arXiv:2611.32670v1 [astro-ph.IM] 24 Nov 2026

FOXSI-4和FOXSI-5探空火箭任务所用硬X射线光学系统的离轴性能表征

Yusuke Yoshida[a], Kazuki Ampuku[a], Koki Sakuta[b], Makoto Yoshihara[a], Keitoku Yoshihira[a], Ryoma Tanaka[a], Tetsuo Kano[a], Naoki Ishida[a], Wataru Kato[a], Yoshitaka Inoue[c], Keisuke Tamura[d,e], Takashi Okajima[d], Kikuko Miyata[f], Noriyuki Narukage[g], Gota Yamaguchi[h], Hidekazu Takano[h], Yoshiki Kohmura[h], Shutaro Mohri[i], Satoru Egawa[i], Hiroto Motoyama[i], Takehiro Kume[j], Yusuke Matsuzawa[j], Yoichi Imamura[j], Takahiro Saito[j], Kentaro Hiraguri[j], Hirokazu Hashizume[j], Hidekazu Mimura[i, h], Ikuyuki Mitsuishi[a]

[a]名古屋大学，Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya，日本[b]东北大学，6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku，Sendai，日本[c]IMV公司，3-24-5 Jojo-cho, Kasugai, 日本[d]NASA/GSFC，8800 Greenbelt Rd, Greenbelt，美国[e]马里兰大学, 7901 Regents Drive, College Park，美国[f]名城大学，1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya，日本[g]日本国立天文台，2-21-1 Osawa, Mitaka，日本[h]理化学研究所/SPring-8，1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo，日本[i]东京大学，4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo，日本[j]夏目光学公司，3461 Kamichaya, Kanae, Iida，日本

摘要。 FOXSI-4和FOXSI-5是日本—美国联合探空火箭任务，旨在研究太阳耀斑中的粒子加速和等离子体加热。我们为两项任务研制了软X射线和硬X射线光学系统，并表征了硬X射线光学系统的离轴响应。在SPring-8 BL29XUL测量了成像性能，并在NASA/GSFC测量了有效面积。随着离轴角增大，聚焦图像变得细长，点扩散函数的大角度分量增加。半功率直径（HPD）在离轴角达到7.5角分前一直小于20角秒，在15角分时增至约50角秒。Wolter-I光学系统模型在约20%的范围内再现了离轴HPD的变化规律，残差可能与镜面面形误差的方位角变化有关。在轴有效面积在6.4千电子伏时为41.3 ± 1.9 mm^2 ，在10 千电子伏时为32.3 ± 1.6 mm^2 ；在5角分处分别降低了20%和30%。结合针对几何效应和X射线反射率的经验修正后，在1.0–12.5千电子伏范围内、离轴角不超过5角分时，模型能够在20%的范围内再现测得的有效面积。在更大的离轴角下，低能量处的偏差表明杂散光贡献有所增加。这些测量为离轴用于构建 FOXSI-4 和 FOXSI-5 分析响应函数的响应数据。

关键词： X射线、X射线光学、标定、探空火箭、太阳、太阳耀斑。

*Ikuyuki Mitsuishi, mitsuisi@u.phys.nagoya-u.ac.jp

1 引言

太阳是距离地球最近的恒星，能够在时间、空间和能量维度上提供有关天文现象的详细信息。在太阳上观测到的许多物理现象都具有基础性和普遍性，从太阳观测中获得的知识不仅可应用于太阳物理学，也可应用于天体物理学和等离子体物理学等广泛领域。[1–4]

尤其是在太阳日冕和耀斑中，与磁重联相关的能量释放会导致粒子加速和等离子体加热。因此，从观测角度阐明这些过程对于理解宇宙等离子体中的能量转换机制十分重要。太阳日冕中的磁重联会加速耀斑环顶上方重联区域内及其周围的电子。这些加速电子在环顶附近和足点处通过轫致辐射产生非热硬X射线辐射，并将能量沉积到色球层中。这种能量沉积会引发色球蒸发，使高温热等离子体充满耀斑环；这些等离子体通过热轫致辐射和谱线辐射发出软X射线。[5,6] 因此，X射线是研究太阳日冕和耀斑中粒子加速及等离子体加热的重要手段，利用各种X射线天文台对这些物理过程进行了广泛研究。[7–12] X射线望远镜（XRT）[13] 搭载于*Hinode*，于 2006,[11] 发射后，在软X射线波段实现了高空间分辨率的直接成像。然而，XRT不支持成像光谱学，无法直接测量单个X射线光子的能量。Reuven Ramaty高能太阳光谱成像仪(*RHESSI*)，[10]于2002年发射，在硬X射线波段提供了高空间分辨率和光谱观测能力。然而，由于采用了间接成像技术，其灵敏度和动态范围有限。因此，在软X射线波段实现成像光谱学，并获得足够高的动态范围，以同时分辨足点处明亮的硬X射线源和日冕中暗弱的硬X射线源，仍然是重要的挑战。若能克服这些挑战，就能详细捕捉太阳耀斑中高温热等离子体和非热电子的空间与能量分布，从而为通过观测阐明磁能如何转化为粒子加速和等离子体加热提供契机。在这些

