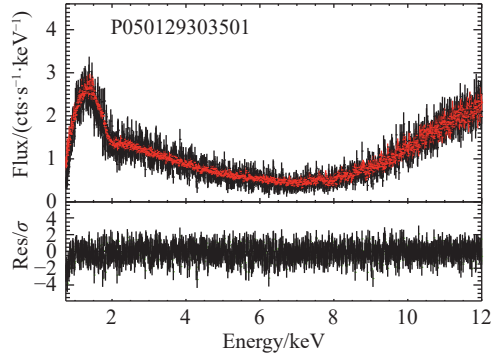


图 5 LE本底估计实例. 上图: 空天区观测能谱(黑)和估计本底(红). 下图: 以误差(σ)为单位的残差.

Fig. 5 An example of the LE background estimation.

Top: spectrum of a blank sky observation (black) and the estimated background spectrum (red). Bottom: residuals in terms of errors (σ).

3.1 ME本底观测特征和其长期演化

ME本底能谱在不同的地磁截止刚度范围内, 形状几乎保持不变. 但本底水平差异非常大, ME

本底与地磁截止刚度之间呈现明显的反相关性^[19]. ME本底的演化, 特别是银线的强度需要被仔细处理, 以确保本底模型的准确性. 图8展示了ME小视场探测器在6个能段的本底光变, 可以看到ME本底光变曲线表现出明显的轨道调制. 光变曲线中有一个明显的峰值, 由粒子事件引起, 通常出现在高纬度地区, 相应的时间被排除在GTI之外. 图9 (a)–(b)显示了地理区域($340^\circ < \text{lon} < 350^\circ$, $5^\circ < \text{lat} < 15^\circ$)内小视场探测器本底能谱的变化. 首先可以看到升轨态的本底水平比降轨态要高得多, 这是由短衰减时标的延时本底成分导致, 因为在这个地理位置上卫星刚离开SAA. 在前5 yr, 由于在轨运行的累积效应, ME本底水平随时间缓慢增加, 这是弱延时成分的累积效应. 在第6年本底水平有所下降, 这是卫星轨道上荷电粒子水平下降的原因. 而银线的中心随时间也有所偏移, 表明能量-能道关系发生了变化. 图9 (c)–(d)显示了全遮挡探测器的能谱演化. 银线的位置没有发生显著偏移, 这表明全遮挡探测器受到的辐射损伤比小视场探测器要小.

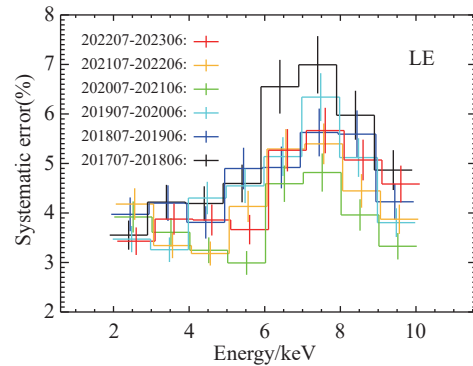


图 6 LE本底模型在2017年7月至2023年6月期间的系统误差

Fig. 6 Systematic errors of the LE background model from July 2017 to June 2023

3.2 ME本底模型

我们在先前的工作中构建了ME本底模型和相应的数据库^[19]. 由于ME本底能谱形状随地理位置变化较小, 但变化程度与LE相比则不可忽视, 因此本底模型必须考虑ME每个探测器在每个地理

位置的本底情况. 在每次本底估计中, 我们首先使用数据库得到卫星经过的每个地理位置上ME小视场和全遮挡探测器的初步预测本底能谱, 然后使用全遮挡探测器的观测结果进行进一步校正.

ME数据库产生了每个地理位置的按时间平均归一化的本底能谱, 同时可以通过全遮挡探测器确定当时的粒子强度, 并用于校正本底模型.

