

HXMT 卫星 X 射线标定装置和 标定实验

陈玉鹏 张 澍 王国峰 卢方军 谢亚宁 刘聪展 吴金杰
周 旭 李新乔 贾 飞 赵屹东

(中国科学院高能物理研究所 100049)

HXMT 卫星的建设是一个系统工程，既包括有效载荷的三个不同能量范围的 X 射线望远镜（见本专题 HXMT 各望远镜的介绍），又有为支撑其运行以及为实现其科学目标而建立的 HXMT 地面科学应用系统（见本专题“HXMT 卫星的观测规划与数据处理”的介绍），以及为测试 HXMT 各个载荷性能指标和能量标定的标定装置。

一、引言

在 X 射线天文卫星的数据中，任何天体参数的测量都依赖于 X 射线光子和望远镜的相互作用，望远镜的性能会反映在数据中。只有从这些数据中去除探测器对数据的影响，才能对科学数据解析出相应天体的辐射参数。若要去除探测器对数据的影响，就需要对探测器的性能进行精确的标定。连接数据和模型之间的桥梁就是标定数据。

当天体的辐射到达望远镜时，辐射将和探测器相互作用，探测器的测量信号是天体辐射和探测器响应函数的卷积，即： $F = R \otimes f$ ，其中， F 是探测器对天体辐射量 f 的测量结果， R 是探测器响应函数。要了解天体的辐射量 f ，需利用测量结果 F 和仪器响应函数

R 之间的上述关系反解以上方程（图 1）。因此，得到 f 之前需要得到精确的探测器响应函数 R 。探测器的标定即确定探测器响应函数 R 的过程。一般来说，探测器的响应可通过相关的物理模型来描述，因此，探测器的标定就是将仪器性能模型化，实验标定加模拟得到的物理模型可称为标定模型。

探测器的能量响应包括：

1. 探测效率（ARF）

对于聚焦型望远镜，例如欧洲多镜面 X 射线天文望远镜（XMM-Newton），探测效率主要包括反射镜的反射效率、屏蔽可见光的滤波片的透过率、半导体的量子效率。对于非聚焦型望远镜，例如美国罗西 X 射线时变探索者卫星（RXTE/PCA），探测效率则由上述后两项主导。

2. 能量响应（RMF）

X 射线不能被直接记录，而是通过和探测器的三种效应：光电效应、康普顿散射和电子对产生，产生次级电子间接被记录。X 射线能谱由全能峰、康普顿连续谱、反散射峰等组成。其中全能峰的能量即入射

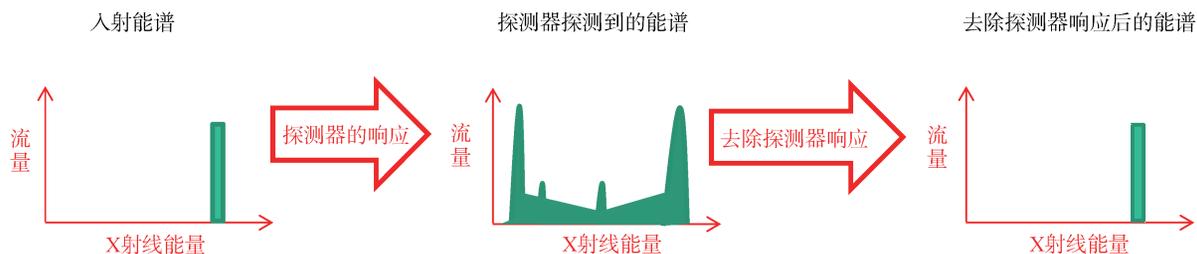


图 1 探测器响应示意图

X射线的能量；康普顿连续谱由康普顿效应形成，除了全能峰外，有些被散射的X射线光子逃出探测器，反冲电子被记录，其能量随散射角变化，可见康普顿谱是一个连续谱；由于康普顿效应，当散射角为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时，散射光子进入探测器再次被吸收，形成反散射峰，叠加在康普顿连续谱上。