在此背景下，聚焦光学X射线太阳成像仪（FOXSI）这一项日美

联合探空火箭实验旨在理解太阳日冕中的高能物理现象，并已利用直接聚焦光学系统实现了太阳软X射线和硬X射线的成像光谱学观测。[14–16] FOXSI搭载了七台采用直接聚焦光学系统的X射线望远镜，前三次飞行观测了太阳活动区、微耀斑和宁静太阳。[17–21] 第四次飞行FOXSI-4旨在研究与太阳耀斑相关的粒子加速和等离子体加热机制。实验制定了触发观测策略：在发生满足阈值条件的耀斑后发射探空火箭。[22] 为详细分辨耀斑结构的空间细节，FOXSI-4配备了七台X射线望远镜，其中包括新制备的高角分辨率X射线光学系统。[23,24] 这些X射线光学系统与两台CMOS探测器配套，用于软X射线观测，[25] 四台宽禁带碲化镉双面条纹探测器（CdTe-DSD）[26,27] 以及一台Quad-Timepix3碲化镉探测器[28] 用于硬X射线观测。FOXSI-4于2024年4月17日22:13:00（UTC）从阿拉斯加的Poker Flat Research Range发射，并成功利用直接聚焦光学系统，协同开展Hi-C Flare观测，首次实现了对一次M级耀斑的软X射线和硬X射线成像光谱学观测。[29] 重飞任务FOXSI-5于2026年5月14日19:23:30（UTC）发射，并成功观测了C级耀斑之后的三个活动区。[30]

对于 FOXSI-4 和 FOXSI-5 的七套 X射线光学元件，我们分别负责开发一套软X射线光学系统和一套硬X射线光学系统。我们进行了振动测试、[31] 地面标定测试，[24,32] 并开发了自主的光线追迹模拟器，以构建响应函数。[33] 由于太阳耀斑具有延展结构，在分析观测数据时，不仅需要了解光学元件对轴上光线的响应，还需要了解其对离轴光线的响应。对于 FOXSI-4 的软X射线光学系统，其成像性能的离轴响应和有效面积

已经得到评估。利用这些数据，我们估算了各组件之间的角度失准，并以 ±10%的精度[24]重现了有效面积对离轴光线的能量依赖性。然而，尽管 FOXSI-4 和 FOXSI-5 搭载的硬X射线光学系统的轴上成像性能已得到详细评估，[32] 其离轴成像性能和有效面积仍未得到充分表征。本文基于我们此前发表于 SPIE 会议论文集的论文，[34] 介绍了在 SPring-8 和美国国家航空航天局戈达德太空飞行中心（GSFC）开展的硬X射线光学系统地面标定实验结果，重点关注成像性能和有效面积对离轴角的依赖性。

2 FOXSI-4 和 FOXSI-5 搭载的硬X射线光学元件

我们通过应用最初为同步辐射设施中的X射线显微镜开发的高精度电铸技术，一直在研制空间X射线光学系统。[35] 该光学系统采用由镍制成的单一整体式全周向沃尔特I型反射镜，其表面未施加任何涂层。该反射镜焦距为2000 mm，直径为60 mm，总长度为220 mm，厚度为2 mm。[36] 在这一设计中，对于轴上光线，临界能量约为16千电子伏。由于FOXSI-4和FOXSI-5旨在观测太阳耀斑，因此该设计优先考虑角分辨率而非有效面积。我们将反射镜集成到反射镜模块组件（MMAs）中，并为每项任务分别提供一个软X射线光学系统和一个硬X射线光学系统。软X射线光学系统的详细信息见Ampuku 等（2024），[24]而硬X射线光学系统的详细信息见Fujii等（2026）。[32] 本文所研究的硬X射线光学系统由前端遮光器、前端孔径、反射镜室、安装环、镜面、后端孔径和后端遮光器组成，按X射线入射侧的顺序列出（图1右图）。镜面粘接在后端孔径上。硬X射线望远镜