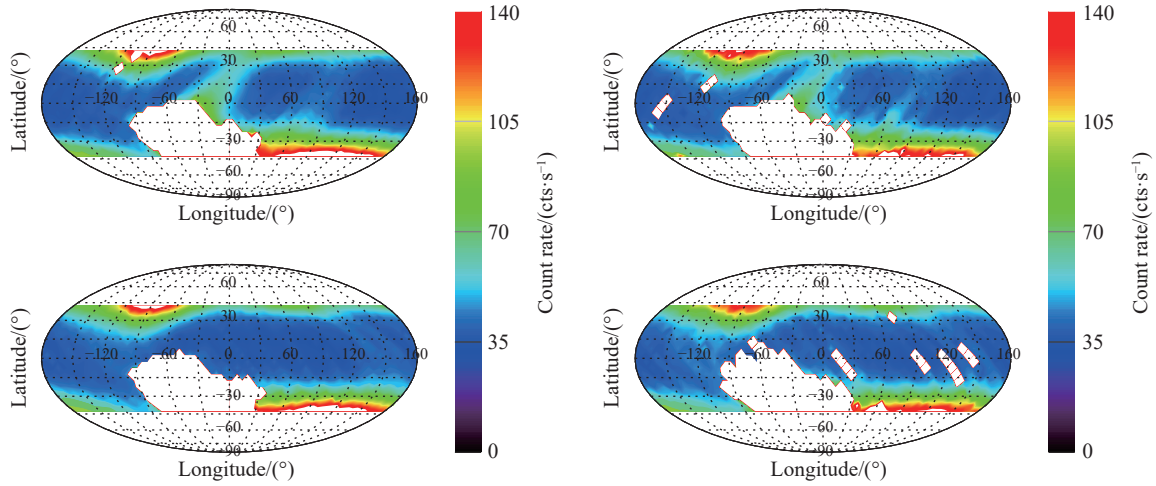


图 7 左: 第1年ME小视场探测器本底强度的地理分布(上: 升轨态, 下: 降轨态). 右: 同左图但为第6年.

Fig. 7 Left: geographical distributions (top: ascending orbital phase, bottom: descending orbital phase) of the background intensity of ME small FoV detectors in the first year. Right: same as the left panel but for the sixth year.

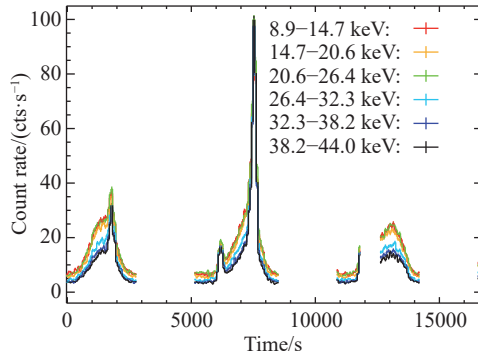


图 8 ME小视场探测器6个能段的本底光变
(T0 = 2022-06-18T07:15:53.5)

Fig. 8 Light curves of the background observation by the ME small FoV detectors in six energy bands
(T0 = 2022-06-18T07:15:53.5)

每一年度, 所有空天区观测的本底都由相应年份的模型参数进行估计. 图10是ME一次空天区观测的本底估计示例. 对所有的本底估计残差进行统计分析, 可得到每个能量段本底估计的系统误差^[19]. 图11显示了每一年中6个能量段的系统误差.

差. 结果显示, 系统误差在前5 yr没有显著增长趋势. 其中10–15 keV能量段的系统误差相对较大, 平均值约为2%, 而10–40 keV能量段的系统误差约为1.6%. 而在第6年, 15 keV以上的系统误差有所上升, 但各能段均小于2.5%, 这表明ME本底模型仍然可靠.

4 高能X射线望远镜

HE具有18个NaI (Tl)/CsI (Na)复合晶体探测器(编号为DetID = 0, 1, 2, ..., 17), 这些探测器被18个反符合探测器(anti-coincidence detector, ACD)包围, 用于主动本底屏蔽. 在这18个探测器中, 15个具有小视场, 两个具有大视场, 一个用于本底估计的全遮挡视场. 地面模拟表明, NaI和CsI晶体可以被慧眼-HXMT轨道周围的荷电粒子活化, 活化晶体的放射性衰变是HE本底的主要来源. 由于卫星在轨道上连续运行, HE探测器中的晶体被持续活化. 在卫星发射运行的第1年本底水平显著上升, 然后上升趋势逐渐放缓^[20–21].