二、标定需求

卫星有效载荷建造完成后需要对探测器能量与效率响应函数做地面标定，标定后的载荷在发射升空后，将再次利用标准X射线辐射源对其进行在轨标定工作。地面标定的优势是进入探测器的X射线是单能的，同时能量和流强已知，X射线的性能和外界本底在一定范围内可以实现人工控制；劣势是在地面上很难产生真实的空间天文环境，使得我们的一些标定项不能标定。同时，由于地面与在轨的外部环境差异很大，如温度、磁场、辐照、本底外界因素；卫星发射时的力学震动和卫星冲击等过程，会使卫星在轨后的自身性能发生变化，这也正是在轨标定的主要意义。

对于地面标定，X射线探测器和望远镜通常使用三种定标方法：放射源、同步辐射X射线源和X光机定标装置，对它们各自的特点分析如下：

1. 放射源

放射源是实验室中探测器测试和定标的常用设备。放射源发生各种衰变时会产生特定的辐射，其强度和半衰期精确可知，并且成本较低，体积小，使用方便。但放射源的流强相对较弱，可供使用放射源种类较少（即可用的能量点少），且能谱易受内部散射等影响。对于那些半衰期短的放射源，使用时间有限，需要经常购买。由于放射源的X射线不是单能的，不能进行能量响应的标定。一般利用放射源对探测器进行早期的测试和筛选。

2. 同步辐射X射线源

同步辐射X射线源是利用接近光速运动的电子在磁场的作用下加速、偏转，产生非常强的同步辐射。电子产生的原始同步辐射能谱是连续的，经过准直镜、单色器、聚焦镜和几十米长的光束线后具有极佳

的能量分辨率（半高全宽约可达 $10\text{eV}@30\text{keV}$ ）、极高的流强（可达 $\sim 10^{10}\text{cts/s}$ 以上）、极好的平行性（ $\sim 20''$ ），并且能量连续可调，是非常理想的定标光源。由于其电子流束、单色器反射销量等可精确测量，可用于探测效率的精确测量。单色性比较好，可对能量响应进行标定。国外X射线探测器普遍采用同步辐射光源作为标定的主要设施。作为国家级大科学装置的同步辐射加速器建造昂贵而数量有限，目前我国仅北京、合肥和上海有同步辐射装置；另一方面，同步辐射光非常依赖同步加速器的运行，可供定标使用的时间非常有限，然而，根据国外天文卫星的研制经验，卫星各个关键部件的测试定标一般需要半年以上的时间，这样，单纯依靠同步辐射X光源难以满足国内现阶段望远镜测试定标的时间需要；因此在同步辐射上定标的机会和时间是很受限制的。由于X射线望远镜的探测器是逐光子计数的，同步光流量太强远远超出探测器的探测响应。

3. X光机定标装置

X光机定标装置利用X射线管中电子轰击阳极靶的方法产生X射线辐射，其余单色器和光束线等与同步辐射X射线源类似。电子轰击靶材料时，不但电子受到原子核的库仑力减速而产生韧致辐射，而且靶原子受激发退激而发射特征X射线，也叫荧光X射线，因此这种方法产生的X射线的能谱是在韧致辐射连续谱上叠加靶元素的特征线（例如晶体单色器原理图中X射线连续谱）。使用滤光片（filter）或双晶体单色器（double crystal monochromator）可从连续谱中筛选出能量分辨较好的准单色光。其中采用滤光片产生的束线单色性较差，流量较强；采用双晶体单色器所产生的束线单色性较好，流量较低。这些准单色光经过装有狭缝准直系统的几十米长的光束线后照射到待定标探测器上，因而具有较好的平行性和单色性。定标光束的发散角和光斑大小可通过狭缝准直系统调节，能量范围和强度也可以通过射线管的管电压和管电流调节，因此X光机定标装置是做望远镜和探测器的定标有力工具。美国航空航天局（NASA）的XRCF（X-Ray Calibration Facility）、德国马普地外所（MPE）的PANTER和意大利国家天体物理研究所

(INAF) 的 XACT (The X-Ray Astronomy Calibration and Testing Facility) 和 Ferrara X 射线装置 (Ferrara X-ray Facility) 都属于这类设备。几乎所有的 X 射线天文望远镜都在这些设备上定标过。其中,除了意大利 INAF 的 XACT 采用滤波片外,其他三条束线均采用双晶体单色器。

