

# ASO-S卫星HXI量能器探测单元的标定\*

黄永益<sup>1,2,3†</sup> 马涛<sup>1,2</sup> 张永强<sup>1,2</sup> 张岩<sup>1,2</sup> 张哲<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210023)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 先进天基太阳天文台卫星(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)是中国科学院第2批空间科学先导专项之一,其主要目标是同时观测太阳磁场、耀斑和日冕物质抛射,并对三者之间的相互关系和内在联系进行研究.硬X射线成像仪(HXI)是ASO-S卫星的3大载荷之一,它通过对太阳活动发射的硬X射线进行傅里叶调制成像,实现高空间分辨率和高时间分辨率的太阳能谱成像观测.量能器单机是HXI的关键单机之一,其主要任务是精准测量通过每对光栅后太阳硬X射线的能量和通量.主要介绍了量能器单机的工作原理及其关键指标要求、标定设备及标定方案,最后给出了标定结果,从而验证了量能器单机方案设计的合理性.

**关键词** 宇宙学: 太阳物理, 仪器: 硬X射线成像仪, 仪器: 量能器, 技术: 标定

**中图分类号**: P111; **文献标识码**: A

## 1 引言

认识太阳内部结构和太阳周期性产生磁场的物理机制,一直是太阳物理研究的主要科学目标.全面理解太阳磁场的起源、磁场周期性变化的物理本质以及产生的各种动力学现象,有助于预测空间环境的变化及其对人类社会的影响.太阳耀斑和日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)是太阳系中最强的爆发和粒子加速器,正是它们创造了极端的空间天气,它们也是理解宇宙中类似爆发的极好样本.全面掌握耀斑和CME的发生、演化及其对日地空间造成的影响,都具有重要的科学和社会意义.因此,观测和研究太阳磁场、太阳耀斑和CME三者之间的关系,就显得特别重要,是当今太阳物理最前沿的研究领域<sup>[1-5]</sup>.

为了尽早改变我国没有太阳探测卫星的局面,提出“先进天基太阳天文台”,定位于太阳活动25周峰年(预期极大在2025年左右)的“一磁两暴”即太阳磁场、太阳耀斑和CME的同时观测,来推进三者之间关系的研究,具有相当的独特性和可行性.太阳硬X射线成像仪(Solar Hard X-ray Imager, HXI)即为先进天基太阳天文台卫星(Advanced

2020-02-03收到原稿, 2020-03-13收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11873020、U1738121),中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA15010 200)资助

†huangyy@pmo.ac.cn

Space-based Solar Observatory, ASO-S)上主要负责在硬X射线波段进行耀斑探测的载荷. 通过成像、能谱和时间连续探测, HXI可以同时获得耀斑发生的位置形状、辐射强度以及时间演化等丰富特征信息, 对于研究耀斑的加速机制、确定加速源区的位置和范围、了解加速粒子的传输机制、比较耀斑加速源区和粒子作用区能谱的区别等多个方面都具有重要的科学意义<sup>[2-3]</sup>.

HXI分系统由准直器、量能器和电控箱3台单机组成(示意图见图1)<sup>[2-3]</sup>. 准直器实现对入射硬X射线光子的调制, 同时具备测量光轴与太阳中心位置的信息; 量能器实现对通过准直器调制后的硬X射线光子进行能量和计数的测量, 并能实现根据设定的参数进行能谱的累积; 电控箱实现准直器和量能器的供电、科学数据接收、遥控遥测数据传输等功能.

量能器单机由99个独立探测单元、4块高压扇出板(HVD)、4块前端电子学板(FEE)及配套的碳纤维结构和屏蔽板组成, 具体组成结构如图2所示<sup>[2-3]</sup>.