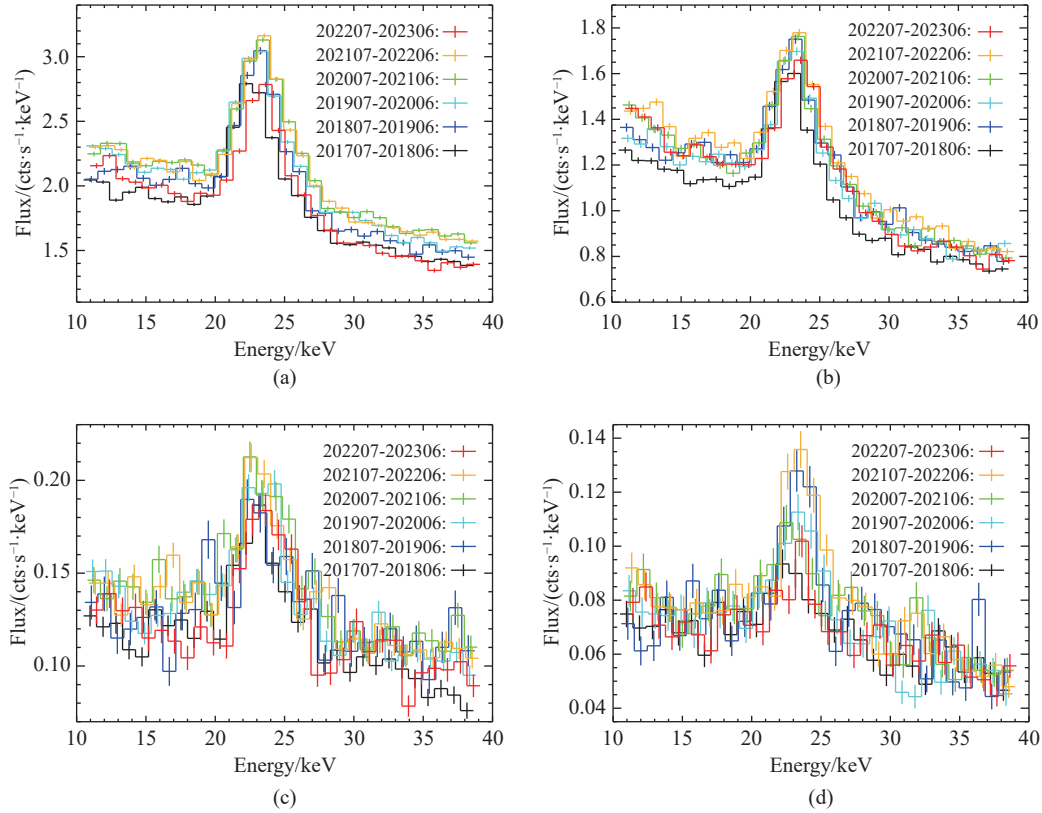


图 9 ME探测器自慧眼-HXMT在轨运行以来每年的本底能谱. 图(a)–(b): 小视场探测器升轨和降轨态. 图(c)–(d): 全遮挡探测器升轨和降轨态.

Fig. 9 Background spectra of the ME detectors for every year since *Insight*-HXMT operation in orbit. Panels (a)–(b): small FoV detector in ascending and descending orbital phase. Panels (c)–(d): blocked FoV detector in ascending and descending orbital phase.

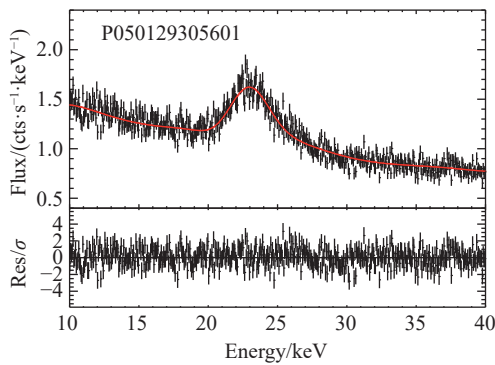


图 10 ME本底能谱估计实例. 上图: 空天区观测能谱(黑)和估计本底(红). 下图: 以误差(σ)为单位的残差.

