Draft version January 28, 2026 年使用 LaTeX 排版
默认样式，采用 AASTeX7.0.1

arXiv:2601.19188v1 [astro-ph.IM] 27 Jan 2026

# 连接同步辐射技术与空间天文学的电铸X射线光学器件研制

Ryuto Fujii ,[1] Koji Sakuta ,[1] Kazuki Ampuku ,[1] Yusuk Yoshida ,[1] Makoto Yoshihara ,[1] Ayumu Tak awa,[1] Keitoku Yoshihira,[1] Tetsuo Kano,[1] Naoki Ishida,[1] Noriyuki Narukage ,[2] Keisuke Tamura ,[3,4] Kikuko Miyata ,[5] Gota Yamaguchi ,[6] Hidekazu Takano ,[6] Yoshiki Kohmura ,[6] Shutaro Mohri,[7] Takehi Kume ,[8] Yusuke Matsuzawa ,[8] Yoichi Imamura ,[8] Takahiro Saito,[8] Kenta o Hiraguri ,[8] Hirok zu Hashizume ,[8] Hidekazu Mimura ,[6,9] and Ikuyuki Mitsuishi [1]

[1] *Graduate School of Science, Tokai National Higher Education and Research System, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya,Aichi 464-8602, Japan*
[2] *National Astronomical Observatory Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*[3] *NASA/GSFC, 8800 Greenbelt Rd, Greenbelt, MD 20771, US*[4] *Center for Space Sciences and Technology, University of Maryland, Baltimore County (UMBC), Baltimore, MD, 21250 USA*[5] *Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan*[6] *RIKEN/ SPring-8, 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan*[7] *School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan*[8] *Natsume Optical Corporation, 3461 Kamichyaya, Kanae, Iida, Nagano 395-0808, Japan*
[9] *Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8904, Japan*

## 摘要

我们采用自主研发的电铸复制技术制造了X射线望远镜镜面。该技术最初用于制造毫米级孔径、超短焦距纳米聚焦镜，并在同步辐射X射线显微术中得到应用。本文首次详细介绍了对一面直径60毫米、全周、双反射整体式电铸镍镜以及包含该镜的反射镜模块组件（MMA）所进行的X射线照射测试结果。实验在SPring-8光束线BL29XUL上进行，该光束线长1千米。为模拟来自天体源的平行X射线束，我们构建并使用了专用评估系统——高亮度X射线公里级大面积扩束评估系统（HBX-KLAEES）。得益于HBX-KLAEES提供的高光子通量、近似点状的光源以及极小的发散角，我们得以高保真度地评估成像性能，分辨出点扩散函数（PSF）的尖锐核心和大角度分量。结果表明，即使集成到MMA中，该镜仍具有极其尖锐的核心，其半高全宽（FWHM）为0.7角秒，半功率直径（HPD）为14角秒。此外，角分辨率与主镜段和次镜段的轴向面形误差均呈正相关，这表明轴向面形误差会导致成像劣化。基于这些成果，包含该镜的MMA被选为FOXSI-4探空火箭实验的硬X射线光学器件之一。该实验旨在对太阳耀斑进行高分辨率软硬X射线成像光谱观测，并已成功发射。这些结果为进一步提高角分辨率，以及开发适用于包括立方体卫星在内的小型卫星的高分辨率超短焦距X射线光学器件铺平了道路。

关键词： 高能天体物理学 (739)— 天文光学 (88) — 高角分辨率 (2167) — 太阳物理学 (1476)— X射线天文学 (1810)

电子邮箱：mitsuisi@u.phys.nagoya-u.ac.jp

## 1. 引言

自首次发现系外X射线源以来，针对与天体相关的高能现象开展的空间X射线观测——例如黑洞、恒星、超新星遗迹、星系、星系团以及宇宙大尺度结构——揭示了宇宙的动态本质。从仪器角度来看，爱因斯坦天文台利用聚焦型X射线光学系统实现了首次成像观测，这代表了X射线天文学发展史上的重要里程碑之一（例如，R. Giacconi 等, 1979年）。此后，X射线光学系统作为主镜搭载于许多气球、探空火箭和卫星上，在实现科学目标、开拓高能天体物理学新领域方面发挥了重要作用（例如，B. Aschenbach 1985； B. D. Christensen 2022年； B. J. Wilkes 等, 2022年）。

空间X射线光学器件的关键性能指标中，角分辨率和有效面积尤为重要。高角分辨率可对延展天体源进行精细成像，从而研究等离子体性质（如密度和温度）的空间分布。对于致密源，它可以减少拥挤场中邻近辐射的干扰——包括星团和银河系中心——从而获得质量更高的成像和光谱学结果。提高角分辨率还能通过抑制探测器噪声和弥散X射线背景来提升信噪比，进而提高探测灵敏度。在X射线天文学中，X射线光学系统的角分辨率通常用点扩散函数（PSF）的半高全宽（FWHM）和半功率直径（HPD）来表征。FWHM反映PSF核心的锐度，并表明分辨彼此间距较近的点源的能力。相比之下，HPD表示包围总通量50%的圆的直径，并考虑散射到相对较大角度的成分；这些成分与延展源的观测有关。

在X射线光学系统的研制过程中，人们探索了多种制造技术，例如玻璃抛光；使用镍、镍钴、铝或碳纤维增强塑料进行复制；以及多层膜涂层，包括基于原子层沉积（ALD）或溅射技术的深度渐变多层膜（即所谓的超镜）（例如，M. C.Weisskopf 2012； B. Aschenbach 2002； B. D. Ramseyet al. 2022； P. J. Serlemitsos et al. 2007； H. Awaki et al. 2022； K.-W. Chan et al.2013； H.Awaki et al. 2014）。此外，微孔光学系统和干涉测量方法等替代性光学设计也已得到发展（例如，I. Mitsuishi et al. 2010； M. Numazawa et al.2024； M. J. Collon et al.2015； W. W. Zhang et al. 2019； L. Li et al. 2024； S. Kitamoto et al. 2014； K. Asakura et al.2024）。尤其是对于大型天文卫星（例如钱德拉、XMM-牛顿和XRISM）搭载的大型X射线光学系统而言，其焦距通常要求达到数米或更长，直径达到数十厘米或更大。为满足这些独特的设计要求，专用制造技术已取得显著进展。同时，地面技术也常常是推动空间X射线光学器件发展的关键力量。

基于这些进展，我们着重研究电铸技术，以实现高角分辨率空间X射线光学器件，因为该技术能够制造双反射全周整体镜。与分段镜相比，这种反射镜既便于精确对准主级和次级，也便于沿周向对准各反射镜。此外，只要制备出高质量芯模，同一芯模便可重复使用，以较低成本制造多个反射镜。基于这些原因，我们采用了自主研发的电铸技术。该技术基于制造同步辐射X射线显微术所用超短焦距纳米聚焦反射镜的技术，并在此过程中不断改进。这类反射镜的孔径仅为毫米量级（例如，H. Mimura 等, 2018； T. Kume 等, 2019； Y. Takeo 等, 2020）。我们的电铸工艺采用非搅拌、室温沉积，其表面转移精度可达纳米级，适用于孔径为 ~10mm、焦距小于 100 mm 的小型反射镜。所制备的光学元件已达到近乎衍射极限的性能，其半高全宽光斑尺寸接近理论极限，这主要归功于较小的周向面形误差。

因此，我们将这一电铸工艺拓展至更大直径的望远镜镜面，以用于空间X射线光学器件。作为第一步，我们将直径从 10 mm 增至 60 mm，并优化了芯模的机械加工和抛光，以及电铸装置的设计与制造。在此前的研究中，我们成功地使用石英玻璃芯模制造了 Wolter-I型镜壳（G. Yamaguchi 等, 2020年； A. Ito 等, 2021； G. Yamaguchi 等, 2023年）。滞留气泡导致的凹坑形成一直是制造大直径电铸镍镜的一大障碍。为有效抑制凹坑形成，我们采用了真空脱气工艺，实现了无凹坑、高精度的复制。所得反射镜在轴向和周向的大部分区域内，面形误差均低于