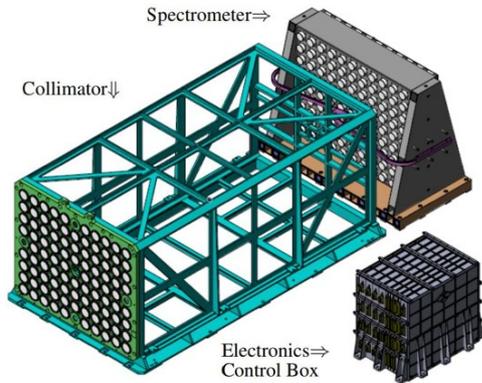


图 1 HXI分系统组成图

Fig. 1 Schematic drawing of the HXI payload

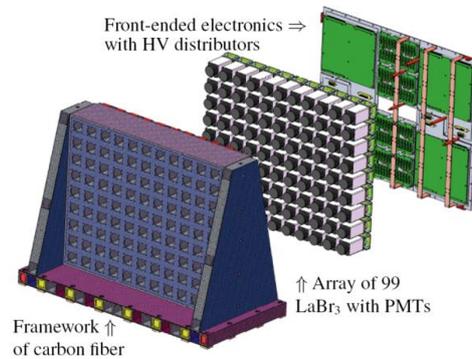


图 2 量能器组成图

Fig. 2 Schematic drawing of the spectrometer

量能器的主要功能是对经过准直器调制的太阳硬X射线光子进行流量和能量的测量, 量能器探测单元中的溴化镧晶体将X射线光子转化为荧光光子, 并经过光电倍增管转化为电荷信号; FEE板则完成电荷信号的前置放大和数字化, 并在给定的时间内进行能谱累积、事例计数和触发阈值记录; HVD板负责将高压供电提供给多个探测单元的光电倍增管, 并在光电倍增管发生短路故障时提供限流保护. 量能器单机主要性能要求如下: (1)观测能段30–200 keV; (2)能量分辨优于27%@30 keV; (3)各探测单元差异性在 $\pm 20\%$  (最大/最小, 以光电管输出信号为准)之内. 为了验证量能器单机的设计正确性, 需要对量能器的主要性能指标进行标定. 由于量能器单机由99个探测单元组成, 要逐个进行性能标定, 会花费大量的时间成本和资金成本, 在有限的预算范围内, 为了满足卫星进度, 我们采取了随机抽样4只独立的探测单元进行性能指标的标定. 本文主要介绍了我们的标定试验设备、标定试验方案和标定结果, 进而验证量能器单机的主要性能指标是否满足设计要求, 同时证明实验方案可行性, 为ASO-S卫星正样研制打下基础.

## 2 试验设备及方案

### 2.1 单个探测单元组成

HXI探测X射线的能段范围为30–200 keV, 它的能量分辨率要求也高, 我们选择了光产额大、能量分辨率高、温度稳定性好的溴化镧作为探测晶体, 并选用高量子效率的光电倍增管作为晶体荧光的读出器件. 量能器的单个探测单元由一个尺寸为 $\Phi 25 \times 25$  mm溴化镧晶体和一只型号为R1924A-100、直径为 $\Phi 25$  mm的高量子效率光电倍增管组成, 组成示意图如图3所示.

### 2.2 单能X射线地面标定装置

单能X射线地面标定装置由光源、准直器、双晶单色器及高纯锗探测器(High Purity Germanium detector, HPGe)组成, 其结构组成图如图4所示<sup>[6]</sup>, 它的性能指标详见表1. 光源是管电压为220 kV和600 kV的X射线光机, 稳定性好, 准直器由激光准直器、前后准直器管组成, 激光准直器用来调节光路, 前后准直器管用来准直X射线束流, 使出射的束流达到平行; 双晶单色器由两块硅晶体、T结构及微调平台组成, T结构用来调整两块硅晶体的平行度来满足布拉格衍射的条件, 通过微调平台改变布拉格入射角可以使X光机产生的连续X射线变成不同能量的单能X射线.