Fig. 10 An example of the ME background estimation. Top: spectrum of a blank sky observation (black) and the estimated background spectrum (red). Bottom: residuals in terms of errors (σ).

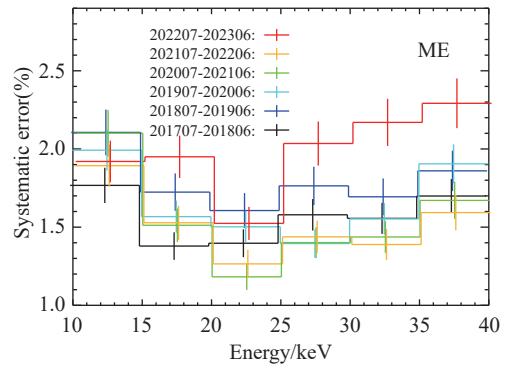


图 11 ME本底模型在2017年7月至2023年6月期间的系统误差

Fig. 11 Systematic errors of the ME background model from July 2017 to June 2023

4.1 HE本底观测特征和其长期演化

图12显示了第1年和第6年HE本底的地理分

布. 可以看到, 总体分布的差异很小, 但第6年的本底计数率显著高于第1年. 与LE和ME的本底不同, HE的本底由于晶体被荷电粒子活化从而被延时成分所主导. 因此, 即使在同一地理位置, 上升和下降轨道阶段的本底也会有很大不同. 图13显示了每年在上升和下降轨道阶段地理位置的能谱. 在 $(\text{lon}, \text{lat}) = (345^\circ, 15^\circ)$ 的能谱显示在子图(c)和(d)中. 在升轨态, 当卫星经过SAA时, 探测器的晶体严重活化. 由于没有足够的时间衰变, 因此本底水平相对较高. 然而, 在降轨态的本底较低. 由于卫星自上一次经过强荷电粒子区域已经过去很长时间, 因此本底主要由长时标衰变成分主导. 不同地理位置的HE本底能谱显示出长期演化. 与其他子

图中显示的结果相比, 子图(d)中显示的演化不太显著. 这是因为卫星刚刚经过SAA, 因此本底的很大比例是由短时标成分贡献的. 此外, SAA的荷电粒子强度在6 yr内没有发生显著变化. 如前人工作所述^[20-21], HE本底的能谱由各种发射线组成, 这些发射线是探测器与高能粒子相互作用引起的. 从图13可以看出, 能谱形状在6 yr内保持稳定. 图14显示了HE在6个不同能段的空天区观测光变曲线. 对于每个能段, 当卫星刚经过SAA时, 本底强度上升到较高水平, 然后逐渐衰减并显示显著的地磁调制. 不同能段之间也存在差异, 因为本底由许多具有不同比例、能谱形状和典型变化时标的成分组成.