1 $\mu$m。基于这些实测面形误差进行的光线追迹模拟预测，其半功率直径（HPD）约为 12 角秒（G. Yamaguchi 等，2023年）。

对于这项技术的首次应用，我们选择太阳作为观测目标。在这里，较小的有效面积可以接受，但出色的成像能力至关重要。聚焦光学X射线太阳成像仪（FOXSI）探空火箭实验是一项日本–美国合作任务，旨在通过全球首创的软硬X射线成像光谱学，研究日冕和耀斑中的热过程与非热过程（例如，S. Krucker etal.2013；S. Christe etal. 2016；Buitrago-Casas, Juan Camilo et al.2022；L. Glesener et al. 2023）。特别是，作为该系列第四次飞行任务的FOXSI-4，旨在实现FOXSI系列中最高的角分辨率，并首次对太阳耀斑进行高分辨率软硬X射线成像光谱观测。一旦建立起这类光学元件的制造框架，就将为实现超短焦距（~100毫米）高角分辨率X射线光学器件铺平道路。这是小型卫星任务（包括立方体卫星）的一项关键技术；如今，这些任务被视为空间科学领域潜在的颠覆性力量。

本文首次详细评估了采用我们的电铸工艺制造的直径60毫米、全周、双反射整体式镍镜的X射线性能，以及集成该反射镜的反射镜模块组件（MMA）的性能，重点关注其实现的角分辨率。我们还介绍了在SPring-8光束线BL29XUL搭建的专用评估系统，该系统用于详细的性能测试。本文结构如下：第2节介绍所制造的样品；第3节介绍X射线照射测试的实验装置、流程和结果；第4节探讨角分辨率退化的成因；第5节总结全文并给出结论。

本文所有数据分析均使用Python 3.9.22及标准科学软件包完成，包括Astropy 6.0.1（Astropy Collaboration等，2013，2018，2022年）、NumPy 1.26.4（C. R. Harris等，2020年）、SciPy 1.13.1（P. Virtanen等，2020年）、Matplotlib 3.9.4（J. D. Hunter，2007）以及pandas 2.2.3（T. pandasdevelopmentteam，2020年）。

## 2. 样品

本节介绍采用我们原创的电铸技术制造的X射线反射镜。该技术是在制造用于同步辐射X射线显微术的毫米孔径超短焦距纳聚焦镜的过程中建立起来的；本节还介绍了集成该反射镜的MMA结构。

*Mirror*—本研究设计并制造的Wolter-I 型反射镜具有以下参数：焦距为2 m，直径为60 mm，总有效长度为200 mm（主镜：102.5 mm；次镜：97.5 mm），入射角为0.21°，厚度为2 mm，质量为760 g。在这种掠入射光学构型中，X射线基本上会发生两次反射——首先由主镜（抛物面）反射，然后由次镜（双曲面）反射——从而形成图像。焦距定义为两个镜段交点到焦平面的距离。X 射线反射镜制造面临的最大技术挑战在于实现更大的直径。作为第一步，我们采用了直径为60 mm的反射镜，其尺寸约为此前原型的六倍。该几何结构的临界能量为16 千电子伏。主镜段和次镜段的高度经过确定，使得沿光轴入射、经主镜表面反射的光子随后能够由次镜表面反射，从而最大限度地提高有效面积。反射镜表面未施加任何涂层。这些设计参数综合考虑了太阳耀斑观测的科学需求和技术限制，在此类观测中，高角分辨率优先于有效面积。

*Mirror Module Assembly (MMA)*—MMA 由前孔径和后孔径、反射镜本身、反射镜支撑结构、探空火箭接口以及前后遮光器组成。其基本设计沿用了以往 FOXSI 任务采用的结构（S. Christe 等，2016年），除反射镜外，所有部件均由不锈钢制成。MMA 的设计能够承受探空火箭发射期间所受的机械载荷。在此设计中，反射镜仅由后孔径支撑，以保持其固有形状。孔径上有九根呈径向排列的辐条，每根辐条均设有凹槽，用于定位并通过黏合剂固定反射镜。焦距基准与火箭安装接口对齐。为防止杂散光未经反射直接到达探测器，安装了前后遮光器；其厚度经过选择，以确保在临界能量下具有足够的不透明度。在成功完成 X 射线性能评估（见下一节）后，该 MMA 被选为 FOXSI-4 探空火箭任务的硬X射线光学器件之一（K. Ampuku 等，2024），并配备覆盖 4 至 20 千电子伏能量范围的硬 X 射线焦平面探测器（S. Nagasawa 等

2025）。图1 展示了制成的电铸镜和MMA的照片，以及MMA的示意图。

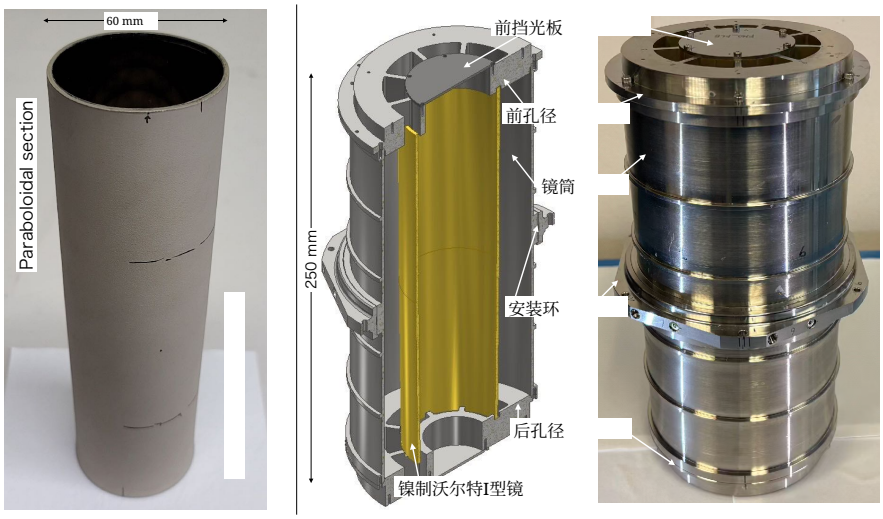


**图1**。 电铸X射线反射镜（左）、MMA设计示意图（中）和MMA照片（右）。

## 3. X射线照射测试

### 3.1. 实验装置

我们在同步辐射设施 SPring-8 开展了 X射线照射测试。在 SPring-8，电子被加速至高能，并在磁场作用下偏转，从而产生同步辐射，即高度准直且强度很高的 X射线。SPring-8 可将电子加速至最高 8 GeV，是全球少数能够提供极高亮度和单色性的第三代光源之一。与热电子轰击金属靶产生的常规荧光 X 射线和韧致辐射X射线相比，同步辐射具有远高得多的光谱纯度，并且能够灵活地进行能量选择。此外，光束极高的亮度和稳定性，使得即使对于有效面积较小的光学元件，也能在较短曝光时间内精确表征其核心和大角度散射分量。SPring-8 配备了 57 条光束线，覆盖从 170 eV 软X射线到最高 300 keV 硬X射线的宽广能谱范围，可根据不同实验目的选择最合适的光束线。