设计工作于4–20 千电子伏能段，尽管由于镜面反射率的能量依赖性，其有效面积在约16千电子伏以上会显著下降。我们在SPring-8 BL29XUL评估了硬X射线光学系统对轴上光线的成像性能。结果表明，在12 千电子伏、全孔径照明条件下，其核心极为锐利，半高全宽（FWHM）为0.7角秒，半功率直径（HPD）为14角秒。[32]此外，还发现角分辨率与主镜段和次镜段的轴向方向面形误差之间存在正相关，表明轴向面形误差会导致成像退化。[32] FOXSI-4飞行后，对硬X射线光学系统进行了额外粘接，以提高其抗振能力。飞行后，在光轴附近未观察到半功率直径（HPD）发生显著变化。随后进行的振动测试确认该光学系统满足规定要求，同一套光学系统因此再次搭载于FOXSI-5上飞行。因此，本文所 प्रस्तुत的结果适用于两项任务，但在构建任务专用响应函数时，应考虑反射镜光轴与MMA机械轴之间，以及光学系统与探测器平面之间的对准差异。

3 地面标定

为获取构建响应函数所需的数据，我们进行了地面标定测试。这些测试分别在 SPring-8 的 1 千米光束线 BL29XUL 和 NASA/GSFC 的 100 米光束线上进行，并对轴上和离轴光线的成像性能及有效面积进行了评估。各设施实验装置的概览如图 1所示。本节将介绍硬X射线光学系统的地面标定结果。

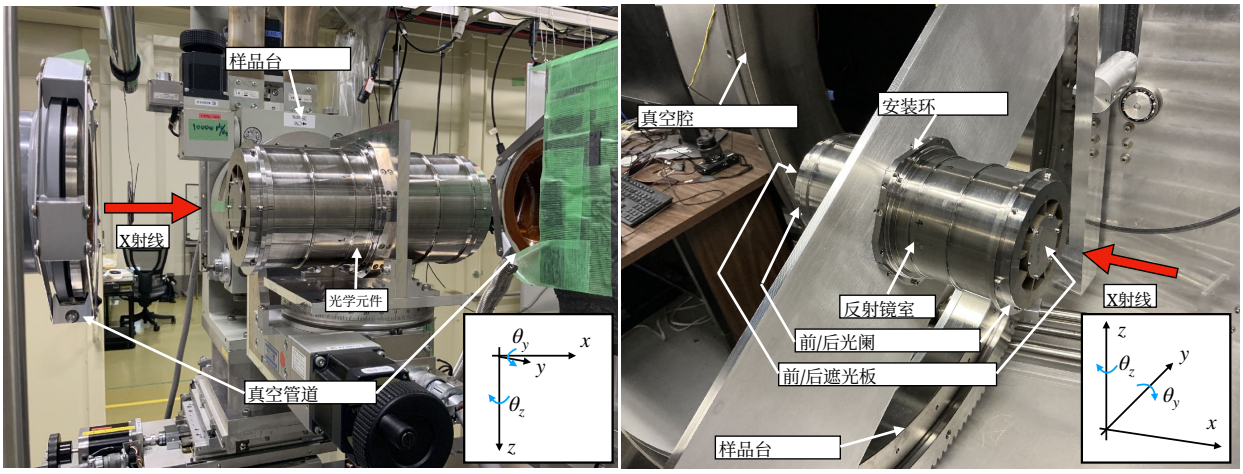

图 1 SPring-8的1 千米光束线 BL29XUL（左）和NASA/GSFC的100米光束线（右）上的实验装置概览。

3.1 成像性能

测量使用了高亮度X射线千米级大面积扩展光束评估系统（HBX-KLAEES），[32] 该系统能够以极小的发散角实现全口径X射线照明。借助这一能力，我们能够高保真地评估成像性能，分辨点扩散函数（PSF）中清晰的核心和大角度分量。[32] 坐标系定义如图 1左图所示。光学元件安装在具有五个自由度的平移和旋转台上（x、 y、 z、 θ_y 和 θ_z），而探测器系统安装在沿 y轴和z轴方向移动的平移台上。探测器系统由闪烁体、物镜和CMOS相机组成。实验装置的详细信息见 Fujii等（2026）。[32]