图3 探测单元组成图

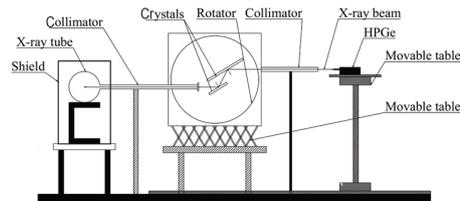


图4 单能X射线地面标定装置

Fig. 3 Schematic drawing of a single detector unit Fig. 4 Calibration device of single-energy X-ray on ground

表1 单能X射线源性能参数

Table 1 Performance parameters of the single-energy X-ray source

No Project	Index
1 Energy range	20–150 keV
2 Ratio of monochromatic light	>95%
3 Stability	The variation of monochromatic light <1%@1 h The variation of ratio of monochromatic light <0.11%@1 h
4 Beam diameter	>2 mm

### 2.3 标定实验方案

在双晶标定装置的后端, 搭建有一个全方位精密移动平台, 可以根据试验需求随意调整试验设备的位置和方向. 在平台上面安装了HPGe和我们的4个探测单元(相对HPGe的位置是固定的), 高纯锗探测器具有极高的能量分辨率, 被认为是核素分析的黄金标准, 在很多检测领域成为规定的标准检测设备<sup>[7]</sup>. 为了精确知道单能X射线的能量及流量大小, 我们使用经过标准放射源标定过的高纯锗探测器作为标准探测器, 每一个单能的X射线源首先要经过高纯锗探测器进行测量, 作为我们探测单元的参照标准, 从而对探测单元性能指标进行标定. 由于束流设备的局限性, 能量测试范围只能在30–150 keV, 在此之间我们设置了相应的测试能量点: 30 keV、40 keV、50 keV、60 keV、70 keV、80 keV、90 keV、105 keV、125 keV和150 keV共10个点. 由于双晶调制的难度大, 实际调制出来的能量与我们预先设置的点有些偏差, 调制的能量在所设置的能量范围内不会影响实验结果, 因此按照双晶实际调制出来的10个能量点30.6 keV、40.7 keV、50.9 keV、60.7 keV、68.1 keV、79.7 keV、93.1 keV、104.4 keV、125.5 keV、150.5 keV进行试验.

### 2.4 实验流程

试验开始: (1) X光机流量强度和稳定性测试; (2) 安装HPGe和4个探测单元于试验平台上; (3) 按照预定的能量点调制单能X光; (4) 用高纯锗探测器进行单能X射线的能量和本底进行测试; (5) 探测单元逐个对单能X光的能量和本底进行测试; (6) 下一个能量点的单能X光调试, 在所有试验需要的能点测试完成之前重复(3)–(6)的步骤; (7) 实验结束, 流程图如图5所示.

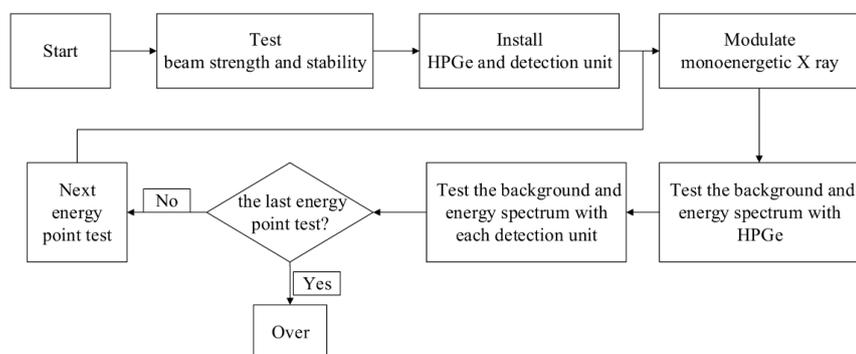


图5 实验流程图

Fig. 5 Flow charts of the test

### 2.5 能谱获得方法

经过双晶调制出来的单能X射线束流是一个包含本底在内的混合能谱(如图6的绿色部分), 为了得到实验想要的能谱, 在混合谱采集完之后微调一个双晶角度避开峰值, 测得相应的本底谱(图6蓝色部分), 用混合谱减去本底谱的方式得到单能X射线能谱(图6红色部分).