在本研究中，我们采用了BL29XUL（T. Ishikawa 等，2001；K. Tamasaku 等，2001），这是SPring-8中光路最长的光束线，长度约为1 km。如此长的光束线非常适合模拟来自无穷远处天体源的平行X射线，这对于空间X射线光学元件的高精度表征至关重要。该光束线的峰值能量约为10 keV，使用标准真空内波荡器和双晶单色器（DCM）时，可调谐能量范围为5–38 keV。第四实验站棚内实验装置的示意图如图2所示。X射线从左侧（上游侧）进入，依次通过真空管道–镜面样品–真空管道–探测器。为尽量减少空气散射，管道被抽空至略低于10 Pa的压力。在具有代表性的12 keV能量下进行测量；当与焦平面探测器结合使用时，该能量接近观测能段的中部。在此能量下，已确认空气散射对大角度分量的影响可以忽略不计。样品和探测器载台的坐标系定义如下：x轴沿光束方向（对应焦距方向），y轴为水平面内垂直于光束的方向，z轴为竖直方向。旋转角 $\theta_x$、 $\theta_y$和 $\theta_z$ 分别表示绕各自对应坐标轴的旋转。探测器安装在自动平移台上，可在y–z平面内移动；反射镜载台具有五个自由度：x、y、z、 $\theta_y$和 $\theta_z$。进行了两类测量：

1. 光斑扫描测试——通过沿反射镜表面扫描小面积光束，评估反射镜本身的局部成像性能。

2. 全照明测试——使用大面积扩展的X射线束照亮整个孔径，以评估MMA的整体成像性能。

以下小节将详细介绍各方法。

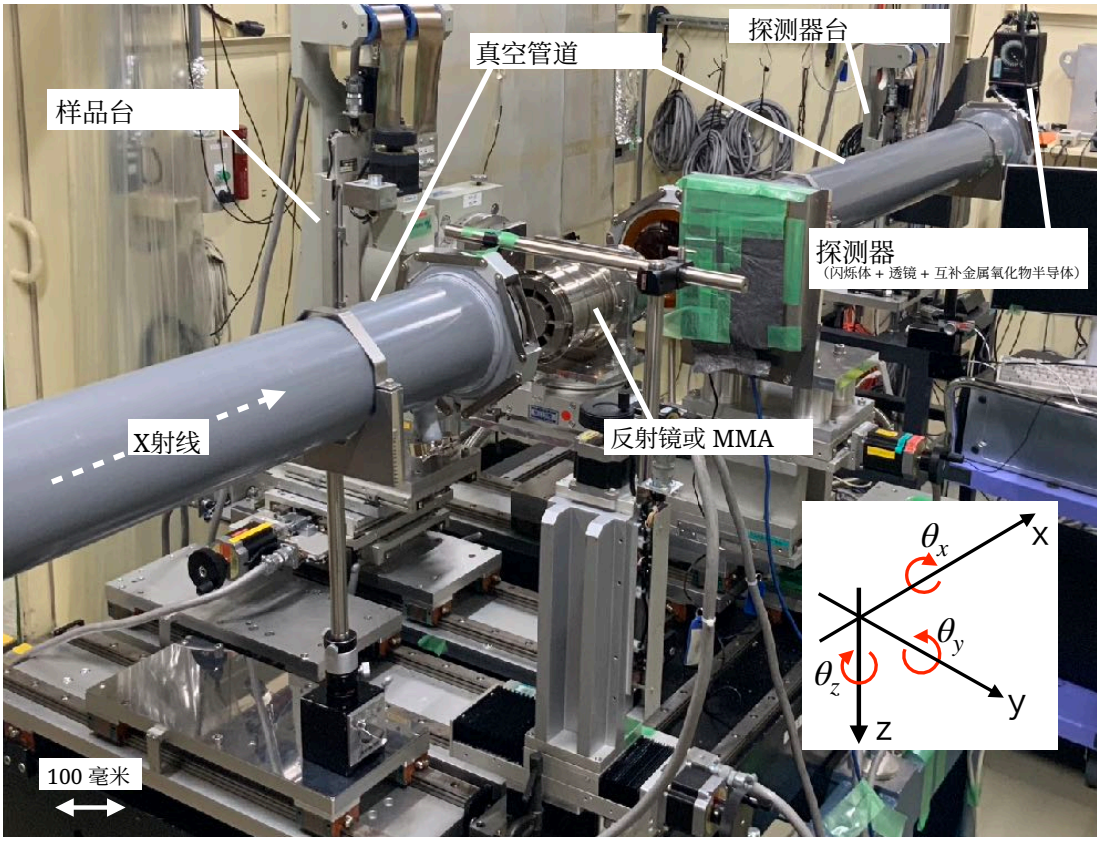


**图2.** SPring-8光束线BL29XUL第四实验站棚内的实验装置。箭头表示来自上游侧的入射X射线光子的方向。装置由真空管道、样品、样品台、探测器和探测器台组成。图中还定义了坐标轴。

### 3.2. 光斑扫描法

为评估反射镜局部角分辨率的空间依赖性，我们使用尺寸为5 × 5 毫米$^2$ 的X射线束，照射覆盖整个反射镜的40个位置。每次测量时，固定光束位置，同时同步平移反射镜和探测器载台，以保持二者相对对准。在每个位置，均在最佳焦点处采集图像。测得照射区域内的光束均匀性为10%（均方根）。

### 3.3. 全照明法 *(HBX-KLAEES)*

在日本X射线天文任务以往的地面评估中，有时会采用光栅扫描法评估光学元件的整体性能（例如，R. Shibata 等，2001；A. Itoh 等，2004；T. Hayashi 等，2015年；R. Iizuka 等，2018）。该方法通过小光束扫描孔径，再将各图像合并以重建完整图像。然而，对于高角分辨率光学器件，可达到的精度受各级之间同步精度的限制，因此不适用于角秒测量。为克服这一限制，我们在SPring-8光束线BL29XUL上开发并使用了一套专用系统——高亮度X射线公里级大面积扩束评估系统（HBX-KLAEES）。该系统旨在产生覆盖整个反射镜孔径的宽幅近准直光束，以模拟来自天体源的平行X射线。由于SPring-8的标准配置针对毫米级样品进行了优化，因此需要采用专门的光学布局

。我们在光束线上游引入了菲涅耳波带片（FZP），以产生虚拟点源。由于BL29XUL的传播距离为1 km，FZP发出的发散光束到达反射镜位置时实际上已变为平行光束，从而实现良好的准直，并使光束覆盖范围足以照亮整个孔径。FZP（环带材料：Au，环带厚度：1500 nm，直径：1 mm，最外环带宽度：1000 nm；Applied Nanotools Inc.，加拿大）位于距光源95 m处，并产生多个衍射级；使用了−1级（强度最高的发散分量）。在12 keV下，FZP的焦距为9.67 m。镜面样品位于距光源988 m处，对应的虚拟源至样品距离为904 m。实验测得 $+1$级光束的聚焦尺寸为 $23\ \mu$m（垂直方向）和 $44\ \mu$m（水平方向），在6 keV、焦距为4.8 m时的半高全宽值。预计−1级光束的聚焦尺寸相近；在我们的测量能量12 keV下，由于衍射的能量依赖性，这些数值预计将增大约一倍。因此，从样品处观察时，表观源尺寸仍足够小（$\sim$0.02 角秒），发散角也很小（$\sim$7 角秒）。这些条件使我们能够精确测量高角分辨率性能方面的轴上和离轴响应，以及有效面积、视场和焦深等基本特性。FZP孔径为1 mm，可产生理论直径为93 mm的光束，足以覆盖反射镜的60 mm孔径。我们确认，尽管实际光束轮廓受到管道弯曲和传输效应的轻微影响，仍能完全覆盖（$\sim 66$ mm直径）。为确保只有发散的−1级光束照射样品，在其焦点位置放置掩模，挡住会聚的 $+1$级分量；此外，还在样品正前方放置另一个掩模挡住直射光束。反射镜孔径处的光束均匀性约为20%（均方根）。HBX-KLAEES的概念示意图见图3。