X 光机定标装置是基于 X 光机的 X 射线定标设备,它使用 X 光机产生 X 射线,经过单色化、平行化,获得满足空间 X 射线探测器定标测试需求的 X 射线定标光束,它是空间 X 射线探测器以及 X 射线天文望远镜进行地面测试定标的基础设备。对空间 X 射线探测器及 X 射线望远镜物理性能(包括探测效率、能量响应、空间响应、死时间等)的地面测试定标是入轨观测前至关重要的工作,是望远镜获得可靠科学结果的基本保证。

HXMT 主要包括了三个载荷,覆盖了 1~250keV 的观测能区,其中高能望远镜(HE)的能量范围是 20~250keV,中能望远镜(ME)的能量范围是 5~30keV,低能望远镜(LE)的能量范围是 1~15keV,三个望远镜的观测能区相互重叠,在轨时可以实现仪器的交叉标定。

三、地面标定装置建设

在该标定装置的建设过程中,参考了国外该类设备的组成和主要设备的参数、供货商等,给出了该装置的建设方案。根据国外已有同类设备的经验,大型 X 射线标定束线(XRCF, PANTER)的低能段(<2 keV)采用光栅,高能段采用双晶体单色器。中型 X

射线标定束线(XACT, Ferrara)选择其中之一作为单色光产生器。我们建设的 X 射线标定装置采用类似与 PANTER 的方法,采用 X 光机加双晶体单色器。

(1) 基本原理

采用双晶体单色器(图 2),不同的晶体的晶格间距 d 不同,由于角度 θ (光束和晶体的夹角,为 0 时光束和晶体平行)不能取很大(光线接近垂直), θ 也不能取很小(第二块晶体要求很长)。

衍射晶体的布拉格角和出射能量的关系为 $2d \sin \theta = \lambda$,以 Si(111) 为例, $d=3.1356$ 埃,

$$E = \frac{12.4}{2 \times d \times \sin \theta} \text{keV}$$

一般说来, Si(111) 的最低能量可以到 3 keV (对应 40 度左右, 2keV 对应 80 度左右, 晶体近乎与光束垂直), 最高能量可达几十 keV (3 度对应 30 keV)。

由于出射光能谱范围较宽,一种晶体不能满足条件,所以采用两种晶格长度不同的晶体。例如采用 KAP(100) 和 Si(111) 晶体。其中 KAP(100) 的晶格间距为 $d=13.316$ 埃。

单色性主要由 X 射线光源的发散度(平行度)决定的(与同步光不同的是 X 光机的发散度较大):

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{\delta \theta}{\tan \theta}$$

(2) 实施方案

为满足 HXMT 卫星的高能 X 射线望远镜地面标定需求,建设了高能 X 射线标定装置(HXCF),为满足 HXMT 卫星的中能 X 射线望远镜和低能 X 射线望远镜地面标定需求,建设了中低能量 X 射线标定装置(LXCF)。

