

# 澳科一号卫星太阳X射线探测器探测效率 标定研究

樊丽鹏<sup>1,2</sup> 郭思明<sup>2</sup> 石永强<sup>3</sup> 陈建武<sup>3</sup> 左富昌<sup>3</sup> 周幸<sup>2</sup> 黄仕葵<sup>2</sup>  
舒子瑶<sup>2</sup> 郭锴悦<sup>2</sup> 郗晓雨<sup>1,2</sup> 余涛<sup>2</sup> 吴金杰<sup>2</sup>

1(河北科技大学 石家庄 050091)

2(中国计量科学研究院 北京 100029)

3(北京控制工程研究所 北京 100190)

**摘要** 太阳X射线探测器(Solar X-ray Detector, SXD)是“澳科一号”卫星B星(Macau Science Satellite-1B, MSS-1B)的主要载荷,包括软X射线探测单元(Soft X-ray Detection Unit, SXDU)和硬X射线探测单元(Hard X-ray Detection Unit, HXDU)两部分,采用硅漂移探测器(Silicon Drift Detector, SDD)和碲锌镉探测器(Cadmium Zinc Telluride, CZT)双通道设计。太阳X射线探测器通过同时观测太阳精确的能量谱和强度信息,量化太阳耀斑的水平并研究其演化过程和机理等科学问题。为了实现从观测数据到真实太阳X射线数据的反演,需要对SDD和CZT的探测效率进行标定。利用蒙特卡罗程序MCNP5对SDD和CZT探测效率进行了模拟计算,并在单能X射线地面标定装置上开展了软、硬X射线探测效率标定实验。结果表明:SDD和CZT探测效率的实验结果与模拟预期结果吻合较好,其中,SDD-1的实验效率和模拟效率的最大相对误差不超过3.59%@16 keV,CZT-1的实验效率和模拟效率的最大相对误差不超过9.54%@120 keV。单能X射线流强测量的相对扩展不确定度为3.8%( $k=2$ ),太阳X射线探测器探测效率模拟结果的不确定度为0.12%。这项研究为“澳科一号”卫星的太阳X射线探测器提供了数据支撑,并对后续其他天文卫星的同类探测器标定提供指导和参考。

**关键词** 澳科一号卫星, 太阳X射线探测器, 探测效率, 单能X射线

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090401

## Efficiency calibration of solar X-ray detector onboard MSS-1B satellite

FAN Lipeng<sup>1,2</sup> GUO Siming<sup>2</sup> SHI Yongqiang<sup>3</sup> CHEN Jianwu<sup>3</sup> ZUO Fuchang<sup>3</sup> ZHOU Xing<sup>2</sup>  
HUANG Shikui<sup>2</sup> SHU Ziyao<sup>2</sup> GUO Kaiyue<sup>2</sup> QIE Xiaoyu<sup>1,2</sup> YU Tao<sup>2</sup> WU Jinjie<sup>2</sup>

1(Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050091, China)

2(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

3(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

**Abstract** [Background] The solar X-ray detector (SXD) is the main scientific instrument onboard the Macau Science Satellite-1B (MSS-1B). It consists of two parts—a soft X-ray detection unit and a hard X-ray detection unit—with a dual-channel design comprising a silicon drift detector (SDD) and a cadmium zinc telluride detector (CZT). Both the precise energy spectrum and intensity of the Sun can be simultaneously obtained by the SXD, hence to

国家自然科学基金(No.12205289)资助

第一作者: 樊丽鹏, 男, 1999年出生, 2021年毕业于河北科技大学, 研究领域为X射线计量学

通信作者: 郭思明, E-mail: [gsm@nim.ac.cn](mailto:gsm@nim.ac.cn)

收稿日期: 2023-03-18, 修回日期: 2023-06-05

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12205289)

First author: FAN Lipeng, male, born in 1999, graduated from Hebei University of Science and Technology in 2021, focusing on X-ray metrology

Corresponding author: GUO Siming, E-mail: [gsm@nim.ac.cn](mailto:gsm@nim.ac.cn)

Received date: 2023-03-18, revised date: 2023-06-05

quantify the level of solar flares and study their evolutionary process. **[Purpose]** This study aims to calibrate the detection efficiencies of the SDD and CZT, so as to invert the observed data for obtaining real solar X-ray data. **[Methods]** The Monte Carlo code MCNP5 (Monte Carlo N-Particle 5) was employed to calculate the SDD and CZT efficiencies by simulation. Soft and hard X-ray detection efficiency calibration experiments were performed using a monochromatic X-ray ground calibration facility *via* relative measurement methods. **[Results]** The experimental results for the SDD-1 and CZT-1 efficiency calibration agree well with the predicted results of the simulation. In particular, the maximum relative error between the experimental and simulated efficiencies of SDD-1 dose not exceed 3.59%@16 keV, and the maximum relative error between the experimental and simulated efficiencies of CZT-1 dose not exceed 9.54%@120 keV. The relative expanded uncertainty of the monochromatic X-ray flow intensity measurement is 3.8% ( $k=2$ ), and the uncertainty of the simulation results for the SXD is 0.12%. **[Conclusions]** This study provides not only data support for SXD onboard MSS-1B satellite, but also valuable guidance for the calibration of other astronomical satellites' detectors in the future.