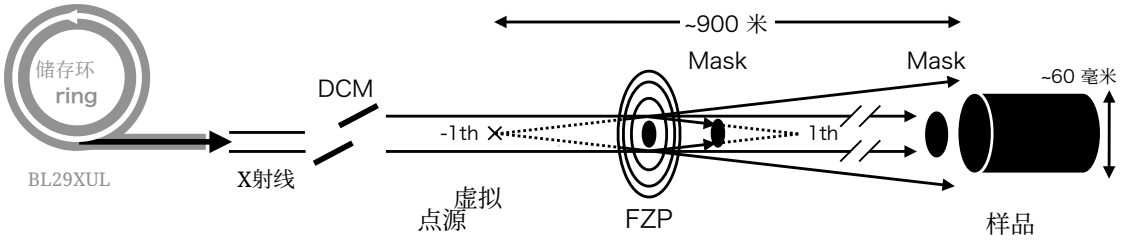


**图3**。 在SPring-8光束线BL29XUL上建成的高亮度X射线公里级大面积扩束评估系统（HBX-KLAEES）概念图。虚拟点源到样品的距离约为1公里，可实现高度准直的光束条件。

### 3.4. 探测器系统

成像探测器由日本滨松光子学制造的闪烁体耦合CMOS相机（间接转换系统）组成。闪烁体（LuAG: Ce，厚度为5-$\mu$米）与CMOS传感器之间的中继镜头可调节有效像素尺度。在点扫描测试中，使用ORCA-FLASH时，像素尺寸为6.5 $\mu$米，分辨率为 $2048 \times 2048$像素，对应的视场（FOV）为 $23 \times 23$ 角分$^2$。在全照明测试中，我们采用了更高分辨率的配置，使用ORCA-Quest，像素尺寸为4.5 $\mu$米，分辨率为 $2304 \times 4096$ 像素，视场为 $18 \times 32$ 角分$^2$。闪烁体直径为10毫米，决定了有效视场；这对应于约17角分的全视场。

## 4. 成像性能

### 4.1. 光轴对准与焦点调整

在评估角分辨率之前，仔细对准了样品的光轴和焦点位置。为对准光轴，改变样品的入射角，以找到有效面积最大的位置。随后，依次绕两个旋转轴 $\theta_y$ 和 $\theta_z$进行对准。测量有效面积的离轴依赖性，并通过拟合确定峰值位置。然后调整焦点位置。成像性能最佳的位置定义为最佳焦点。然而，对于 MMA，考虑到探空火箭集成过程中的安装精度，还进行了更精细的焦点扫描，并评估了焦深——即表观成像性能几乎保持不变的范围。测得的焦深

约为 3 mm，其中心位置定义为最佳焦点位置。两项测试中测得的最佳焦点距离均在测量不确定度范围内与设计值一致。

按照上述方法完成光轴和焦点位置的对准后，在以下条件下采集了图像序列。点扫描测试中，每帧曝光时间为 5 ms，共采集 200 张图像；全照明测试中，每帧曝光时间为 30 ms，共采集 1000 张图像。所有图像经背景扣除后进行叠加，生成一张合成图像用于分析。后续分析步骤见第 4.2节。

### 4.2. 分析与结果

完成上述对准和调焦步骤后，使用点扫描法和全照明法分别分析采集的图像，以评估反射镜和 MMA 的成像性能。为进行背景校正，在相同条件下关闭上游光束快门，采集一张暗场图像，并从受照图像中扣除该图像。此外，由于点扫描测试中的光子统计相对较低，还利用视场内无光源区域评估背景的短期变化，并将其纳入背景估算。由于全照明测试分析的图像区域较大，仅在该测试中进行热像素校正，将每个热像素替换为其周围像素的平均值。使用半高全宽和半功率直径指标评估角分辨率。通过提取以像素最大值为中心的径向强度分布获得点扩散函数，并对该分布进行积分和归一化，计算包围能量函数（EEF）。半功率直径定义为 EEF 达到 0.5 时所对应半径的两倍。分析时，谨慎设定提取半径，以排除绕过反射镜的直射 X 射线，以及由主镜段或次镜段单次反射产生的杂散光。下文将分别介绍点扫描测试和全照明测试的分析结果。

*Spot-scan Test of the Single Mirror*—完成上述对准和聚焦程序后，首先采用光斑扫描法对反射镜进行评估：将其置于 V形块支架上，以单镜配置进行测试，然后再集成到 MMA 中。在这项测试中，对反射镜圆周上的 40 个方位区域进行了评估。图4展示了这些测量获得的代表性图像、点扩散函数和包围能量函数。同步辐射测量实现的极高光子统计量提供了高质量数据，即使对于局部照明区域，也能检测到比点扩散函数核心低五个数量级以上的散射分量。两次独立测量所得点扩散函数和包围能量函数曲线的重复性均得到确认，分别优于 10% 和 1%（均方根）。所有位置测得的半高全宽值约为 3 角秒（4 个像素），表明核心极为锐利。然而，测得的半高全宽受到探测器像素尺寸的限制；因此，在全照明测试中采用更高放大倍率并进一步分析半高全宽，此时光轴已精确对准。本文重点关注各方位角位置测得的半功率直径值，汇总于表1 和图5中。半功率直径随方位角显著变化，约为 10 至 20 角秒，平均值约为 15 角秒。例如， $200^\circ$ 与 $250^\circ$ 之间的区域，其半功率直径约为 10 角秒，而靠近 $100^\circ$–$150^\circ$的区域则超过 20 角秒。

*Full-illumination Test for the MMA Using HBX-KLAEES*—图6 展示了使用 HBX-KLAEES 进行全照明测试所获得的图像、点扩散函数和包围能量函数。与光斑扫描法类似，得益于 SPring-8 光束线极高的光子通量，我们获得了高质量数据，其中包括低于点扩散函数峰值强度五个数量级以上的散射分量。点扩散函数和包围能量函数曲线的重复性分别在 20% 和 1%（均方根）以内得到确认。测得的半高全宽和半功率直径分别为 3 角秒（4 个像素）和 14 角秒。半功率直径值与此前计入实测面形误差的光线追迹模拟结果几乎一致（G. Yamaguchi 等，2023年）。与此前的 X 射线照明结果略有差异，这归因于早期研究中仅照亮了 MMA 的约一半，而非整个孔径，这表明差异源于位置相关效应（R. Fujii 2024）。由于测得的半高全宽仅依据少数几个探测器像素确定，因此受到相机分辨率的限制。为克服这一限制，我们将光学放大率从 $1\times$提高到 $20\times$，使有效像素尺寸从 4.6 $\mu$m（0.47 角秒）减小至 0.23 $\mu$m（0.023 角秒）。图7 展示了由此获得的高分辨率图像和点扩散函数。对点扩散函数进行了归一化，使其与在 $1\times$ 配置下获得的包围能量函数相匹配。在此条件下，测得的半高全宽达到 0.7 角秒（30 个像素），呈现出异常锐利的核心。这一结果归因于较小的方位面形误差，和/或反射镜采用整体式双反射镜结构制造，