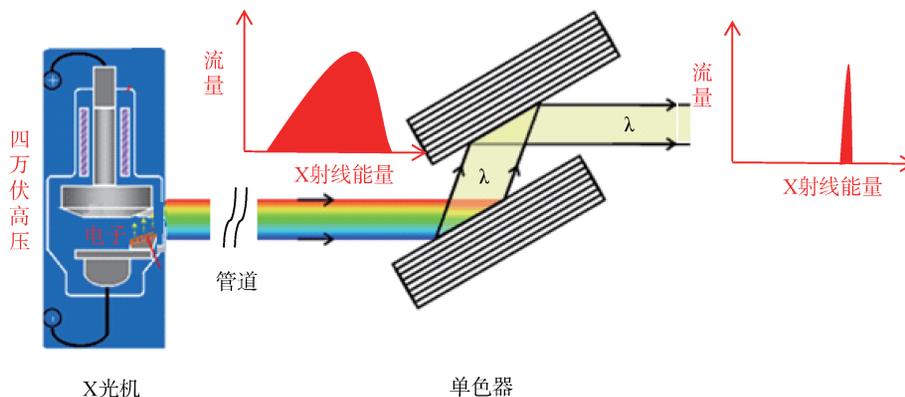


图 2 晶体单色器原理图

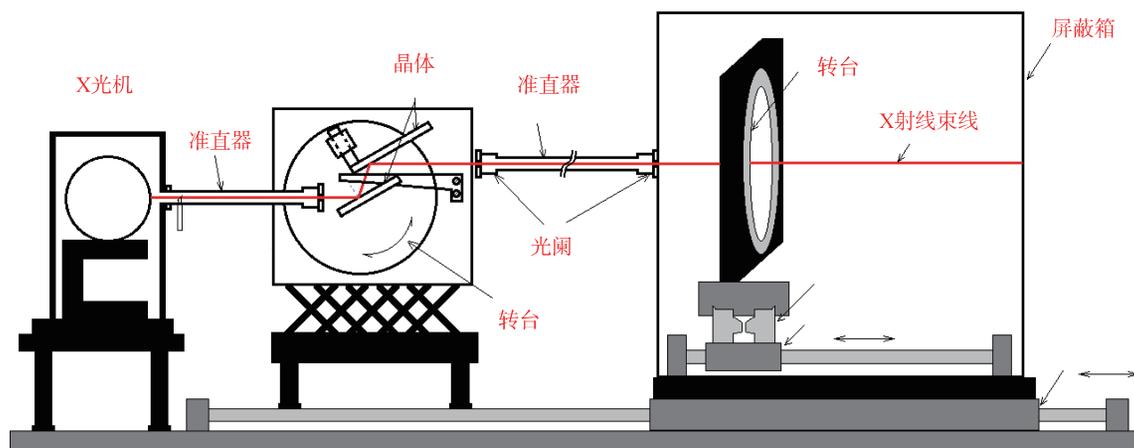


图3 HXCF的设计图

表1 国内外主要的X光机定标装置

束线 参数	XRCF/MSFC (美国)	PANTER/MPE (德国)	XACT/INAF (意大利)	Ferrara (意大利)	LXCF (中国)	HXCF (中国)
能量范围 (keV)	0.09 ~ 10	0.2 ~ 10	0.2 ~ 2	15 ~ 140	1 ~ 30	20 ~ 160
束线长度	500m	130m	35 m	~ 10m	~ 6m	~ 3.4m
靶室大小	22.9m*φ6m	12m*φ3.5m	3.5*φ2m	-	2m*φ2m	-
X光源功率	18kW	1kW 3kW	多阳极X光机 单阳极X光机	3kW	3kW	3kW
单色器	光栅 3&DCM	光栅 &DCM	光栅	DCM	DCM	DCM
单色性	<1%	~ 4%@1 ~ 10 keV		1.7%@17 keV	<1%@8 keV	<1%@60 keV
流强	10 ³ cts/s/cm ² @φ1.46m	>100cts/s/cm ² >2cts/cm ² (3m ²)	10 ⁵ cts/s	10 ~ 20 cts/s	~ 100cts/s/cm ²	10 ⁴ cts/s

高能 X 射线标定装置

HXCF 主要由 X 光机、光阑（准直器）、双晶体单色器（DCM）和探测器移动装置组成（设计见图 3）。耗资 100 万左右。

X 光机是产生 X 光的设备，主要由 X 光管、电源以及控制电路等组成。X 光管由阴极灯丝、阳极靶和真空管组成；电源分为高压电源和灯丝电源两部分。灯丝电源用于灯丝加热发射电子，高压电源的高压输出端分别夹在阴极灯丝和阳极靶两端，提供一个几万伏的高压电场使灯丝上活跃的电子加速流向阳极靶，形成一个高速的电子流，轰击阳极靶面后，由韧致辐射产生 X 射线。

单色器采用三对晶体，分别为 Si(111)，Si(220) 和 Si(551)，其晶格常数分别为 3.135 埃，1.920 埃和 0.76 埃。单色光能量范围为 20 ~ 160 keV。

为限制入射到单色器的 X 射线光束的发散角和

屏蔽 X 射线，在 X 光机和单色器之间放置了光阑。为防止散射的 X 射线对探测器产生影响，在实验中将探测器放在铅板密封的屏蔽箱内（建成后的 HXCF 见图 4）。