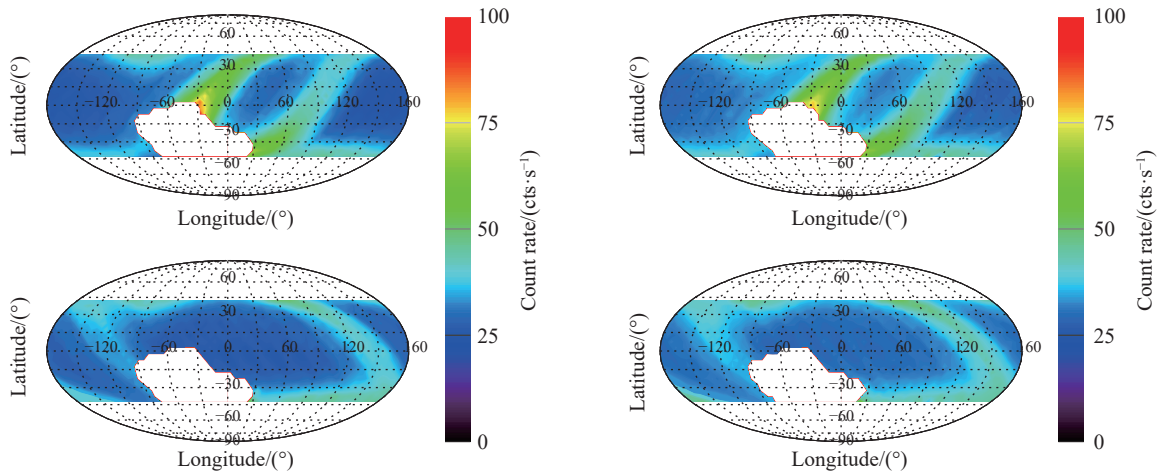


图 12 左: 第1年HE本底强度(DetID = 0 & $E > 30$ keV)的地理分布(上: 升轨态, 下: 降轨态). 右: 同左图但为第6年.

Fig. 12 Left: Geographical distributions (top: ascending orbital phase, bottom: descending orbital phase) of the HE background intensity (DetID = 0 & $E > 30$ keV) in the first year. Right: same as the left panel but for the sixth year.

4.2 HE本底模型

基于HE本底特征, 我们发展了HE本底模型^[18]. 其原理与ME相似, 但更为复杂. 为了获得任何地理位置和任何时间的本底, 我们构建了以时间为自变量的经验函数来描述HE本底的长期演化.

可以利用轨道参数和观测时间得到本底的初步估计, 并使用全遮挡探测器的数据做进一步校正. 因此, HE的本底估计严重依赖于本底长期演化的数学描述, 即经验函数的准确性对本底估计至关重要. 图15显示了46–74 keV 6个不同地理位置本底计数率的长期演化, 展示出不同地磁截止刚度和不同SAA延时本底的影响. 对于每个能段,

本底的长期演化可以由包含几个斜率的折线描述. 拟合曲线是由不同拐折时间的折线在这个能量范围内合并而成的, 因此显示出平滑的过渡而没有明显的跃变. 值得注意的是, 我们选择折线函数来描述本底计数率随时间的长期演化. 虽然其他函数可能也可以接受, 但折线已经可以很好地描述观测数据. 正如地面模拟所预测^[20-21], 活化的同位素导致在每次经过SAA后本底计数率迅速衰减, 并随着在轨运行天数的增加而长期积累. 这种积累在发射后的初始时期迅速上升, 并在数百天后变得缓慢, 因为长半衰期同位素并不占主导地位. 这种预测的长期演化与图15中显示的观测结果一致.

值得注意的是, HE本底在第6年呈现下降趋势, 这

是太阳活动增强导致轨道大气密度升高的结果.