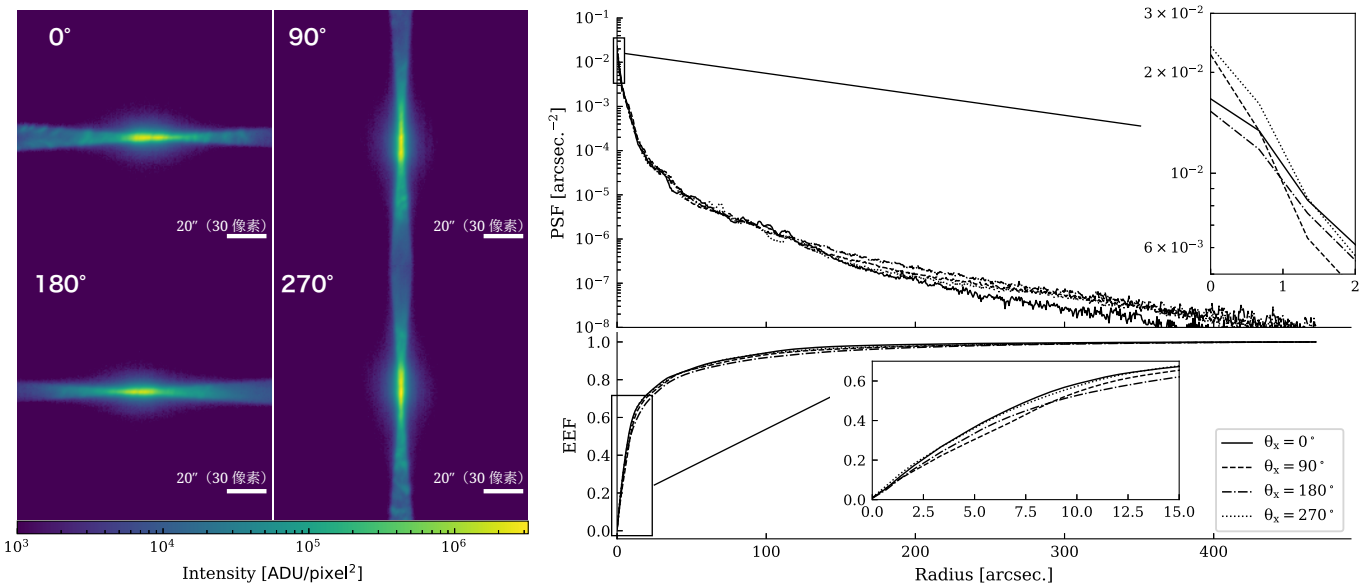


**图4**。左：使用光斑扫描法在 12 keV 下从反射镜局部照明区域获取的 X射线图像示例。图中显示相位角为 0°（左上）、 90°（右上）、 180°（左下）和 270°（右下）的图像。右：与左侧图像相同，但显示点扩散函数和包围能量函数曲线。

| 位置 [度] | HPD [角秒] | 斜率误差[a] [角秒] | 位置 [度] | HPD [角秒] | 斜率误差[a] [角秒] | 位置 [度] | HPD [角秒] | 斜率误差[a] [角秒] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| -5 - 4 | 16 | 2.2/2.9 | 125 - 132 | 18 | 1.5/2.2 | 245 - 255 | 9 | 1.0/1.1 |
| 4 - 14 | 14 | 1.6/2.4 | 132 - 138 | 14 | 1.7/2.2 | 255 - 265 | 13 | 1.2/1.3 |
| 14 - 24 | 12 | 1.7/1.7 | 138 - 144 | 14 | 1.8/2.1 | 265 - 274 | 16 | 1.4/1.6 |
| 24 - 35 | 12 | 1.7/1.2 | 144 - 155 | 16 | 1.7/1.9 | 274 - 284 | 14 | 1.5/1.7 |
| 35 - 41 | 14 | 1.7/1.9 | 155 - 165 | 14 | 1.4/1.7 | 284 - 294 | 14 | 1.4/1.7 |
| 41 - 48 | 14 | 1.7/2.1 | 165 - 175 | 14 | 1.1/1.4 | 294 - 305 | 17 | 1.3/2.1 |
| 48 - 54 | 16 | 1.6/1.9 | 175 - 184 | 18 | 0.9/1.2 | 305 - 311 | 16 | 1.1/2.3 |
| 54 - 65 | 13 | 1.4/1.9 | 184 - 194 | 13 | 0.8/1.3 | 311 - 318 | 16 | 1.2/2.4 |
| 65 - 75 | 12 | 1.1/1.8 | 194 - 204 | 10 | 0.9/1.3 | 318 - 324 | 17 | 1.2/2.7 |
| 75 - 85 | 16 | 0.8/1.7 | 204 - 215 | 9 | 0.9/1.1 | 324 - 335 | 16 | 1.1/2.9 |
| 85 - 94 | 18 | 1.2/1.9 | 215 - 222 | 9 | 0.8/1.1 | 335 - 345 | 14 | 1.1/3.0 |
| 94 - 104 | 17 | 1.4/2.0 | 222 - 228 | 9 | 0.8/1.2 | 345 - 355 | 14 | 1.4/3.0 |
| 104 - 114 | 18 | 1.5/2.3 | 228 - 234 | 9 | 0.8/1.2 | | | |
| 114 - 125 | 21 | 1.4/2.3 | 234 - 245 | 10 | 0.9/1.2 | | | |

[a]主镜/次镜段

**表1.** 点扫描测试期间反射镜上的照明位置、在 12 keV 下测得的角分辨率（半功率直径），以及各位置对应的斜率误差分布展宽。

从而避免了多个反射镜或镜段之间的失准。因此，预计 MMA 能够分辨明亮 X 射线发射区域中极精细的太阳结构。此外，HBX-KLAEES 对准确评估此类亚角秒半高全宽值至关重要。

鉴于此前的研究已确认该反射镜具有极高的圆度（G. Yamaguchi 等，2023年），我们将从40个光斑扫描位置获得的点扩散函数叠加在一起（假设其峰值像素位置对齐），所得包围能量函数显示半功率直径为15角秒，与全照明测试的结果在测量不确定度范围内一致。这表明，将反射镜集成到MMA中并未造成可测量的角分辨率下降。这些结果表明，我们已成功建立了反射镜制造、评估以及机械集成到MMA中的基础流程。

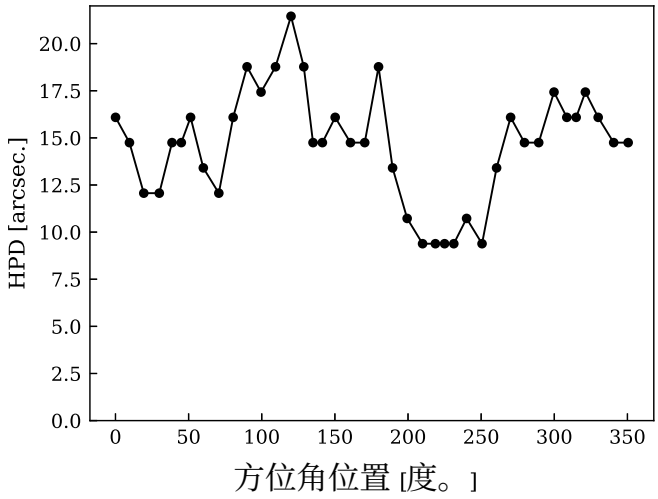


**图5**。 使用光斑扫描法在12 keV下测得的反射镜角分辨率（半功率直径）的方位角依赖性。

鉴于已展现的性能和工艺重复性，这项技术为实现用于未来天文任务的高角分辨率X射线光学器件，以及专为包括立方体卫星在内的小卫星应用设计的超短焦距系统，迈出了重要一步。此外，我们的X射线光学系统实现了比此前FOXSI系列搭载的系统更高的角分辨率，为下一代高能太阳观测树立了重要里程碑。