成像性能测量按如下方式进行。首先，采用 Fujii等（2026）所述的相同方法调整光轴和焦点位置。[32] 将最佳对准位置定义为使有效面积最大化的角位置，以及能够提供最佳成像性能的焦点位置。随后，以最佳对准位置为

参考位置， θ_y 和 θ_z 以 2.5 角分为步长，从 -12.5 角分变化至 $+12.5$角分，共得到 12 keV 下的 121 个角位置。最后，在最佳对准位置处获取 10 和 15 千电子伏下的图像。对于上述所有测量，在上游光束快门关闭的相同条件下获取暗场图像，并从受光照图像中减去这些暗场图像，以校正背景。为考虑背景随时间的变化，我们利用视场中的无源区域评估其时间依赖性，并将这种变化纳入背景估计中。

图2展示了12 keV下轴上和离轴光线的合成聚焦图像随离轴角的变化。随着离轴角增大，聚焦图像变得更加细长，亮度也随之降低，这主要是由Wolter-I光学系统的几何特性以及X射线反射率的角度依赖性所致。此外，还观察到方位不对称性，部分原因是前后孔径的非轴对称辐条结构造成的几何遮挡，以及镜面面形误差。作为代表性示例，图3上方各面板展示了$(\theta_y, \theta_z) = (0', 5.0')$和$(0', 10.0')$处的聚焦图像。根据这些图像计算得出的PSF和包围能量函数（EEFs）显示在图3下方各面板中。作为比较，也绘出了$(\theta_y, \theta_z) = (0', 0')$处的PSF和EEF。考虑到闪烁体灵敏区域的尺寸，PSF和EEF的积分半径保守地设为800像素（$\sim 379''$）。将积分半径扩大至850像素（$\sim 402''$）后，只有少数位置的半功率直径变化约1角秒，这证实了积分半径的选择对结果影响很小。上述图像变化在图3上方各面板中更加清晰可见。PSF和EEF曲线还表明，随着离轴角增大，强度在数十角秒的角尺度范围内变化得更加平缓，而大角度分量的贡献则增大。峰值结构

轴上PSF中约100角秒处的峰值结构（Fujii等（2026）的图6中也有报告）[32] 可能与镜面边缘附近面形误差较大的区域有关。此类面形误差的方位角依赖性被认为会导致峰值强度和形状随离轴角变化。此外，$(\theta_y, \theta_z) = (0', 10.0')$处320角秒以外PSF的增强，被认为是杂散光进入积分区域所致。根据PSF计算得出的半高全宽值在所有三个位置均为 1.9 ± 0.9 角秒，这表明即使离轴角达到10角分，图像核心的锐度仍保持不变。不过，这些数值对应于探测器像素尺寸所决定的检测极限。$(\theta_y, \theta_z) = (0', 0')$处的半功率直径为 13 ± 1 角秒，$(\theta_y, \theta_z) = (0', 5.0')$处为 13 ± 1 角秒，而$(\theta_y, \theta_z) = (0', 10.0')$处为 23 ± 1 角秒。离轴角为5角分时，图像质量退化程度较小；但在10角分时，半功率直径约增大一倍。较大离轴角下的这种退化被认为是由Wolter-I光学系统的离轴成像特性导致图像模糊加剧，并受到杂散光影响所致。对合成图像中的所有数据均进行了相同分析，离轴角依赖性的半功率直径汇总于图4。此处离轴角定义为 $\theta = \sqrt{\theta_y^2 + \theta_z^2}$。图中显示，离轴角不超过7.5角分时，半功率直径保持在20角秒以下；而在更大的离轴角下则迅速增大。即使绝对离轴角相同，半功率直径也呈现方位角变化，其最大值与最小值之间的差异最高约为25%。对相应PSF和EEF的检查表明，这些变化主要源于镜面面形误差的方位差异；这些差异会随入射方向不同而影响双反射分量的PSF。