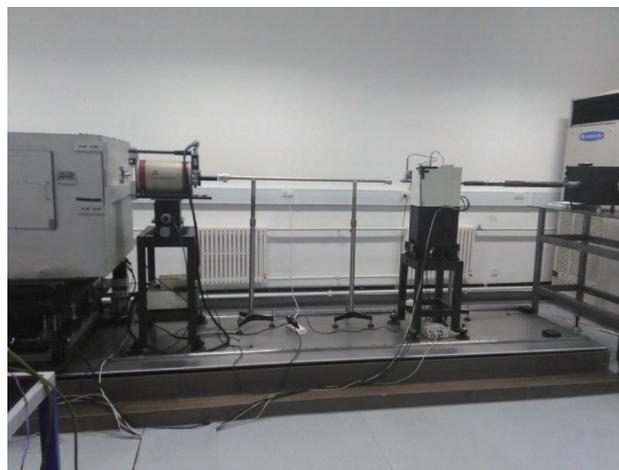


图4 HXCF的实物图

HXCF 采用 CdTe 探测器作为束流监视器，采用高纯锗探测器作为标准探测器。在实验中，我们测到的单色光束流的长期稳定性很差。三天内单色光流强减少 30% 以上，大大限制了标定时间和精度。意大利 Ferrara 标定束线也存在同样的问题。为此，我们对单色器的内部结构进行了优化，优化后 HXCF 的稳定性为：三天内，单色光流强变化率 1.01%。

中低能量 X 射线标定装置

LXCF 标定装置主要由束线、靶室、配套系统组成（设计见图 5）。该标定装置 2012 年初开始物理设计，经物理设计、需求分析、实施方案、安装调试阶段，与 2014 年 12 月完成验收实验，共三年，耗资~1000 万。由于 LXCF 工作能段较低，为减少空气对 X 射线的散射和吸收，该装置光路需真空环境（图 6）。

该标定装置的束线部分由 X 光机、DCM（双晶

体单色器）和真空管道组成，主要作用是产生 1~30keV 的单色光。其中 X 光机为开放式大功率 X 射线管和 Spellman 高压电源，最大功率 3kW。DCM 为可切换式双晶体单色器，内含 Si(111) 和 KAP 晶体各一对。束线采用干泵、分子泵和离子泵提供真空环境，管道中 X 光管部分真空度最好可达 7×10^{-7} Pa。

其中 X 光机的 X 光管为开放式，即出光口没有铍窗，保证了低能 X 射线的透过率。X 光管沿光束方向依次为：X 光管，刀口法兰， $\Phi 35$ 插板阀，刀口法兰。

X 光管结构特点：

1. 阴极（钨丝）位于 X 光管上部，通过快速法兰连接，可拆卸。
2. 窗口安装直径 $\Phi 35$ 插板阀，与真空系统连接。
3. X 光机覆 20mm 厚的钢板。
4. X 射线管底座配底角螺丝，固定在支架上。