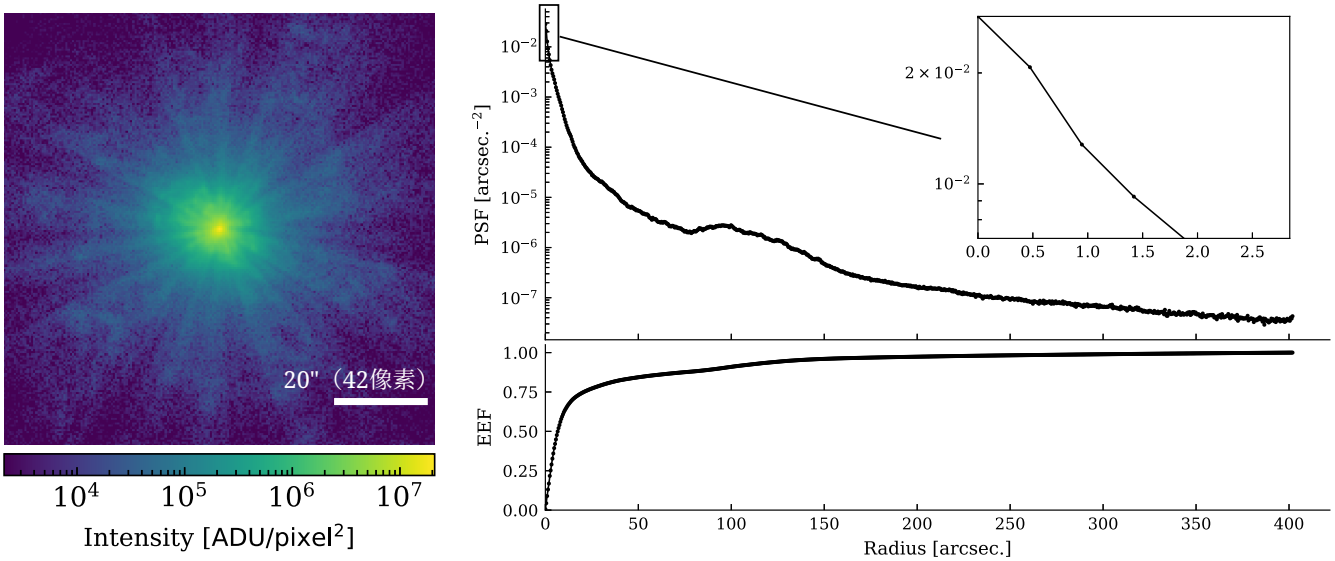


**图6**。 使用HBX-KLAEES在12 keV下获得的MMA全口径X射线图像。

## 5. 讨论

以往任务中，X射线光学系统的角分辨率退化通常至少部分归因于反射镜表面沿轴向的面形误差。通过检查根据测得的轴向面形误差轮廓得出的斜率误差直方图宽度，可以定量评估这种退化程度。本节研究通过点扫描测量获得的X射线性能与测得的反射镜表面轴向面形误差之间的相关性，以阐明角分辨率退化的一种可能原因。

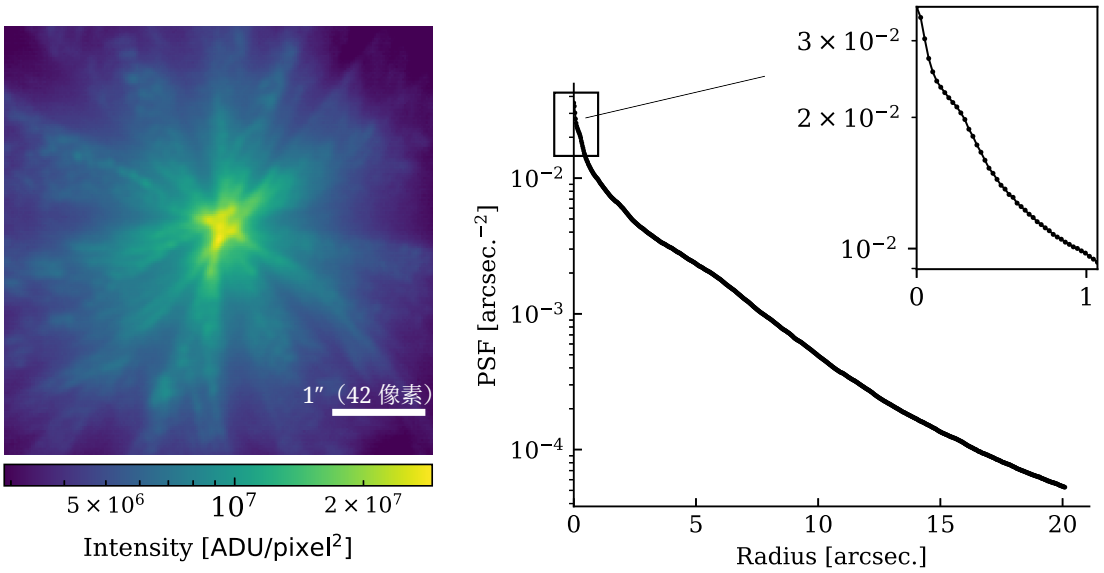


**图7**。 与图 6相同，但使用 20× 透镜放大率拍摄。

面形误差数据沿轴向的采样间距为 0.05 mm，沿方位角方向的采样间距为 1°（约 0.5 mm）(G. Yamaguchi 等, 2023年）。每个点扫描区域平均对应九个方位角数据点，这些数据点经过合并后用于生成该区域的斜率误差直方图。通过沿轴向对测得的面形误差数据求导，得到斜率误差曲线；随后应用 10 mm 的移动平均窗口（边缘处为 5 mm），以抑制高频噪声。受测量限制，分析中排除了顶部和底部各 10 mm 的区域，以及两端附近未抛光边界区域（各约 5 mm）。斜率误差曲线示例见图8 左侧。斜率误差幅度趋向于在两侧边缘增大，次镜段尤为明显；在超过 10 mm 的尺度上，观测到的偏差超过数十角秒。靠近 0° 的峰值结构可能由芯模表面缺陷造成。接下来，根据这些曲线生成斜率误差直方图，并将其宽度用作角偏差的指标。由于基线分量只会导致焦距偏移，因此在评估前将其扣除。为此，将斜率误差分布的中位数定义为基线。主镜段和次镜段的基线斜率误差分别为 0.13 角秒和 0.87 角秒，对应焦距缩短约 1.3 mm，小于焦深。随后采用相对于基线的绝对中位偏差作为斜率误差离散度的度量。结果汇总于表1 和图 8 右侧。主镜段和次镜段呈现相似趋势，但次镜段的整体数值较大。在 200°–250° 方位角区域附近测得的离散度最小（主镜段为 0.8 角秒，次镜段为 1.7 角秒），而在 0°附近，最大值超过 3 角秒。主镜段与次镜段之间的斯皮尔曼秩相关系数为 0.49，表明二者呈正相关，这可能反映了复制应力或芯模表面形状等共同制造因素的影响。随后，我们比较了通过点扫描测试测得的半功率直径值的方位角依赖性，以及由轴向面形误差分析得出的斜率误差离散度的方位角依赖性。由于各段的斜率误差对双反射分量的贡献取决于其各自的表面轮廓，因此我们分别考察了每一段的相关性。如图 9所示，两个镜段的半功率直径与斜率误差宽度均呈正相关，主镜段和次镜段的斯皮尔曼系数分别为 0.34 和 0.63。次镜段相关性更强，归因于其斜率误差幅度通常较大。这些结果表明，反射镜的轴向面形误差至少在一定程度上导致了观测到的角分辨率退化。因此，提高轴向面形精度对于进一步提升未来电铸反射镜的角分辨率至关重要。