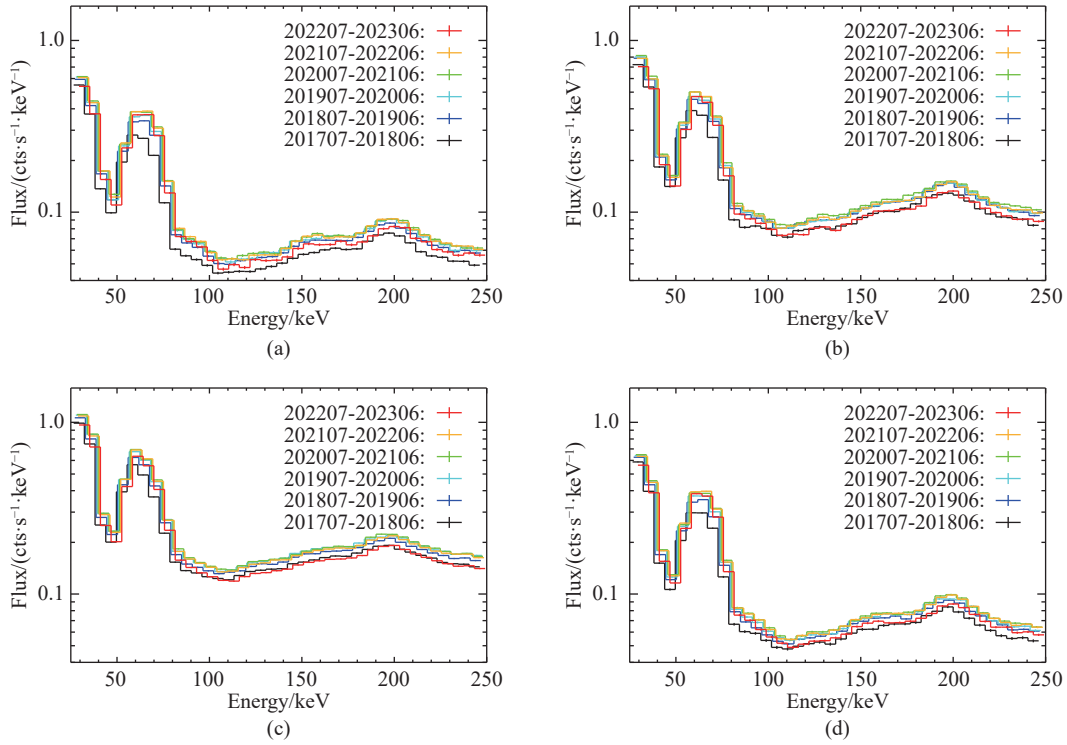


图 13 HE探测器(DetID = 0)每一年不同轨道状态和地理位置处的本底能谱. 左: 图(a)和(c)分别为地理位置(lon, lat) = (140°, 0°)和(345°, 15°)升轨态. 右: 同左图但为降轨态.

Fig. 13 Spectra of the HE background (DetID = 0) for every year with different orbital phases and geographical locations. Left: panels (a) and (c) are these for (lon, lat) = (140°, 0°) and (345°, 15°) in ascending orbital phase. Right: same as the left panels but for the descending orbital phase.

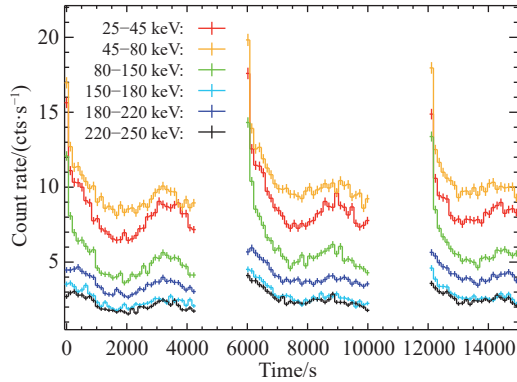


图 14 HE (DetID = 0)在6个能段上的本底光变曲线
(T0 = 2023-03-13T00:51:36.5)

Fig. 14 Light curves of the HE (DetID = 0) background observation in six energy bands (T0 = 2023-03-13T00:51:36.5)

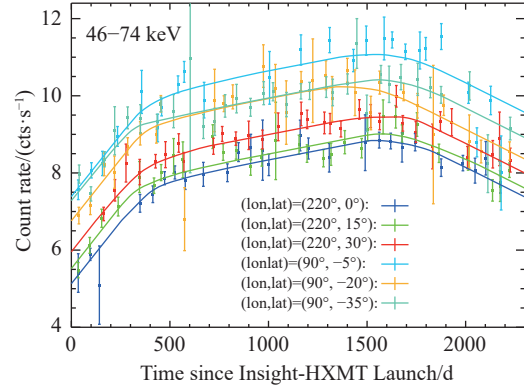


图 15 HE探测器(DetID = 0)在6个不同地理位置处46-74 keV能量范围的长期本底演化

Fig. 15 Long-term background evolution of the HE (DetID = 0) in 46-74 keV at six geographical locations

利用本底模型, 可以对所有空天区观测进行本底估计. 图16是对一个空天区观测的本底估计的示例. 按照先前工作中介绍的方法^[18], 可以得到不同能量段的系统误差. 图17展示了8个能量段在每一年中的系统误差. 结果显示, 每一年的平均系统误差均小于3%, 与卫星运行前两年的结果没有显著差异, HE本底模型仍然有效.