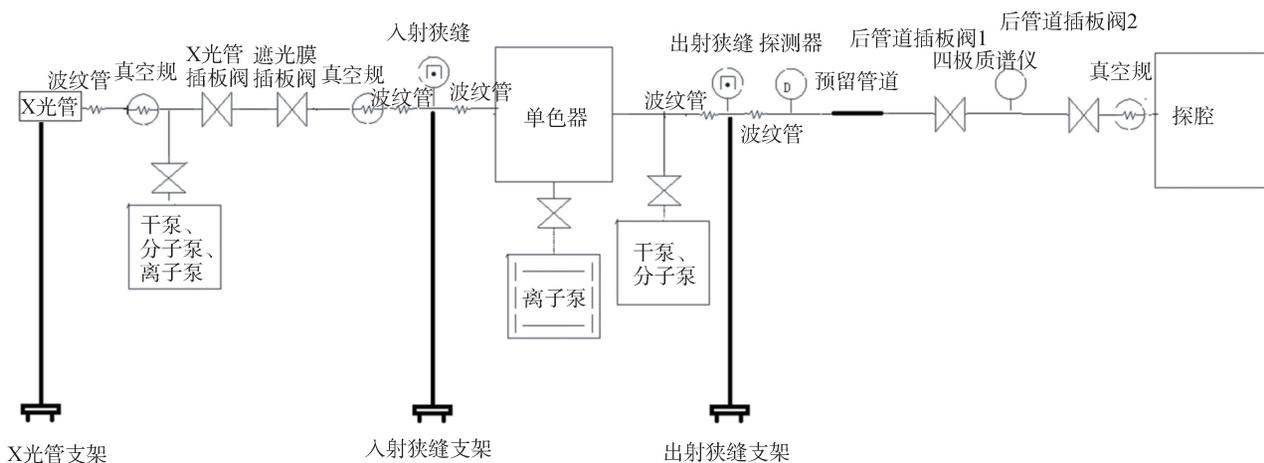


图 5 LXCF 设计图

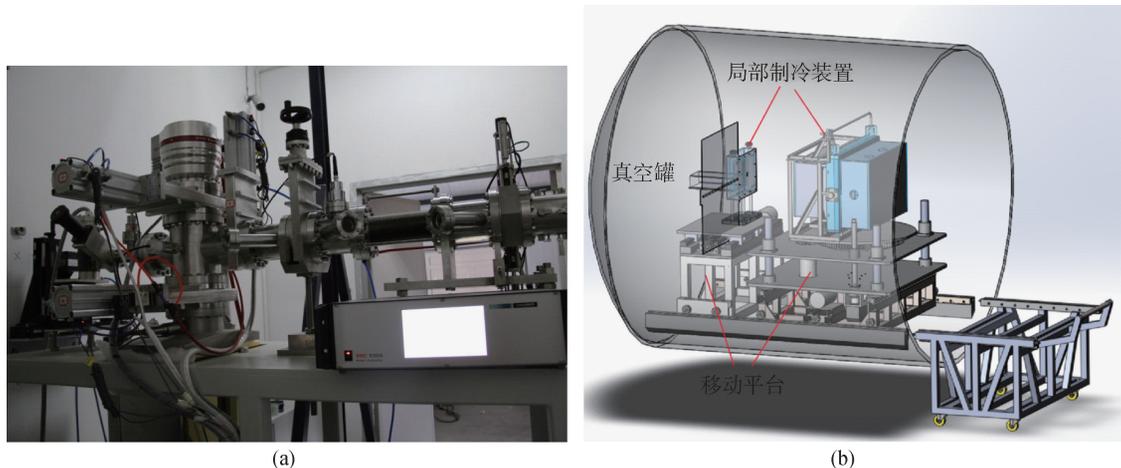


图 6 LXCF 实物图：（a）束线，（b）靶室示意图

5. 阳极水冷，水流速不小于 3 升 / 分钟。

X 光管电源采用 Spellman DF4 标准设备，两者通过克莱蒙德高压电缆转接头连接。

单色器为可切换式双晶体单色器，由于出射光谱范围较宽，一种不能满足条件，所以采用两种晶格长度不同的晶体：KAP (100) 和 Si (111) 晶体。

切换晶体方法：在不打开双晶体单色器的所在真空罐的基础上切换两对晶体，单色器真空罐两端分别有 200mm 长的波纹管，单色器真空罐固定在滑轨上，手动推动单色器真空罐实现对晶体的切换。

靶室由真空罐、移动平台和局部制冷装置组成，主要作用是给 LE 和 ME 提供真空（好于 1.3×10^{-3} Pa）、低温环境（室温至 -80°C ），承载 LE 和 ME 在真空罐内的移动。真空罐有效尺寸 $\Phi 2000 \times 2000\text{mm}$ ，采用干泵和低温泵实现真空，带载真空度好于 $1.3 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 。

配套设施主要由洁净间和除气罐（空间探测器除气设备）组成，其中洁净间标准为万级（局部千级），其中靶室和除气罐罐口开在洁净间内，为靶室和除气罐提供洁净环境；除气罐真空度好于 5×10^{-5} Pa，温度范围为室温至 100°C ，主要作用是给线缆等设备除气。

为保证望远镜探测器不受油污、灰尘等的污染，要求污染度为纳克量级。线缆等需在除气罐中除气后才能进入靶室真空罐，其他进靶室设备和器件也需清理后才能进入。除气罐和靶室中配备了监视污染度的石英晶体微量天平，束线中配置了残气分析仪用于实时分析真空管道稀薄气体各组分含量。