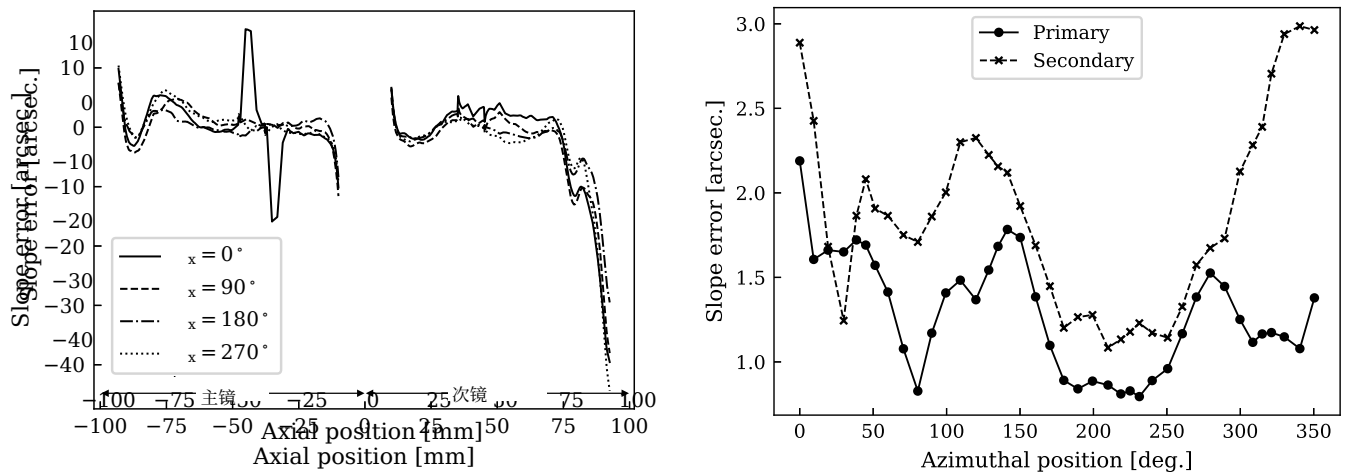


**图8.** 方位角为 0°、90°、180° 和 270° 时的斜率误差曲线示例（左），以及沿轴向方向的斜率误差分布展宽对方位角的依赖关系（右）。

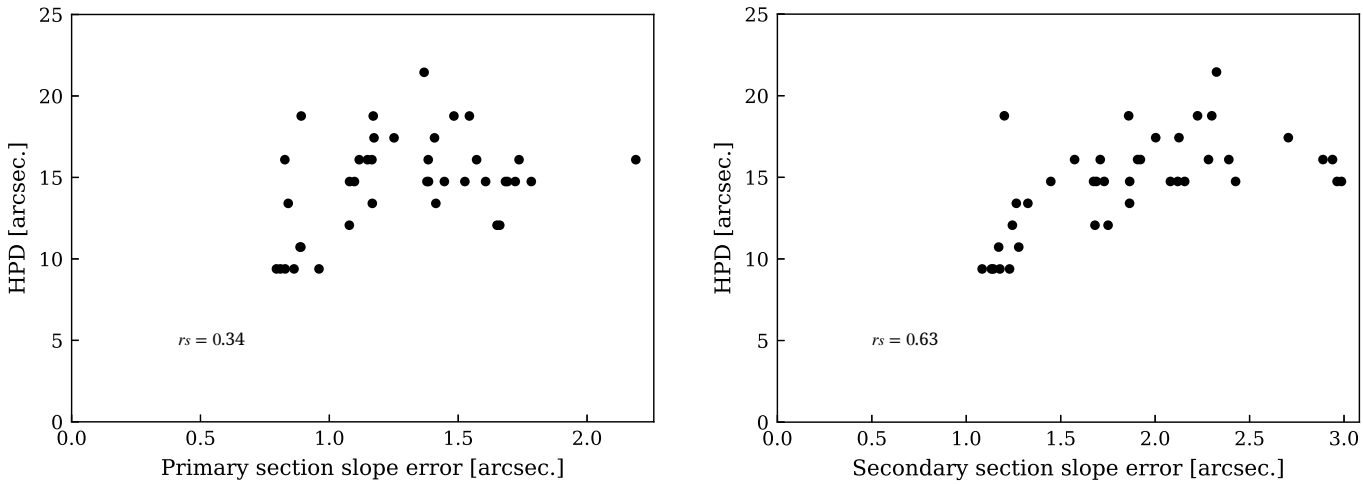


**图9.** 主镜段（左）和次镜段（右）的角分辨率与斜率误差分布展宽之间的相关性图。

## 6. 总结与结论

我们基于最初为同步辐射X射线显微术中使用的毫米孔径超短焦距纳米聚焦反射镜开发的电铸技术，研制出一种高精度、直径60毫米、全周双反射整体式电铸镍镜，用于空间X射线望远镜反射镜。我们对该反射镜作为单独反射镜以及集成到MMA之后的X射线性能进行了详细研究。

为准确表征此类高角分辨率光学器件，我们在SPring-8光束线BL29XUL建造了HBX-KLAEES，这是一套专用的、长达一公里的扩展光束评估系统。该系统可提供高亮度、近似点状且发散角极小的X射线源，使我们能够高保真地测量点扩散函数（PSF）的尖锐核心和大角度分量。使用HBX-KLAEES，MMA在12 keV下实现了0.7角秒（半高全宽）和14角秒（半功率直径）的角分辨率，表明集成过程保留了单个反射镜的固有性能。这些数值是FOXSI系列迄今实现的最高角分辨率。通过将X射线测试结果与测得的轴向面形误差数据进行比较，我们发现角分辨率与主镜段和次镜段的轴向斜率误差均呈正相关。这表明轴向面形精度是限制反射镜可实现分辨率的关键因素。

基于这些性能测试结果，采用该反射镜的MMA被选为FOXSI-4探空火箭任务的硬X射线光学器件之一，并随后成功发射。更广泛地说，电铸镜制造框架为未来空间任务的新一代高角分辨率X射线光学器件奠定了基础，也为适用于包括立方体卫星在内的小卫星平台的紧凑型超短焦距系统奠定了基础。

## 致谢

本研究获得日本学术振兴会（JSPS）科学研究费补助金（KAKENHI）资助，课题编号为JP22K18274和JP20K20920（IM）、JP23H00156（HM），以及JP22H00134和JP21KK0052（NN）。此外，本研究还获得JST SPRING（课题编号JPMJSP2125）以及宇宙科学研究所小规模项目计划的支持。本研究同时获得岩垂奖学财团（RF和MY）及横山奖学财团（RF）的资助。KA感谢服部国际奖学财团（HISF）的大力支持。KS和KA还感谢“THERS下一代研究人员新标准计划”提供的经费支持。