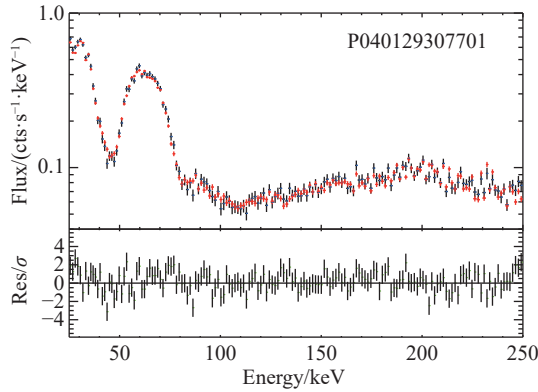


图 16 HE本底能谱估计实例. 上图: 空天区观测能谱(黑)和估计本底(红). 下图: 以误差(σ)为单位的残差.

Fig. 16 An example of the HE background spectrum estimation. Top: spectrum of a blank sky observation (black) and the estimated background (red). Bottom: residuals in terms of errors (σ).

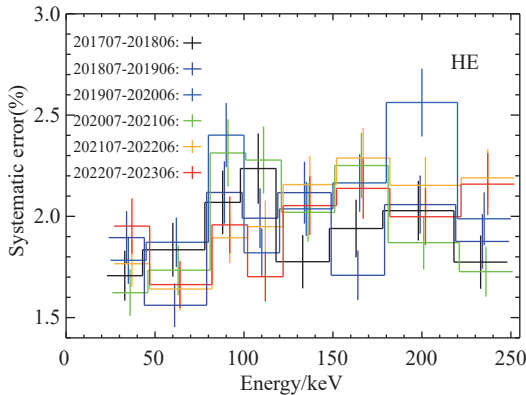


图 17 HE本底模型在2017年7月至2023年6月期间的系统误差

Fig. 17 Systematic errors of the HE background model from July 2017 to June 2023

5 总结与结论

慧眼-HXMT在轨运行6 yr后, 与在轨运行初

期相比, 3个望远镜的本底表现出不同的演化趋势. 本底的主要特征(光变、能谱和长期演化)都与设计预期一致.

LE探测器为了解决辐照损伤带来的问题, 进行了一系列操作, 这些操作也造成了LE探测器的本底变化. 例如调高探测阈值的下限以避免噪声信号, 因为其分布随着LE辐照损伤的增加而变得更宽. 此外, 本底能谱中发射线的持续变宽是LE能量分辨率下降的结果. 随着在轨运行时间的增加, ME本底水平受到弱延时成分的累积影响而增加. 此外, 低能段的ME本底也可能受到一些像素低能噪声的影响. HE探测器的晶体持续活化, 这是其本底强度随时间显著增加的原因. 在前5 yr内, HE本底增长趋势逐渐放缓, 并呈现出饱和的行为; 而在第6年HE本底呈现下降趋势, 这是太阳活动增强导致轨道大气密度升高的结果. 不同能量的本底演化不一致, 这意味着某一地理位置的本底谱形状也随时间演化.

尽管LE和ME本底的时间演化特征不显著, 为了保持本底估计的准确性, 每年都需要进行本底模型参数的更新. 对于HE本底模型, 本底随时间的演化从模型构建伊始就已经考虑在内. 统计分析显示, 慧眼-HXMT运行的前6 yr内, 3个望远镜的系统误差变化很小, 因此本底模型仍然有效可靠.

正如先前的工作所述^[17], 使用空天区观测构建的LE本底模型可以有效估计粒子本底和由CXB引起的弥散X射线本底. 因此, 可以用于高银纬的定点观测($|b| \leq 10^\circ$). 为了准确估计低银纬区域的弥散本底, 应该在LE本底估计中使用银道面扫描得到的弥散X射线本底^[27].

值得注意的是, 3个望远镜目前的本底模型在很大程度上依赖于全遮挡探测器. 因此, 全遮挡探测器至关重要, 特别是对于只有一个全遮挡探测器的HE. 这对本底估计构成潜在的风险, 因为缺乏足够的安全冗余度. 因此, 必须提前计划一种不依赖于全遮挡探测器的本底估计替代方案, 例如使用ACD和PM作为LE和ME本底估计的即时粒子监测器. 对于HE, 已经建立了一个不依赖于全遮挡探测器的参数化本底模型^[28]. 通过考虑导致HE本底的各种物理因素, 成功构建了考虑这些物

理过程的数学模型.