### 3 实验及结果

#### 3.1 束流稳定性测试

由于标定结果是由探测单元的测试结果与高纯锗探测器的测试结果相比对, HPGe和4个探头不能同时进行测量, 只能依次进行测试. 这样每个测试单元和HPGe有一定的时间差, 为了确保实验结果的有效性, 束流就要有一定的稳定性. 因此只有在X光机的流量很稳定的情况下, 实验结果才有意义. 在开始标定试验之前, 我们对调制好的X射线源进行稳定性测量, 连续测量9个时间点, 每个点测量100 s. 测试结果如图7所示. 由下图可以看出: 双晶X光机的流量稳定性在 $\pm 0.3\%$ 以内, 可以满足试验要求.

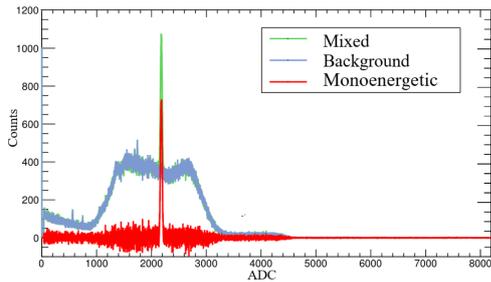


图6 蓝色为本底谱、绿色为混合谱、红色为扣除本底后的单能谱.

Fig. 6 The blue is the background spectrum, the green is the mixed spectrum, and the red is monoenergetic spectrum.

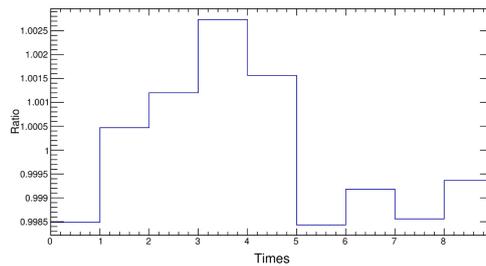


图7 束流稳定性测试结果

Fig. 7 Results of the beam stability test

#### 3.2 探测效率标定

探测效率是指在一定探测条件下测到的电离辐射粒子数, 与在同段时间内由辐射源发射出的该种粒子总数的比值. 探测效率有相对效率、绝对效率和实际效率之分. 相对探测效率(又称标称效率), 按美国国家标准/电气和电子工程师协会(ANSI/IEEEStd.325-1996)定义为: 将Co-60点源置于探测器端面正上方25 cm处, 对1.33 MeV能量峰, 半导体探测器与 $3'' \times 3''$  NaI探测器计数率的比值. 实际探测效率取决于能量谱、探测器的晶体及其尺寸、探测器的结构和源的相对位置等因素. 从X光机出来的单能光子的流量是未知的, 只有通过标定过的高纯锗探测器来测量, 我们认为高纯锗探测器测量的结果是束流的真实情况, 单个探测单元的探测效率由探测单元测得的粒子数除以高纯锗探测器的粒子计数得到, 因此本试验的探测效率是每个探测单元相对高纯锗的相对探测效率. 虽然这是个相对结果, 但误差满足我们的要求.

根据4个探测单元的单能谱, 并根据特征峰拟合得到标准偏差 $\sigma$ , 选择 $\pm 3\sigma$ 范围内的区域为单能峰计数区域, 得到单能峰计数, 并将4个探测单元的不同能量下的单能峰计数与标准探测器单能峰计数(高纯锗单能峰计数)的比值作为相对效率参数进行比较, 实验结果如图8所示(图中Simu表示的是模拟结果). 可以看到4个探测器的相对效率值的变化趋势与理论计算结果基本一致(图中红色曲线), 但4个探测器之间存在一定的差异性, 这些差异性主要由溴化镧晶体本身的差异性和晶体封装工艺导致的差异性造成, 探测单元的差异性详见表2所示(Simu栏表示的是模拟结果), 探测单元之间的相对差异性最大

值为18.9%@79.7 keV, 满足指标的要求.