为了模拟半功率直径的离轴角依赖性，我们假设离轴光线成像性能的退化由两个部分组成：离轴

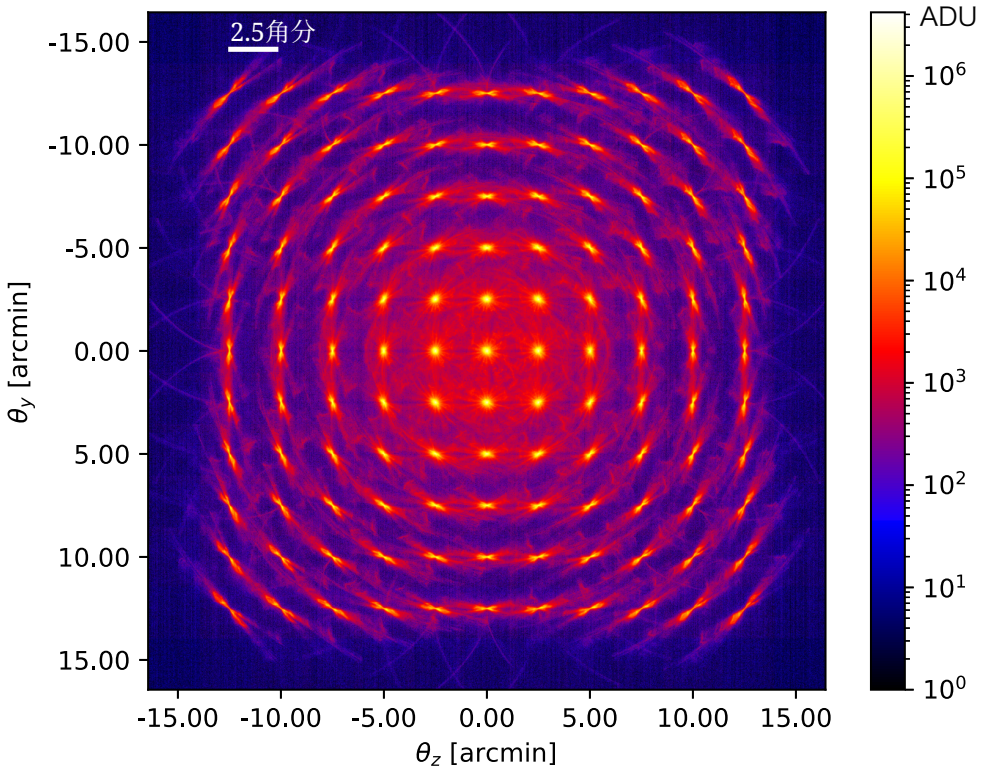

图2 使用 SPring-8 BL29XUL 的 HBX-KLAEES 在 12 keV 下测得的离轴角 θ_y 和 θ_z对应的组合聚焦图像。

Wolter-I光学系统的离轴成像特性所导致的退化，以及 Fujii等（2026）提出的由镜面面形误差所导致的退化。[32] L. P. VanSpeybroeck 和 R. C. Chase（1972年）[37] 根据设计参数，采用一个简单的经验公式近似表示具有最佳曲率焦面的 Wolter-I望远镜的分辨率（均方根模糊圆半径），如其公式（2）所示。使用平面焦平面的影响是使第一个 $\tan^2\theta$ 项加倍。基于这一关系，我们使用以下公式表示 Wolter-I光学系统的离轴成像特性对角分辨率的贡献，其中第一项和第二项的系数分别作为拟合参数， a 和 b。

$$\sigma = 3600 \cdot \frac{180}{\pi} \cdot (a \tan^2\theta + b \tan\theta) \tag{1}$$