**Key words** Macau Science Satellite-1B (MSS-1B), Solar X-ray detector, Detection efficiency, Monochromatic X-rays

“澳科一号”卫星(Macau Science Satellite-1, MSS-1)是由中国澳门特别行政区政府和中国国家航天局联合研制的科学与技术试验卫星,计划于2023年在中国酒泉卫星发射中心择机发射,利用低倾角(倾角约 $41^\circ$ )轨道监测赤道附近南大西洋辐射异常区地磁场与空间环境。太阳X射线探测器(Solar X-ray Detector, SXD)是“澳科一号”卫星B星(Macau Science Satellite-1B, MSS-1B)的主要科学探测仪器,旨在监测太阳耀斑爆发,研究第25个太阳周期的太阳活动,并评估其对太阳活动和地球空间环境的影响<sup>[1]</sup>。

目前,在轨的新一代软X射线太阳光谱仪——中国“风云二号”卫星搭载的太阳X射线光谱仪<sup>[2]</sup>和“张衡一号”卫星搭载的太阳X射线监测仪<sup>[3]</sup>、美国地球静止环境业务卫星-16(Geostationary Operational Environmental Satellite-16)搭载的X射线传感器<sup>[4]</sup>和小型X射线太阳谱仪-1(Miniature X-ray Solar Spectrometer-1)卫星搭载的太阳X射线传感器<sup>[5]</sup>以及印度“月船2号”(Chandrayaan-2)卫星搭载的太阳X射线监测仪<sup>[6]</sup>等天文卫星普遍采用硅漂移探测器(Silicon Drift Detector, SDD)或Si-PIN探测器。目前,在轨的硬X射线太阳光谱仪——欧洲航天局太阳轨道飞行器(Solar Orbiter)卫星搭载的X射线成像光谱仪望远镜<sup>[7]</sup>、中国“夸父一号”卫星搭载的硬X射线成像仪<sup>[8]</sup>以及印度太阳神-L1(Aditya-L1)卫星搭载的高能L1轨道X射线光谱仪<sup>[9]</sup>等天文卫星普遍采用碲锌镉探测器(Cadmium Zinc Telluride, CZT)或新型闪烁体探测器。而MSS-1B卫星搭载的太阳X射线探测器包括软X射线探测单元(Soft X-ray Detection Unit, SXDU)和硬X射线探测单元(Hard X-ray Detection Unit, HXDU)两

部分,采用SDD和CZT双通道设计,可实现对太阳X射线1~600 keV的综合宽能量段探测。与同类仪器相比,太阳X射线探测器的能量范围更广,能量分辨率更好,具有高探测效率和高时间分辨率等优点。

太阳X射线探测器是MSS-1B卫星空间观测的重要组成部分,要实现从观测数据到真实太阳X射线数据的反演,就必须对太阳X射线探测器的能量响应、探测效率等关键参数进行标定,尤其是探测效率的标定。为了验证太阳X射线探测器SDD和CZT模拟探测效率的准确性和可靠性,于2022年在中国计量科学研究院单能X射线地面标定装置上对SDD和CZT进行了软、硬单能X射线探测效率的标定。

中国计量科学研究院单能X射线地面标定装置是基于X光机晶体衍射产生单能X射线的辐射装置,能量范围覆盖5~300 keV,可满足天文卫星X射线探测器在相应能量段的标定需求<sup>[10-12]</sup>。近年来,该装置开展了多个天文卫星的地面标定项目,支撑了国家重大科学工程科学目标的实现<sup>[13-15]</sup>。硬X射线调制望远镜(Hard X-ray Modulation Telescope, HXMT)是我国第一颗空间天文X射线卫星,其主要载荷高能X射线探测器(High Energy X-ray Detector, HED)于2017年在该装置上完成了能量线性、能量分辨率和探测效率的标定任务<sup>[16]</sup>。引力波暴高能电磁对应体全天监测器(Gravity wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor, GECAM)是我国专门针对引力波 $\gamma$ 暴探测而研制的科学卫星,其主要载荷 $\gamma$ 射线探测器(Gamma-Ray Detector, GRD)于2020年在该装置上完成了能量线性、能量分辨率和探测效率的标定任务(包括4个探测器晶体吸收边的精确标定)<sup>[17]</sup>。天

基多波段空间变源监视器(Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor, SVOM)是中国和法国科学家联合开发的一颗天文卫星,其主要载荷 $\gamma$ 射线监视器(Gamma Ray Monitor, GRM)于2021年在该装置上完成了能量线性、能量分辨率、探测效率、温度响应、高压响应和探测器晶体非均匀性测试等多项标定任务<sup>[18]</sup>,且已标定天文卫星搭载探测器的实验标定结果与理论计算结果吻合较好,标定数据结果可靠,满足地面应用系统对标定产品的要求。

利用蒙特卡罗程序MCNP5(Monte Carlo N-Particle 5)对“澳科一号”卫星太阳X射线探测器SDD和CZT建立了几何模型,并对其探测效率进行了模拟计算。在8~20 keV能量段选择4个能量值进行SDD的探测效率标定,在25~120 keV能量段选择4个能量值进行CZT的探测效率标定。此外,太阳X射线探测器包括探测器部分和其他光学元件,本实验仅对探测器部分进行标定和研究。