表 2 相对效率及差异性  
Table 2 Relative detection efficiency and differences

Energy/keV	Detector unit1	Detector unit2	Detector unit3	Detector unit4	Simu	Differences
30.6	0.49898	0.49678	0.50750	0.51760	0.54136	4.19%
40.7	0.66467	0.61929	0.64488	0.66676	0.68697	7.67%
50.9	0.92422	0.86729	0.85786	0.88235	0.78722	7.74%
60.7	0.86799	0.95120	0.83124	0.86338	0.84195	14.44%
68.1	0.74802	0.77341	0.75589	0.74961	0.87684	3.39%
79.7	0.85975	0.84995	0.84484	1.00449	0.90512	18.90%
93.1	0.98264	1.11390	1.14925	1.15280	0.96791	17.32%
104.4	1.18610	1.19302	1.22384	1.22778	1.05710	2.24%
125.5	1.60260	1.55510	1.57260	1.77958	1.28570	14.44%
150.5	1.97061	1.92295	1.86051	1.96907	1.69520	5.92%

### 3.3 能量线性标定

根据试验设置的10个测试点进行能谱测量, 通过数据处理, 找出每个能谱峰位对应的能道数值(能道数用ADC值表示), 我们用ADC值与能量的线性关系来代表探测单元的能量线性. 4个探测单元的ADC值与能量线性如图9所示. 线性拟合的结果见表3所示(表中,  $E_n$ 代表能量, R-square表示拟合的优度), 每个探测单元的ADC与能量的线性度满足指标要求.

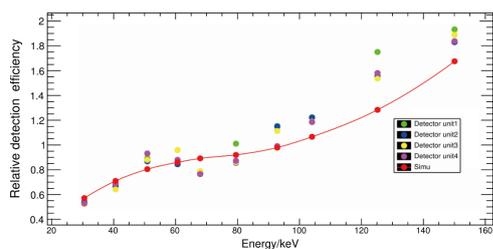


图 8 相对探测效率

Fig. 8 Relative detection efficiency

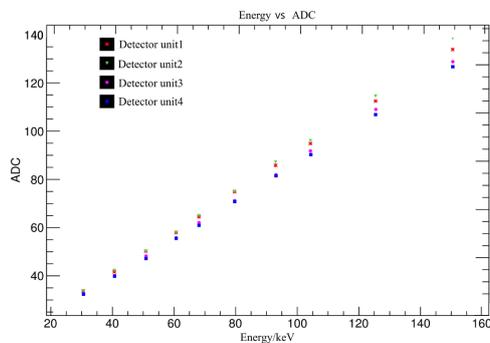


图 9 探测单元的能量相对ADC的线性关系

Fig. 9 Relation between the ADC and the detector unit energy

表 3 线性拟合结果  
Table 3 Results of linear fitting

Detector unit	Fitted linear equation	R-square
Detector unit1	$ADC = 0.836En + 7.804$	0.9999
Detector unit2	$ADC = 0.8699En + 6.233$	0.9993
Detector unit3	$ADC = 0.8026En + 7.648$	0.9997
Detector unit4	$ADC = 0.7876En + 6.904$	0.9998

### 3.4 能量分辨率

探测单元在30 keV的能量分辨率以30 keV单能谱的半高宽与能谱峰值的比值来表示. 4个探测单元在30.6 keV的能谱如图10所示(图例中前3项是实测曲线的参数; 后4项为模拟效果的参数), 计算4个探测单元的能量分辨率@30.6 keV分别为18.34%、18.36%、20.89%、20.14%, 满足指标优于27%@30 keV的要求.