四、标定实验结果

在标定装置验收后，对 LE、ME 和 HE 利用束线对其探测器进行了能量响应的标定实验，实验结果表

明，LXCF 束流单色性（ $\sim 60\text{eV}@6\text{keV}$ ）优于德国 PANTER（ $\sim 140\text{eV}@6\text{keV}$ ），束流流量和 PANTER 相当（光斑内总计数最大均可达 10^4 cts/s）。HXCF 将单色光能量扩展至 160 keV，是目前为止，束流单色光能量最强的束线。

LE 和 ME 利用 LXCF 完成了其探测器在不同温度下（ -80°C 至常温）的能量响应的标定实验；在硅吸收坑附近给出了能量线性的标定，数据结果表明束线能量线性的偏差小于 0.1%；在两个能量点做了探测效率的标定。

HE 利用 HXCF 实现了标定期间 HE 主探测器的温度控制与监测；发现并协助解决了束流强长期稳定性差的问题，完成了主探测器鉴定件的能量响应和绝对探测效率的标定。

五、应用和发展前景

上述 X 射线标定装置（LXCF 和 HXCF）除了能满足 HXMT 有效载荷的标定需求外，还能对 1 ~ 160 keV 能量段的 X 射线探测器提供测试、标定服务。目前，陆续有探测器研制单位申请该装置的使用。同时也为建设中的一条 100 米长的标定装置提供经验参考。

为探索宇宙空间天体、宇宙的结构和演化，在空间科学发展中占有一席之地，国家制定了一系列的空间天文卫星探测计划，例如，“黑洞探针计划”，目标是研究宇宙天体的高能过程和黑洞物理；“天体号脉计划”，旨在理解各种天体的内部结构和剧烈活动过程；“天体肖像”计划主要项目有高分辨率 X 射线干涉望远镜以及干涉望远镜阵列，旨在获得太阳系外的恒星、行星、白矮星、中子星、黑洞等天体的“直接照片”。这些计划都包括一系列的 X 射线天文卫