## 1 实验装置和原理

### 1.1 单能X射线地面标定装置

本实验采用单晶单色X射线探测器地面标定装置和双晶单色X射线探测器地面标定装置两套单能X射线地面标定装置。

单晶单色X射线探测器地面标定装置如图1所

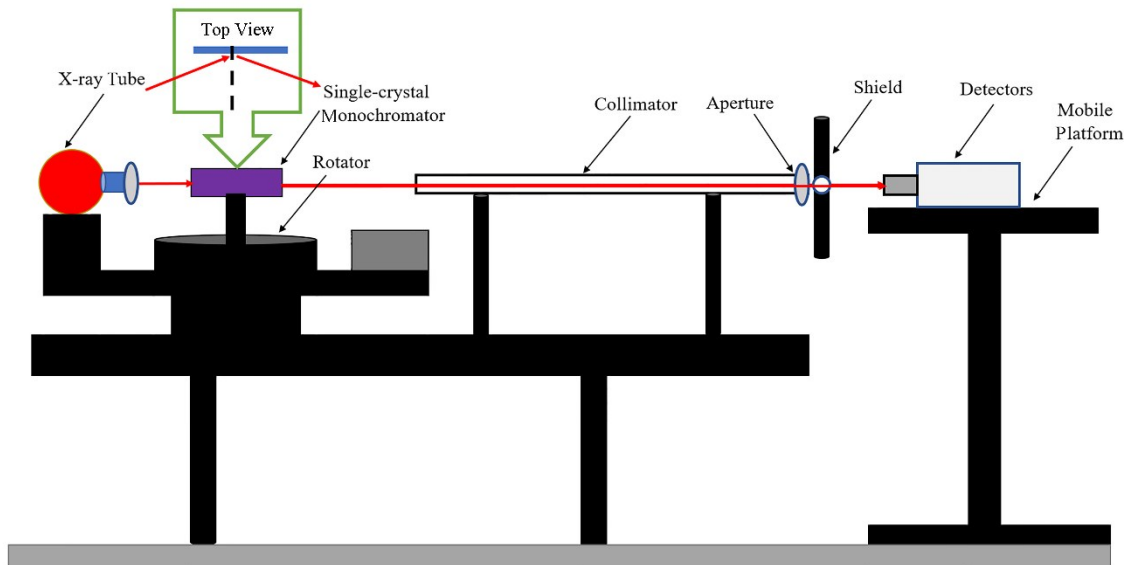


图1 单晶单色X射线探测器地面标定装置示意图

Fig.1 Schematic of the single-crystal monochromatic X-ray detector ground calibration facility

示,主要由最大阳极电压为50 kV的铜靶X光机、单晶单色仪、同步旋转装置、长度为1.2 m的铅准直管、不同孔径的限束光阑、厚度为1.2 mm的铅屏蔽板、三维移动平台以及高纯锗(High Energy Germanium, HPGe)标准探测器等组成。单晶单色仪和X光机设计在同步旋转装置上,可达到单晶单色仪旋转 $\theta$ 角,而X光机旋转 $-2\theta$ 角的效果,以保证X射线出射方向不变。

示,主要由最大阳极电压为50 kV的铜靶X光机、单晶单色仪、同步旋转装置、长度为1.2 m的铅准直管、不同孔径的限束光阑、厚度为1.2 mm的铅屏蔽板、三维移动平台以及高纯锗(High Energy Germanium, HPGe)标准探测器等组成。单晶单色仪和X光机设计在同步旋转装置上,可达到单晶单色仪旋转 $\theta$ 角,而X光机旋转 $-2\theta$ 角的效果,以保证X射线出射方向不变。

X光机产生的连续谱X射线经衍射晶体发生布拉格衍射,产生能量连续可调的单能X射线,其能量范围主要由X光机和衍射晶体决定。该过程的原理为布拉格衍射方程:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

式中: $d$ 为晶体的晶面间距; $\theta$ 为布拉格角; $n$ 为衍射级数; $\lambda$ 为波长。光量子公式为:

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (2)$$

式中: $E$ 为能量; $h$ 为普朗克常数; $\nu$ 为频率; $c$ 为光速; $\lambda$ 为波长。联立二式可推导出单能X射线的能量为:

$$E = nhc/2d \sin \theta \quad (3)$$

通过调节衍射晶体的不同角度,可实现5~40 keV范围内能量连续可调的单能X射线。在能量范围内其单色性优于3.24%,8 h内能量稳定性为0.02%@25 keV,通量稳定性为1.0%@25 keV,能够满足几乎所有探测器在5~40 keV范围内的标定需求。