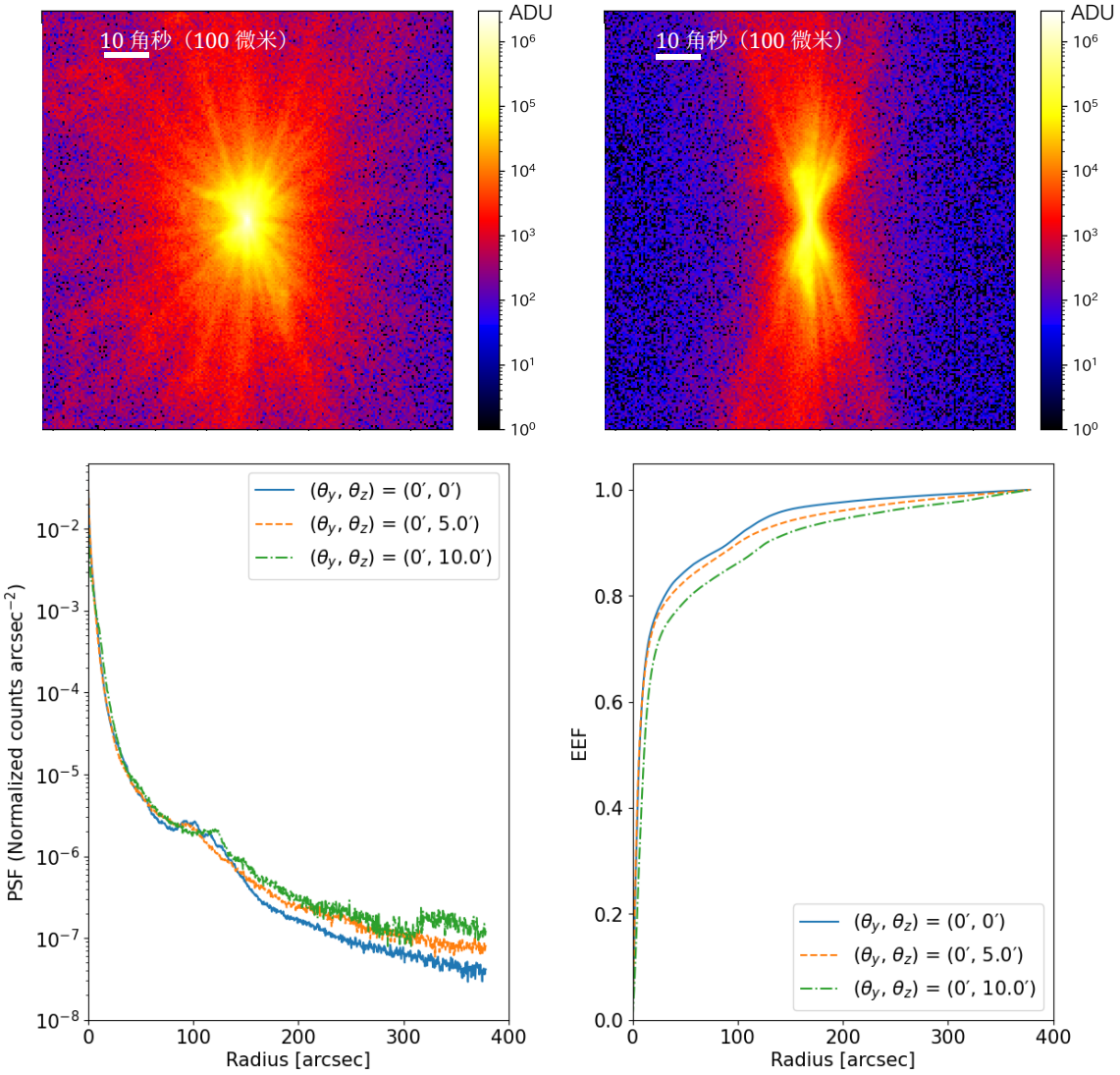

图3 12 keV 下的聚焦图像及相应的 PSF 和包围能量函数。左上和右上面板分别显示从图2中选取的 $(\theta_y, \theta_z) = (0', 5.0')$ 和 $(0', 10.0')$ 处的聚焦图像。左下和右下面板分别显示由这些图像计算得出的相应 PSF 和包围能量函数。轴上图像见 Fujii等（2026）的图6。作为比较，左下和右下面板还分别显示了轴上光线对应的 PSF 和包围能量函数。$(\theta_y, \theta_z) = (0', 0')$、$(0', 5.0')$ 和 $(0', 10.0')$ 处的数据分别以蓝色实线、橙色虚线和绿色点划线表示。