致谢 本项工作利用了中国国家航天局(CNSA)和中国科学院(CAS)资助的慧眼-HXMT任务的数据.

参 考 文 献

- [1] Zhang S N, Li T P, Lu F J, et al. SCPMA, 2020, 63: 249502
- [2] Chen Y, Cui W, Li W, et al. SCPMA, 2020, 63: 249505
- [3] Cao X, Jiang W, Meng B, et al. SCPMA, 2020, 63: 249504
- [4] Liu C, Zhang Y, Li X, et al. SCPMA, 2020, 63: 249503
- [5] Zhang Y, Ge M Y, Song L M, et al. ApJ, 2019, 879: 61
- [6] Li C K, Lin L, Xiong S L, et al. NatAs, 2021, 5: 378
- [7] Luo Q, Liao J Y, Li X F, et al. JHEAp, 2020, 27: 1
- [8] Sai N, Liao J Y, Li C K, et al. JHEAp, 2020, 26: 1
- [9] Strüder L, Briel U, Dennerl K, et al. A&A, 2001, 365: 18
- [10] Turner M J L, Abbey A, Arnaud M, et al. A&A, 2001, 365: 27
- [11] Garmire G P, Bautz M W, Ford P G, et al. SPIE, 2003, 4851: 28
- [12] Frontera F, Costa E, dal Fiume D, et al. AA&S, 1997, 122: 357
- [13] Frontera F, Costa E, dal Fiume D, et al. SPIE, 1997, 3114: 206
- [14] Rothschild R E, Blanco P R, Gruber D E, et al. ApJ, 1998, 496: 538
- [15] García J A, McClintock J E, Steiner J F, et al. ApJ, 2014, 794: 73
- [16] García J A, Grinberg V, Steiner J F, et al. ApJ, 2016, 819: 76
- [17] Liao J Y, Zhang S, Chen Y, et al. JHEAp, 2020, 27: 24
- [18] Liao J Y, Zhang S, Lu X F, et al. JHEAp, 2020, 27: 14
- [19] Guo C C, Liao J Y, Zhang S, et al. JHEAp, 2020, 27: 44
- [20] Li G, Wu M, Zhang S, et al. ChA&A, 2009, 33: 333
- [21] Xie F, Zhang J, Song L M, et al. Ap&SS, 2015, 360: 47
- [22] Zhang J, Li X B, Ge M Y, et al. Ap&SS, 2020, 365: 158
- [23] Alcaraz J, Alvisi D, Alpat B, et al. PhLB, 2000, 472: 215
- [24] Alcaraz J, Alpat B, Ambrosi G, et al. PhLB, 2000, 484: 10
- [25] Lu X, Liu C, Li X, et al. JHEAp, 2020, 26: 77
- [26] Li X B, Li X F, Tan Y, et al. JHEAp, 2020, 27: 64
- [27] Jin J, Liao J Y, Wang C, et al. ApJS, 2022, 260: 42
- [28] You Y, Liao J Y, Zhang S N, et al. ApJS, 2021, 256: 47

The First 6-year In-orbit Background of *Insight*-HXMT

LIAO Jin-yuan

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

ABSTRACT This paper reviews the in-orbit background of the Hard X-ray Modulation Telescope (HXMT) over the first six years, including the geographical distributions, spectral and temporal characteristics, as well as the long-term evolution of the in-orbit background of each payload. In addition, we also review the estimation methods for the in-orbit background of each payload of *Insight*-HXMT, providing a comprehensive introduction to the strategies for background estimation and the accuracy of the estimation. Overall, the in-orbit background of *Insight*-HXMT is consistent with expectations, and the background models for each payload can reliably estimate the spectrum and light curve of the in-orbit background.

Key words space vehicles: instruments, methods: data analysis, X-rays: background