示,主要由最大阳极电压为225 kV的钨靶X光机和双晶单色仪,其他设备均相同。双晶单色仪由两块高度平行的衍射晶体组成,经两次布拉格衍射可产生出射方向不变

的单能X射线。

通过调节双晶的不同角度,可实现20~161 keV范围内能量连续可调的单能X射线。在能量范围内其单色性优于3.55%,10 h内通量稳定性为0.8%@

127 keV,能够满足几乎所有探测器在20~161 keV范围内的标定需求。

单能X射线地面标定装置实物图如图3所示。两套晶体单色仪的详细参数列于表1。

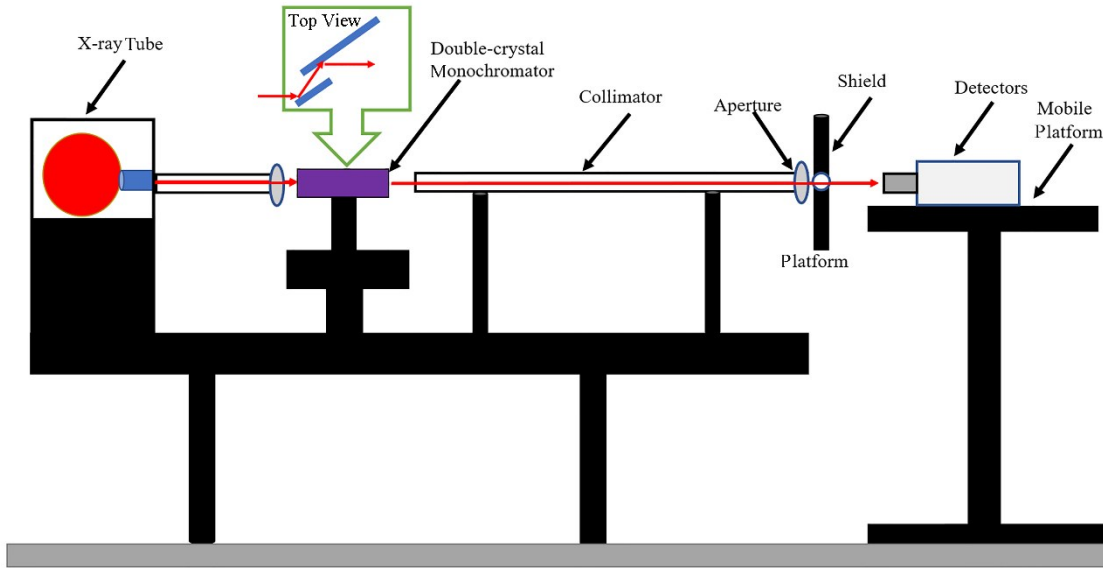


图2 双晶单色X射线探测器地面标定装置示意图

Fig.2 Schematic of the double-crystal monochromatic X-ray detector ground calibration facility

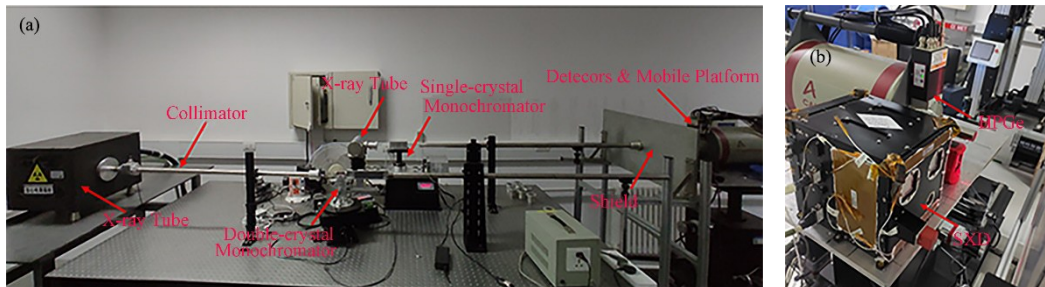


图3 单能X射线地面标定装置(a),太阳X射线探测器标定现场照片(b)

Fig.3 Photograph of the monochromatic X-ray ground calibration facility (a), photograph of the SXD calibration site (b)

表1 单色仪的详细参数

Table 1 Characteristics of the monochromators

	单晶单色仪 Single-crystal monochromator	双晶单色仪 Double-crystal monochromator
晶体 Crystal	LiF(200), LiF(220), LiF(420)	Si(220), Si(551)
能量范围 Energy range	5~40 keV	20~161 keV
布拉格角度 Bragg angle	4°~25°	2.5°~7.5°
单色性 Monochromaticity	$\Delta E/E < 3\% @ 10 \text{ keV}$	$\Delta E/E < 2\% @ 60 \text{ keV}$
单色光 Monochromatic light	> 90%	> 90%
通量 Flux	$> 5\,000 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$> 2\,000 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
调节步长 Adjustable step	< 0.2 keV	< 0.2 keV
光斑尺寸 Spot size	1~10 mm	1~10 mm

## 1.2 太阳X射线探测器

SXD如图4所示,软X射线探测单元(Soft X-ray Detect Unit, SXDU)和硬X射线探测单元(Hard X-ray Detect Unit, HXDU)均由准直器、X射线探测

器和处理电路组成。SXDU使用两个不同面积的SDD,以扩展针对不同等级太阳耀斑的动态观测能力,观测能量范围设计为1~20 keV。HXDU使用两个相同面积的CZT,以增强观测数据的可靠性,观测能量



范围设计为20~600 keV。处理电路包括探测器前置放大器模块、信号处理模块和电源模块,且SXD配备了 $^{241}\text{Am}$ 放射源,用于进行在轨校准。

SXDU两个SDD的面积为 $0.25\text{ cm}^2$ ,通过不同的孔径设计,有效面积分别限制在 $0.25\text{ cm}^2$ 和 $0.005\text{ cm}^2$ 。探测器窗口采用厚度为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的铍滤光片,其能量分辨率优于 $160\text{ eV}@5.9\text{ keV}$ ,探测效率大于 $90\%@5.9\text{ keV}$ 。而HXDU两个CZT的面积为 $4\text{ cm}^2(2\text{ cm}\times 2\text{ cm})$ ,有效面积总计为 $8\text{ cm}^2$ 。探测器窗口采用厚度为 $1\text{ mm}$ 的铝滤光片,其能量分辨率优于 $12\%@59.5\text{ keV}$ 和 $3\%@662\text{ keV}$ ,探测效率大于 $90\%@59.5\text{ keV}$ 。SXD双通道观测视场相同,准直器的视野均设计为 $\pm 2^\circ$ ,用于限制探测器的视野并减少仪器背景噪声。