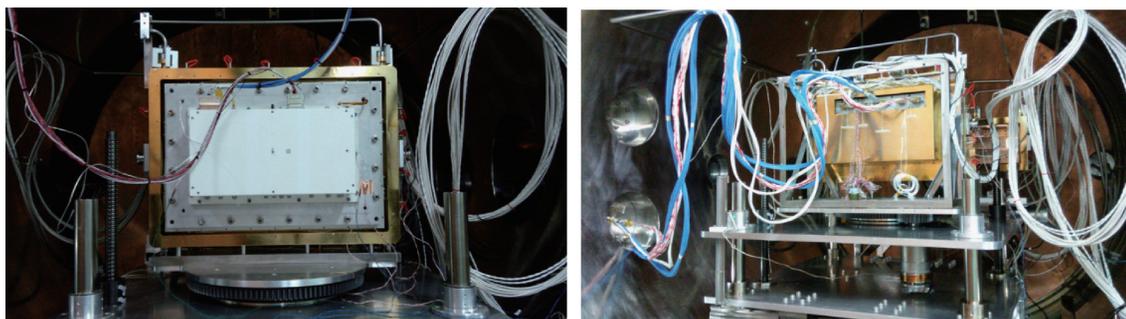


图 7 LE 和 ME 在 LXCF 靶室中

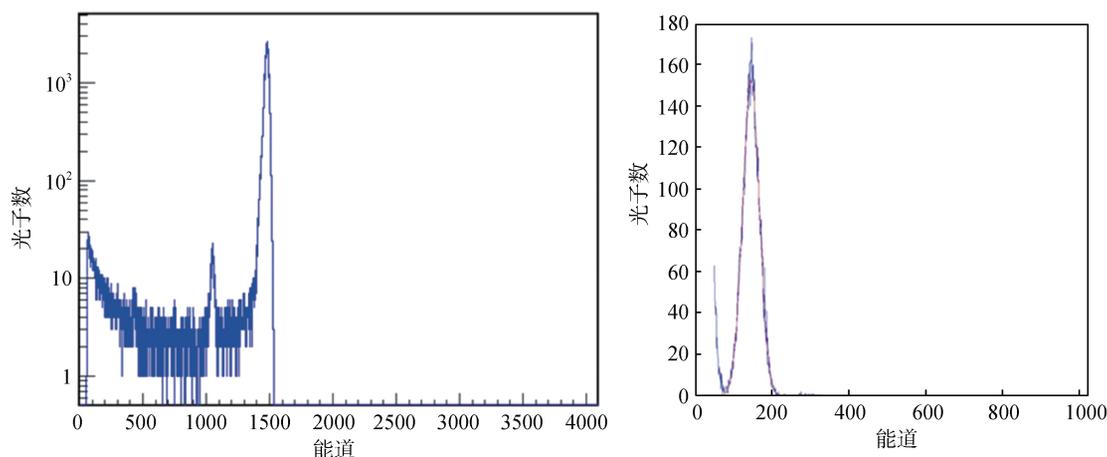


图 8 LE 在能量响应 (左) ME 在能量响应 (右)

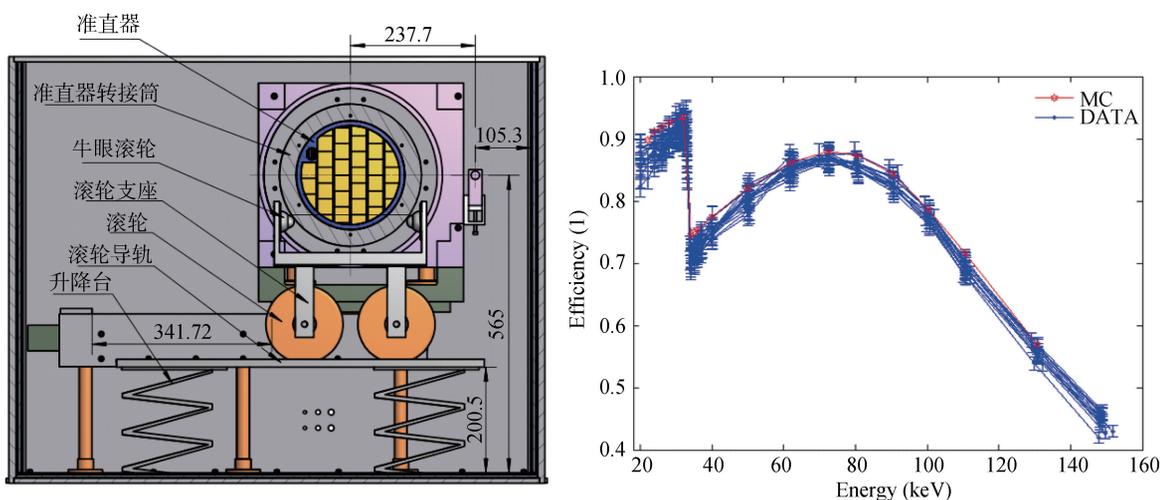


图 9 HE 在 HXCF 屏蔽腔示意图 (左) HE 实测探测效率曲线 (右)



图 10 100 米束线的光源部分 (18 kW 的 X 光机和单色器)

星, 例如, 属于“黑洞探针计划”的 X 射线时变与偏振望远镜 (eXTP) 卫星和“爱因斯坦探针” (Einstein Probe, 简称 EP) 卫星等则正处于立项之中。

目前一条 100 米长的标定装置正在中国科学院高能物理研究所建造过程中, 预算约为 3000 万元, 建

成后该装置体量将和德国 PANTER 相当。目前, 正在进行光源部分 (X 光机和单色器) 的设计和光路的调试工作。这条长的标定装置主要用于聚焦型望远镜的光学部分的测试和标定, 所以需要比中低能量 X 射线标定装置更长的真空管道来模拟平行的 X 射线光, 由于其光斑单位面积流量偏低, 靶室体积太大导致的真空抽取和放气时间太长、时间成本和电气成本较高, 中低能量 X 射线标定装置更适合探测器本身的标定测试工作。

上述 X 射线标定装置和这条 100 米长的标定装置的建成, 将为我国 X 射线探测器的研制、开发提供一个测试、标定的平台。这些 X 射线标定装置及其扩展版本将在我国未来 X 射线天文发展中发挥重要作用。