## 参考文献

Ampuku, K., Sakuta, K., Fujii, R., 等. 2024, 载于《2024年空间望远镜与仪器：从紫外到伽马射线》，编者 J.-W. A. den Herder、S. Nikzad 和 K.Nakazawa，第13093卷，光学与光电子仪器工程师学会（SPIE），1309323，doi: 10.1117/12.3018109Asakura, K., Hayashida, K., Yoneyama, T., 等. 2024，《天文望远镜、仪器与系统杂志》，10，045002，doi: 10.1117/1.JATIS.10.4.045002Aschenbach, B. 1985，《物理学进展报告》，48，579，doi: 10.1088/0034-4885/48/5/001Aschenbach, B. 2002，载于光学与光电子仪器工程师学会（SPIE）会议系列，第4496卷，《天文学X射线光学：望远镜、多层膜、光谱仪与任务》，编者 P. Gorenstein 和 R. B. Hoover，第8–22页，doi: 10.1117/12.454367Astropy Collaboration, Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., 等. 2013，《天文学与天体物理学》，558，A33，doi: 10.1051/0004-6361/201322068Astropy Collaboration, Price-Whelan, A. M., Sip˝ocz, B. M., 等. 2018，《天文学杂志》，156，123，doi: 10.3847/1538-3881/aabc4fAstropy Collaboration, Price-Whelan, A. M., Lim, P. L., 等. 2022，《天体物理学杂志》，935，167，doi: 10.3847/1538-4357/ac7c74Awaki, H., Kunieda, H., Ishida, M., 等. 2014，《应用光学》，53，7664，doi: 10.1364/AO.53.007664Awaki, H., Kametani, N., Imamura, R., 等. 2022，载于《2022年空间望远镜与仪器：从紫外线到伽马射线》，编者 J.-W. A. den Herder、S. Nikzad 和 K.Nakazawa，第12181卷，光学与光电子仪器工程师学会（SPIE），121814R，doi: 10.1117/12.2629705 Buitrago-Casas, Juan Camilo, Glesener, Lindsay, Christe, Steven, 等. 2022，《天文学与天体物理学》，665，A103, doi: 10.1051/0004-6361/202243272Chan, K.-W., Sharpe, M., Zhang, W., 等. 2013, 载于极紫外、X射线和伽马射线天文学光学 VI，编者 S. L. O'Dell 和 G. Pareschi，第8861 卷，国际光学与光子学学会（SPIE），88610X，doi: 10.1117/12.2022444Christe, S., Glesener, L., Buitrago-Casas, C., 等. 2016，《天文仪器学杂志》，05，1640005, doi: 10.1142/S2251171716400055Christensen, Finn E. 和 Ramsey, B. D. 2022, 天体物理学的X射线光学：历史回顾，编者 C. Bambi 和 A. Santangelo（新加坡：施普林格·自然新加坡），1–42，doi: 10.1007/978-981-16-4544-0 1-1Collon, M. J., Vacanti, G., G¨unther, R., 等. 2015, 载于极紫外、X射线和伽马射线天文学光学 VII，编者 S. L. O'Dell 和 G. Pareschi，第 9603 卷，国际光学与光子学学会（SPIE），96030K，doi: 10.1117/12.2188988Fujii, R., Sakuta, K., Ampuku, K., 等. 2024, 载于2024年空间望远镜与仪器：从紫外到伽马射线，编者 J.-W. A. den Herder、S. Nikzad 和 K. Nakazawa，第13093 卷，国际光学与光子学学会（SPIE），130936Y, doi:10.1117/12.3018685Giacconi, R., Branduardi, G., Briel, U., 等. 1979年，《天体物理学杂志》, 230, 540, doi: 10.1086/157110Glesener, L., Shih, A. Y., Caspi, A., 等. 2023年, 美国天文学会通报, 55 Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., 等. 2020年，《自然》, 585, 357, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2

Hayashi, T., Sato, T., Kikuchi, N., 等. 2015年, 《天文望远镜、仪器与系统杂志》, 1, 1, doi:10.1117/1.JATIS.1.4.044004Hunter, J. D.2007,Computing inScience &Engineering, 9,90,doi: 10.1109/MCSE.2007.55Iizuka, R., Hayashi, T., Maeda, Y., 等. 2018, 《天文望远镜、仪器与系统杂志》, 4, 011213, doi: 10.1117/1.JATIS.4.1.011213Ishikawa, T., Tamasaku, K., Yabashi, M., 等. 2001, 载于《X射线光学进展》, 编者 A. G. Michette、S. Oestreich、D. C. Mancini、A. K. Freund、T. Ishikawa、A. M. Khounsary、D. C. Mancini、A. G. Michette 和 S. Oestreich，第 4145 卷，国际光学与光子学学会（SPIE），1–10，doi: 10.1117/12.411621Ito, A., Yamaguchi, G., Watanabe, T., 等. 2021, 载于《 X 射线 /EUV 光学与元件进展 XVI 》，编者 C. Morawe、A. M. Khounsary 和 S. Goto，第 11837 卷，国际光学与光子学学会（SPIE），118370D，doi: 10.1117/12.2595124Itoh, A., Haba, Y., Hayakawa, A., 等. 2004, 载于《紫外与伽马射线空间望远镜系统》，编者 G. Hasinger 和 M. J. L. Turner，第 5488 卷，国际光学与光子学学会（SPIE），93–102，doi: 10.1117/12.551700Kitamoto, S., Ogawa, S., Komatsu, T., 等. 2014, 载于《 2014 年空间望远镜与仪器：从紫外到伽马射线》，编者 T. Takahashi、J.-W. A. den Herder 和 M. Bautz，第 9144 卷，国际光学与光子学学会（SPIE），91441Z，doi: 10.1117/12.2055305Krucker, S., Christe, S., Glesener, L., 等. 2013, 载于国际光学工程学会（ SPIE ）会议系列，第 8862 卷，《太阳物理与空间天气仪器 V》，编者 S. Fineschi 和 J. Fennelly，88620R，doi: 10.1117/12.2024277Kume, T., Takei, Y., Egawa, S., 等. 2019, 《科学仪器评论》, 90, 021718, doi: 10.1063/1.5057432Li, L., Zhang, C., Wang, J., 等. 2024, 《光学快报》, 49, 4413, doi: 10.1364/OL.533211Mimura, H., Takei, Y., Kume, T., 等. 2018, 《科学仪器评论》, 89, 093104, doi: 10.1063/1.5035323Mitsuishi, I., Ezoe, Y., Koshiishi, M., 等. 2010, 《应用光学》, 49, 1007, doi: 10.1364/AO.49.001007Nagasawa, S., Minami, T., Watanabe, S., 和 Takahashi, T. 2025, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1075, 170362, doi: https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170362

Numazawa, M., Ezoe, Y., Ishikawa, K., 等. 2024，载于《2024年空间望远镜与仪器：从紫外到伽马射线》，编者：J.-W. A. den Herder、S. Nikzad 和 K. Nakazawa，第 13093 卷，国际光学与光电子仪器工程师学会（SPIE），130937E，doi：10.1117/12.3020669pandas开发团队, T. 2020，pandas-dev/pandas：Pandas，最新版本，Zenodo，doi：10.5281/zenodo.3509134Ramsey, B. D., Bongiorno, S. D., Kolodziejczak, J. K., 等. 2022，《天文望远镜、仪器与系统杂志》，8，024003，doi：10.1117/1.JATIS.8.2.024003Serlemitsos, P. J., Soong, Y., Chan, K.-W., 等. 2007，《日本天文学会刊》，59，S9，doi：10.1093/pasj/59.sp1.S9Shibata, R., Ishida, M., Kunieda, H., 等. 2001，《应用光学》，40，3762，doi：10.1364/AO.40.003762Takeo, Y., Motoyama, H., Shimamura, T., 等. 2020，《应用物理快报》，117，151104，doi：10.1063/5.0027118Tamasaku, K., Tanaka, Y., Yabashi, M., 等. 2001，《核仪器与方法物理研究A辑：加速器、能谱仪、探测器及相关设备》，467-468，686，doi：https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00446-6Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., 等. 2020，《自然·方法》，17，261，doi：10.1038/s41592-019-0686-2Weisskopf, M. C. 2012，《光学工程》，51，1，doi：10.1117/1.OE.51.1.011013Wilkes, B. J., Tucker, W., Schartel, N., 和 Santos-Lleo, M. 2022，《自然》，606，261，doi：10.1038/s41586-022-04481-yYamaguchi, G., Kume, T., Takeo, Y., 等. 2020，载于国际光学工程学会（SPIE）会议系列，第 11491 卷，《X射线/极紫外光学与元件进展 XV》，114910K，doi：10.1117/12.2569834Yamaguchi, G., Matsuzawa, Y., Kume, T., 等. 2023，《科学仪器评论》，94，124501，doi：10.1063/5.0160262Zhang, W. W., Allgood, K. D., Biskach, M., 等. 2019，《天文望远镜、仪器与系统杂志》，5，1，doi：10.1117/1.JATIS.5.2.021012