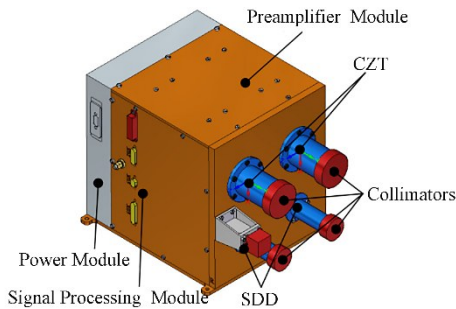


图4 太阳X射线探测器示意图  
Fig.4 Schematic diagram of the SXD

## 2 实验和仿真计算

### 2.1 实验方法

天文卫星搭载探测器的最终目标是探测不同辐射的能量分布,反演真实的天文现象,而探测效率是探测器的重要特性之一。探测器的探测效率通常用以表征探测器对不同能量辐射量子数的阻挡能力,定义为:

$$\eta = N_1/N_2 \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\eta$ 为探测器的探测效率; $N_1$ 为探测器记录的辐射量子数; $N_2$ 为入射到探测器的辐射量子数,无量纲分数,通常表示为百分比。

一般情况下,探测器的探测效率有绝对测量和相对测量两种测量方法。一般在同步辐射上可实现绝对测量,即已知入射的辐射量子数,通过计算探测器记录的辐射量子数得到。而相对测量是通过已校准的标准探测器和待测探测器测量同一光源,对两者记录的辐射量子数进行对比,得到其探测效率。本实验采用相对测量的方法,用已校准的HPGe标准探测器计算SXD的探测效率。即:

$$\eta_{\text{SXD}} = N_{\text{SXD}}\eta_{\text{HPGe}}/N_{\text{HPGe}} \quad (5)$$

式中: $\eta_{\text{SXD}}$ 为SXD的相对探测效率; $N_{\text{SXD}}$ 为SXD记录的辐射量子数; $\eta_{\text{HPGe}}$ 为HPGe标准探测器的探测效率; $N_{\text{HPGe}}$ 为HPGe标准探测器记录的辐射量子数。

HPGe标准探测器已采用 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 和 $^{109}\text{Cd}$ 三个放射源进行实验校准。通过对实验数据的计算,采用点源外推法得到不同能量下的探测效率,具体结果如图5所示<sup>[19]</sup>。

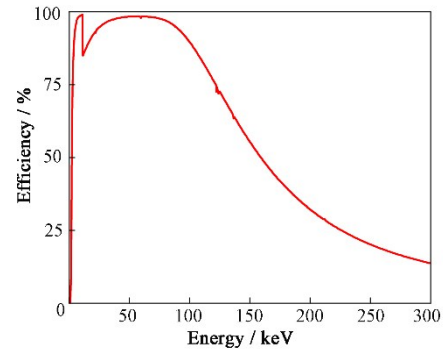


图5 HPGe的探测效率曲线  
Fig.5 Detection efficiency curve of HPGe detector

### 2.2 实验步骤

X射线的本质是一种能量很强、波长很短的电磁波。SXD的标定实验在大气环境下进行,大气对X射线(尤其是低能)的影响主要体现在X光子的数目上,而不会影响X光子的能量。10 keV以下的X射线会被空气吸收很大一部分,故在低能段可适当增加能谱采集时间以得到更加准确可靠的实验数据。利用HPGe标准探测器对SXD进行探测效率的实验标定,标定前须扣除本底。具体实验步骤为:

- 1)将HPGe标准探测器和SXD水平置于三维移动平台上,保证两个探测器窗口位于同一竖直面,实验布局详情见图3(b);
- 2)利用HPGe标准探测器确定目标能量并测量标定X束流200 s,获取其测量能谱;
- 3)保持束流输出不变,利用SXD再次测量标定X束流相同时间,获取其测量能谱;
- 4)通过两次观测能谱计算获得SXD的探测效率;
- 5)对SXD的4路探测器依次进行标定。

### 2.3 仿真计算设置

蒙特卡罗程序MCNP5用于模拟“澳科一号”卫星太阳X射线探测器SDD和CZT的X射线传输,以获得入射X射线的能量沉积谱,从而计算其探测效率。模拟SDD的几何模型如图6所示,一个硅灵敏层( $5\text{ }000\text{ }\mu\text{m}\times 5\text{ }000\text{ }\mu\text{m}\times 500\text{ }\mu\text{m}$ ),前面一个铍滤光

片(5 000  $\mu\text{m}\times 5\ 000\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$ ),设置在真空环境中。模拟 CZT 的几何模型如图 7 所示,一个 CZT 灵敏层(20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 5 mm),前面一个铝滤光片(20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 1 mm),设置在真空环境中。光源设置为从正面(+Z轴)入射的平行光束,光源半径为 2 mm,每次运行的光子总数为  $10^7$  个。记录每个模拟事件中灵敏层沉积的能量,计算不同能量下的探测效率。

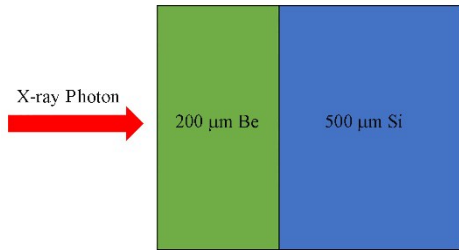


图6 SDD 的几何模型示意图  
Fig.6 Diagram of geometric model of the SDD

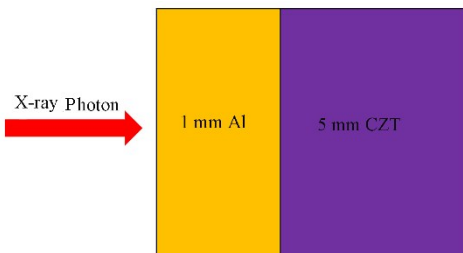


图7 CZT 的几何模型示意图  
Fig.7 Diagram of geometric model of the CZT

### 3 结果与讨论

通过初步分析实验数据,“澳科一号”卫星 SXD 的两个 SDD 和 CZT 一致性较好,故在此只针对 SDD-1 和 CZT-1 的实验数据进行讨论(定义为 1 号探头和 2 号探头)。图 8 给出了 HPGe 标准探测器在不同能量下的实测能谱图。