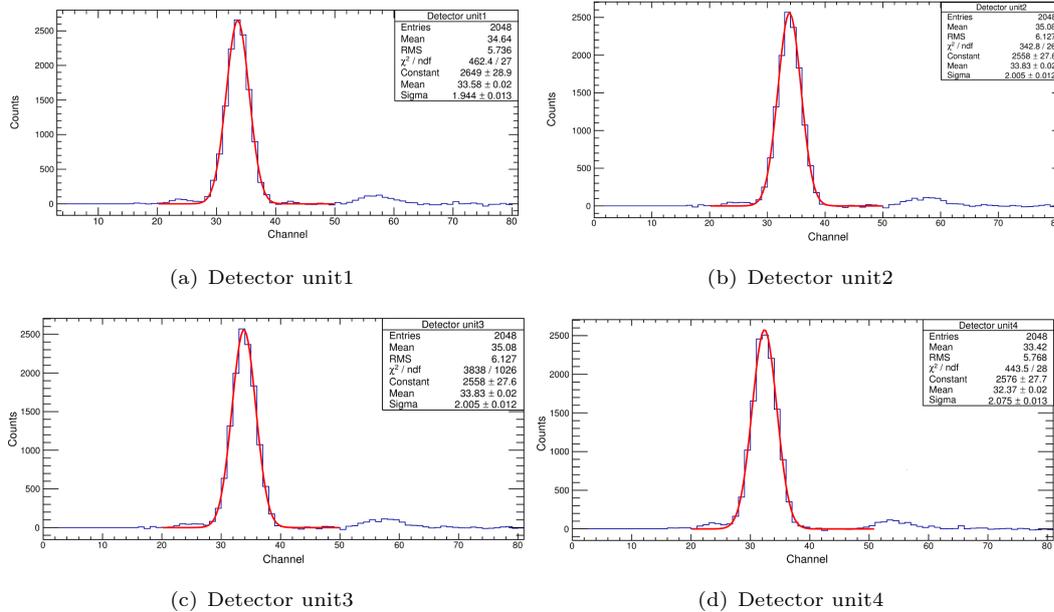


图 10 探测单元在30.6 keV的能谱

Fig. 10 Energy spectrum of detector units at 30.6 keV

## 4 总结

通过本次地面标定试验, 验证了ASO-S卫星HXI量能器探测单元的探测效率、能量线性、能量分辨率满足项目指标的需求, 进而验证了量能器单机设计方案的正确性, 间接证明了量能器选用的国产溴化镧晶体性能的优越性, 可以作为将来晶体选择的参考, 同时也验证了量能器的标定方案可行, 可以作为ASO-S卫星正样单机的标定方案.

## 参 考 文 献

- [1] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. RAA, 2019, 19: 156
- [2] Zhang Z, Chen D Y, Wu J, et al. RAA, 2019, 19: 160
- [3] Zhang Y, Guo J H, Zhang Z, et al. Nuclear Science and Techniques, 2019, 30: 128
- [4] Gan W Q, Fan Q L. ChJSS, 2018, 38: 662
- [5] Gan W Q, Huang Y, Yan Y H. SSPMA, 2012, 42: 1274
- [6] 侯懂杰, 吴金杰, 郭思明, 等. 计量学报, 2018, 39: 137
- [7] 梁爽, 何高魁, 郝晓勇. 核化学与放射化学, 2017, 39: 316

## Calibration of the Detector Units of the Spectrometer of the Hard X-ray Imager Payload Onboard the ASO-S Mission

HUANG Yong-yi<sup>1,2,3</sup>   MA Tao<sup>1,2</sup>   ZHANG Yong-qiang<sup>1,2</sup>   ZHANG Yan<sup>1,2</sup>  
ZHANG Zhe<sup>1,2</sup>

*(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)*  
*(2 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences,  
Nanjing 210023)*  
*(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)*

**ABSTRACT** The Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S) is one of the projects within the framework of the strategic priority program stage II (SPPII) on space science of the Chinese Academy of Sciences. The most important scientific goals of ASO-S are to study the relationships between the solar magnetic field, solar flares, and coronal mass ejections (CMEs). The Hard X-ray Imager (HXI) is one of the three payloads onboard ASO-S, it can obtain high spatial resolution and high cadence solar spectral imaging observations by Fourier modulation imaging of hard X-ray emitted by solar flares. The spectrometer is a core component of the HXI, whose main task is to precisely measure the energy and flux of solar hard X-ray passing through a grating pair. This paper presents the principle, key requirements, calibration equipment, and calibration scheme of the spectrometer. Finally, the calibration results are given to verify the correctness of the design of the spectrometer.

**Key words** cosmology: solar physics, instrumentation: Hard X-ray Imager (HXI), instrumentation: spectrometer, technology: calibration