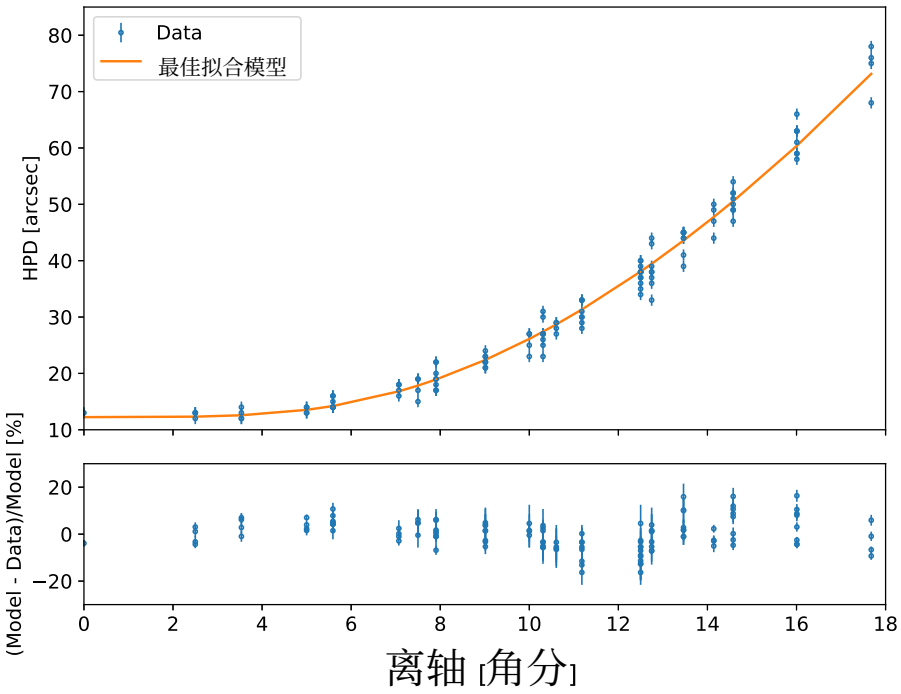

图4 离轴角依赖性在12 千电子伏下所有显示于图2中的数据的半功率直径。横轴表示离轴角的绝对值，定义为 $\theta = \sqrt{\theta_y^2 + \theta_z^2}$，纵轴表示以角秒为单位的半功率直径。测得的半功率直径值以蓝色圆圈表示，使用方程 2 得到的最佳拟合模型以橙色实线表示。

这里， σ 表示均方根模糊圆半径 [角秒]，， θ 表示入射角（本文中的离轴角） [弧度]。假设由于Wolter-I光学系统的离轴成像特性而在焦平面上产生的图像模糊服从高斯分布，其标准差为 σ，则半功率直径表示为 $2\sigma\sqrt{2\ln 2}$。我们引入常数参数 c，用于表示面形误差对半功率直径的贡献，并假设其与离轴角无关。假设Wolter-I光学系统的离轴成像特性和镜面面形误差所产生的贡献彼此独立，半功率直径模型表示如下。

$$\mathrm{HPD} = \sqrt{(2\sigma\sqrt{2\ln 2})^2 + c^2} \tag{2}$$

图 4 所示的数据采用该模型进行了拟合。所得拟合参数为

$a = 5.6$，$b = 1.8 \times 10^{-24}$，$c = 12''$。该模型成功再现了 12 keV 下半功率直径随离轴角的总体变化趋势，但仍存在约 20% 的偏差，这可能反映了上文讨论的镜面面形误差的方位角变化。拟合得到的 b 值小得可以忽略，表明 $\tan\theta$ 中的线性项并非再现测得变化趋势所必需；否则，该项会导致小离轴角下半功率直径发生退化。这可能是因为光轴附近的图像模糊主要由镜面面形误差所主导，而镜面面形误差由常数参数 c表示，使得线性项的贡献在拟合过程中难以区分。因此，观测到的离轴角依赖性主要由 $\tan\theta$ 的二次项描述。在 L. P. VanSpeybroeck 和 R. C. Chase（1972年）的研究中，[37] a 和b 用望远镜设计参数表示。代入我们镜面的设计参数可得 $a_{\mathrm{design}} = 5.3$ 和 $b_{\mathrm{design}} = 5.6 \times 10^{-5}$。拟合得到的 a 值与设计预测值相当，而拟合得到的 b 值则明显更小。拟合得到的 a值略大于设计预测值，这可能是因为在较大离轴角下，杂散光进入探测器视场，从而增大了测得的半功率直径。我们还评估了轴上半功率直径的能量依赖性。在 10、12 和 15 千电子伏下，最佳对准位置处的半功率直径分别为 14 ± 1，13 ± 1，以及 12 ± 1 角秒。这些数值在测量不确定度范围内一致，并且也与拟合参数 c = 12角秒以及 Fujii等（2026）的先前测量结果一致。[32]

3.2 有效面积

NASA/GSFC 100米X射线束线的有效面积测量结果总结如下。NASA/GSFC的100米X射线束线由X射线发生器、单色器、光学元件平台和探测器平台组成，运行压力为 10^{-6}–10^{-5}