#### 3.1 SDD-1 的探测效率

对 SDD 进行标定时,选取 1 mm 光阑,选择 8 keV、12 keV、16 keV 和 20 keV 能量值依次标定。由于 8 keV 时空气对 X 射线的吸收较多,全能峰计数较少,故对 HPGe 和 SDD 采集 600 s,其他 3 个能量

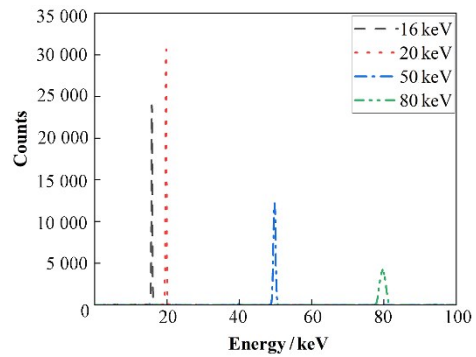


图8 HPGe 的实测能谱  
Fig.8 Monochromatic energy spectra measured using HPGe detector

值采集 200 s。对 HPGe 和 SDD 采集的能谱数据扣除本底,进行全能峰高斯拟合(取  $10\sigma$ ),计算 SDD-1 的相对探测效率,以及实验效率和模拟效率的相对误差,数据结果列于表 2。SDD-1 在 4 个能量值的实验效率和模拟效率相差很小,两个效率的最小相对误差为 2.86%@12 keV,最大相对误差为 3.59%@16 keV,均低于 4%。我们推测,误差可能是 X 射线束流微小发散、屏蔽不足、环境温度等因素引起。

图 9 为 SDD-1 实验效率和模拟效率的对比。4 个能量值的实验效率和模拟效率吻合较好,两个效率趋势基本一致,很好地验证了 SDD-1 模拟效率的准确性和可靠性。在 10 keV 以下,随着能量的增大,铍窗对 X 射线的阻挡能力逐渐减弱,硅灵敏层接收到更多的 X 光子,探测效率逐渐增大。而在 10 keV 以上,随着能量的增大,一部分 X 光子直接穿过铍窗和硅灵敏层,探测效率逐渐减小。SDD 观测能量范围设计为 1~20 keV,在该能量范围内具有较高的探测效率。除个别效率在 40% 以下外,其他大部分效率均在 40% 以上。

#### 3.2 CZT-1 的探测效率

对 CZT 进行标定时,选取 3 mm 光阑,选择 25 keV、50 keV、80 keV 和 120 keV 能量值依次标定。此外,由于 CZT 有效面积较大,在右上、左上、左下、右下选取 4 个位置分别标定,定义为 A、B、C、D 4 点。由于 120 keV 时本底辐射较大,故对 HPGe 和 CZT 采集 300 s,其他 3 个能量值采集 200 s。同样地,对 HPGe

表2 SDD-1 测量数据  
Table 2 Measurement results for SDD-1

能量 Energy / keV	SDD-1 实验效率 Experimental efficiency of SDD-1 / %	SDD-1 模拟效率 Simulation efficiency of SDD-1 / %	相对误差 Relative error / %
8	94.44	97.23	2.87
12	88.51	91.12	2.86
16	64.71	62.47	-3.59
20	38.53	39.82	3.24

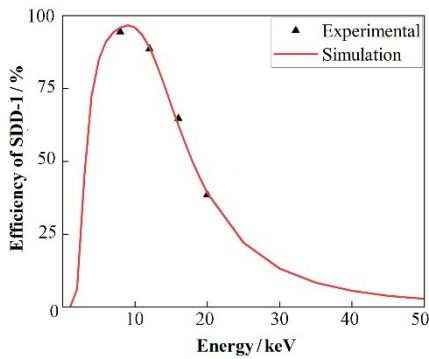


图9 SDD-1 探测效率曲线  
Fig.9 Detection efficiency curve of SDD-1

表3 CZT-1测量数据  
Table 3 Measurement results for CZT-1

能量 Energy / keV	A点实验效率 Experimental efficiency of A / %	B点实验效率 Experimental efficiency of B / %	C点实验效率 Experimental efficiency of C / %	D点实验效率 Experimental efficiency of D / %	平均实验效率 Average experimental efficiency / %	CZT-1 模拟效率 Simulation efficiency of CZT-1 / %	相对误差 Relative error / %
25	55.10	55.91	54.44	55.01	55.12	57.02	3.33
50	83.46	83.64	83.55	83.34	83.50	81.26	-2.75
80	90.98	92.51	94.92	94.61	93.26	88.78	-5.04
120	77.54	81.07	78.03	78.60	78.81	87.13	9.54

图10为CZT-1的实验效率和模拟效率的对比。4个位置、4个能量值的实验效率和模拟效率基本吻合,两个效率趋势基本一致,很好地验证了CZT-1模拟效率的准确性和可靠性。

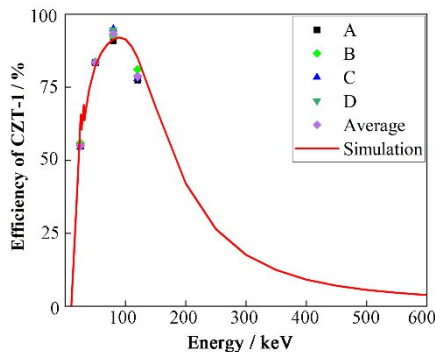


图10 CZT-1 探测效率曲线  
Fig.10 Detection efficiency curve of CZT-1

在100 keV以下,随着能量的增大,铝窗对X射线的阻挡能力逐渐减弱,CZT灵敏层接收到更多的X光子,探测效率逐渐增大。由于CZT中镉元素、碲元素在27 keV和32 keV附近被激发,产生特征X射线发生逃逸,探测效率有所下降。而在100 keV以上,随着能量的增大,一部分X光子直接穿过铝窗和CZT灵敏层,探测效率逐渐减小。CZT观测能量范围设计为20~600 keV,在该能量范围内可实现X射线

和CZT采集的能谱数据扣除本底,进行全能峰高斯拟合(取 $10\sigma$ ),计算CZT-1的相对探测效率,以及平均实验效率和模拟效率的相对误差,数据结果列于表3。CZT-1在4个能量值的平均实验效率和模拟效率相差不大,两个效率的最小相对误差为2.75%@50 keV,最大相对误差为9.54%@120 keV,均低于10%。在标定120 keV时,铅屏蔽板不足以阻挡高能散射X射线,实验效率和模拟效率相差略大。后续标定实验可考虑增加铅屏蔽板的厚度,以获取更准确可靠的实验数据,且4个位置的实验效率基本一致,一定程度上说明CZT-1的均匀性较好。

全覆盖观测。20~300 keV能量段效率可达20%以上,300~600 keV能量段效率较低,但仍可以探测到较高能量的太阳X射线。

## 4 不确定度分析

### 4.1 流强测量的不确定度

单能X射线流强由探测器能谱全能峰面积计数乘以探测效率得到。因此,主要的不确定度包括能谱计数、探测效率、探测面积以及探测器定位的不确定度。具体分析结果列于表4,流强测量的合成相对标准不确定度为1.9%,流强测量由多个复杂量共同作用,可以认为是高斯分布,所以取 $k=2$ ,得到相对扩展不确定度3.8%( $k=2$ )。

### 4.2 蒙特卡罗模拟的不确定度

蒙特卡罗模拟中与辐射传输相关的不确定度通常很难精确评估。主要的不确定度包括反应横截面、模拟模型以及统计涨落的不确定度。反应横截面的不确定度很小,可以忽略。由于蒙特卡罗模拟的结果与实验结果进行了详细的比较,我们最终在表5只给出了统计涨落的不确定度。作为所有能量值,太阳X射线探测器探测效率模拟结果的不确定度评估为0.12%。



表4 流强测量的不确定度  
Table 4 Uncertainty of the flow intensity measurement

项目 Item	相对不确定度 Relative uncertainty / %
能谱计数 Energy spectrum counting	0.3
探测效率 Detection efficiency	1.8
探测面积 Detection area	0.5
探测器定位 Detector location	0.2
合成相对标准不确定度 Combined relative standard uncertainty	1.9
相对扩展不确定度 Relative expanded uncertainty	3.8( $k=2$ )

表5 蒙特卡罗模拟结果的不确定度  
Table 5 Uncertainty of the Monte Carlo simulation results

能量 Energy / keV	统计涨落 Counting statistics / %	相对不确定度 Relative uncertainty / %
8	0.02	0.02
12	0.04	0.04
16	0.08	0.08
20	0.12	0.12
25	0.08	0.08
50	0.05	0.05
80	0.03	0.03
120	0.04	0.04

## 5 结语

利用蒙特卡罗程序MCNP5对“澳科一号”卫星太阳X射线探测器SDD和CZT探测效率进行了模拟计算,采用单能X射线地面标定装置对SDD和CZT进行了软、硬X射线探测效率的标定。在8~20 keV, SDD-1的实验效率和模拟效率吻合较好,两个效率的最大相对误差为3.59%@16 keV。在25~120 keV, CZT-1的实验效率和模拟效率基本吻合,两个效率的最大相对误差为9.54%@120 keV。此外,对实验及模拟本身的不确定度进行了分析,单能X射线流强测量的相对扩展不确定度为3.8%( $k=2$ ),SXD探测效率模拟结果的不确定度为0.12%。本实验为“澳科一号”卫星实现科学目标提供了数据支撑,为其他天文卫星搭载探测器的地面标定提供了参考,以及对后续单能X射线地面标定装置进一步优化和改进具有指导意义。

未来,我们将进一步对5 keV以下单能软X射线标定装置进行研究,以提高该能量范围的标定能力,满足天文卫星对更低能量X射线的地面标定需求。

**致谢** 感谢中国计量科学研究所和北京控制工程研究所工作人员对本文的支持,他们对本文提供了巨大的帮助。

**作者贡献声明** 樊丽鹏负责背景调研,完成标定实

验,HPGe标准探测器和太阳X射线探测器数据处理,撰写论文;郭思明负责提供理论基础和实验思路,论文完善意见;石永强、陈建武、左富昌负责合作标定实验,完成太阳X射线探测器实验数据处理,论文完善意见;周幸、黄仕葵、舒子瑶、郭锴悦、郗晓雨、余涛负责协助实验完成,提供论文思路;吴金杰负责论文完善意见。

## 参考文献

- Shi Y Q, Li L S, Chen J W, *et al.* Design of the solar X-ray detector for the Macau Science Satellite-1B[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2023, **7**(1): 125 - 130. DOI: [10.26464/epp2023018](https://doi.org/10.26464/epp2023018).
- 韦飞, 张效信, 张斌全, 等. 风云二号F星太阳X射线探测器在轨探测初步成果[J]. *地球物理学报*, 2014, **57**(11): 3812 - 3821.  
WEI Fei, ZHANG Xiaoxin, ZHANG Binqun, *et al.* Pre-flight calibration and the first results for the Solar X Ray Spectrometer (SXRS) onboard FY-2F satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3812 - 3821.
- Li X Q, Xu Y B, An Z H, *et al.* The high-energy particle package onboard CSES[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2019, **3**(3): 22. DOI: [10.1007/s41605-019-0101-7](https://doi.org/10.1007/s41605-019-0101-7).
- Reinard A, Hill S, Bailey S, *et al.* Report on GOES SXI/XRS calibration effort[C]//Optical Engineering + Applications. Proc SPIE 6689, Solar Physics and Space Weather Instrumentation II, San Diego, California, USA. 2007, **6689**: 152 - 161. DOI: [10.1117/12.734268](https://doi.org/10.1117/12.734268).
- Mason J P, Woods T N, Chamberlin P C, *et al.* MinXSS-2 CubeSat mission overview: improvements from the successful MinXSS-1 mission[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **66**(1): 3 - 9. DOI: [10.1016/j.asr.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.02.011).
- Vadawale S V, Shanmugam M, Acharya Y B, *et al.* Solar X-ray monitor (XSM) on-board chandrayaan-2 orbiter[J]. *Advances in Space Research*, 2014, **54**(10): 2021 - 2028.



- DOI: [10.1016/j.asr.2013.06.002](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.06.002).
- 7 Bloomfield D S, Byrne M P, Hurford G J, *et al.* Data processing and analysis software for the spectrometer/telescope for imaging X-rays (STIX) onboard Solar Orbiter[J]. Figshare Poster. 2013, **732**: 295 - 298. DOI: [10.6084/m9.figshare.734291.v2](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.734291.v2).
  - 8 Liu W, Zhang Z, Wu J, *et al.* Pre-launch characterization of the spectrometer of Hard X-ray Imager (HXI) onboard the ASO-S mission[J]. Journal of Instrumentation, 2022, **17**(5): P05045. DOI: [10.1088/1748-0221/17/05/p05045](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/05/p05045).
  - 9 Sankarasubramanian K, Sudhakar M, Nandi A, *et al.* X-ray spectrometers on-board aditya-L1 for solar flare studies[J]. Current Science, 2017, **113**(4): 625 - 627. DOI: [10.18520/cs/v113/i04/625-627](https://doi.org/10.18520/cs/v113/i04/625-627).
  - 10 Guo S M, Wu J J, Hou D J. The development, performances and applications of the monochromatic X-rays facilities in (0.218 - 301) keV at NIM, China[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(6): 65. DOI: [10.1007/s41365-021-00890-2](https://doi.org/10.1007/s41365-021-00890-2).
  - 11 Jiang Z, Wang E Y, Song R Q, *et al.* Optimization of a double crystal monochromator[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2021, **79**(8): 697 - 705. DOI: [10.1007/s40042-021-00294-w](https://doi.org/10.1007/s40042-021-00294-w).
  - 12 Guo S M, Jiang Z, Wu J J, *et al.* Research on a tunable monochromatic X-rays source in (5~40) keV[J]. Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine, 2022, **181**: 110096. DOI: [10.1016/j.apradiso.2022.110096](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110096).
  - 13 Li T P, Xiong S L, Zhang S N, *et al.* Insight-HXMT observations of the first binary neutron star merger GW170817[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2018, **61**(3): 031011. DOI: [10.1007/s11433-017-9107-5](https://doi.org/10.1007/s11433-017-9107-5).
  - 14 An Z H, Antier S, Bi X Z, *et al.* Insight-HXMT and GECAM-C observations of the brightest-of-all-time GRB 221009A[EB/OL]. (2023-03-03) [2023-03-18]. <https://arxiv.org/abs/2303.01203>.
  - 15 Liu S A, Qin G J, Li J S, *et al.* Overall design of fine guidance sensor in attitude determination for the SVOM satellite[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, **2220**(1): 012010. DOI: [10.1088/1742-6596/2220/1/012010](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2220/1/012010).
  - 16 Li X F, Liu C Z, Chang Z, *et al.* Ground-based calibration and characterization of the HE detectors for Insight-HXMT[J]. Journal of High Energy Astrophysics, 2019, **24**: 6 - 14. DOI: [10.1016/j.jheap.2019.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jheap.2019.09.003).
  - 17 Wen X, Sun J C, He J A, *et al.* Calibration study of the Gamma-Ray Monitor onboard the SVOM satellite[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **1003**: 165301. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165301](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165301).
  - 18 Xiao S, Liu Y Q, Peng W X, *et al.* On-ground and on-orbit time calibrations of GECAM[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022, **511**(1): 964 - 971. DOI: [10.1093/mnras/stac085](https://doi.org/10.1093/mnras/stac085).
  - 19 Liu H R, Wu J J, Liang J C, *et al.* LEGe detector intrinsic efficiency calibration for parallel incident photons[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2016, **109**: 551 - 554. DOI: [10.1016/j.apradiso.2015.11.102](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.11.102).