托。[38] 坐标系定义如图1右侧面板所示。光学元件安装在具有五个自由度的平移和旋转台上（y、 z、 θ_x、 θ_y、和θ_z），而探测器则安装在沿 x轴、 y轴和 z轴方向的平移台上。有效面积测量使用了SDD探测器，位置和角度对准使用了CCD探测器。有关束线和探测器的详细描述见Boissay-Malaquin等（2022）。[38]

光学元件按照第3.1节所述的相同步骤进行角度和位置校准，并确定了对准效果最佳的位置。有效面积采用未经滤波的X射线源的连续发射谱进行测量，该X射线源配备铜靶，工作管电压为14 kV、管电流为20 mA。以最佳对准位置为参考，在 -12.5 至 $+12.5$角分范围内沿 θ_y 和 θ_z两个方向，使用2.5角分的网格间距，在选定的31个角位置处进行了有效面积测量。

测得的 $\theta \leq 5$ 角分处的有效面积如图5所示。这里，离轴角定义为 $\theta = \sqrt{\theta_y^2 + \theta_z^2}$。当离轴角达到或超过 7.5 角分时，杂散光进入探测器视场，导致低能量下探测到的光子计数增加。因此，该范围内测得的有效面积包含杂散光的贡献。由于光子数量有限，无法充分评估 12.5 千电子伏以上的有效面积。在 $(\theta_y, \theta_z) = (0', 0')$、$(0', 2.5')$ 和 $(0', 5.0')$ 处，测得 6.4 千电子伏下的有效面积分别为 41.3 ± 1.9、 33.7 ± 1.7 和 32.7 ± 1.6 mm^2, ，这表明离轴角为 5.0 角分时有效面积约减少了 20%。此外，在 8.3 千电子伏的镍K吸收边以上观察到有效面积下降。在 10 千电子伏下，测得的有效面积分别为 32.3 ± 1.6、 27.7 ± 1.3 和 21.8 ± 1.0 mm^2, ，对应于离轴角为 5.0 角分时约 30% 的降幅。离轴光线在

10 千电子伏下的有效面积降幅大于 6.4 千电子伏下的降幅，这被认为是由反射率对入射角的依赖性造成的。为建立有效面积对离轴角和能量的依赖模型，我们采用了 Ampuku 等（2024）提出的方法，[24] 该方法将有效面积表示为镜面有效面积、前后孔径的孔径比、预准直器的孔径比以及光学阻挡滤光片透射率的乘积。由于本研究评估的是硬X射线光学系统，因此不包括预准直器和光学阻挡滤光片的影响。镜面的有效面积通过光线追迹模拟计算，反射率依据X射线光学中心数据库。[39] 孔径比固定为约 86% 的设计值。然而，该模型既无法再现计算与测得有效面积之间总体 $\sim 20\%$ 的偏差，也无法再现测量中观察到的 6 千电子伏以下有效面积下降。这些影响可能归因于镜面与后端孔径之间的失准、表面粗糙度、电铸导致反射表面密度降低、反射表面氧化，以及污染物造成的吸收和散射。以往的X射线望远镜也曾报道过测量值与预测有效面积之间的差异，包括随能量变化的差异。[40–42] 我们引入了一个经验修正因子，以再现总体偏差和低能衰减： $C(E,\theta) = C_0 \exp(-d(\theta) \cdot (E_0/E)^n)$。其中，E 为光子能量[千电子伏]， $E_0 = 6$千电子伏为参考能量， $d(\theta)$ 表示为离轴角 θ[角分], 的函数，定义为 $d(\theta) = d_0 + d_1\theta + d_2\theta^2$。纳入该修正因子后，硬X射线光学系统的有效面积建模为

$$A_{\mathrm{e,optics}}(E,\theta) = A_{\mathrm{e,mirror}}(E,\theta) \cdot \mathrm{AR} \cdot C(E,\theta) \tag{3}$$

这里，$A_{\mathrm{e,\ optics}}$ 和$A_{\mathrm{e,\ mirror}}$ 分别表示整个光学元件和镜面的有效面积，而 AR 是孔径比。参数 C_0、 d_0、 d_1、 d_2、和 n 通过使用 $\theta \leq 5$ 角分对所有测量数据进行拟合确定，此时预计杂散光贡献与双反射分量相比可以忽略。最佳拟合值为$C_0 = 0.85$、 $d_0 = 0.13$、 $d_1 = 0.025$、 $d_2 = -0.003$、和 $n = 0.79$。在 1.0–12.5 千电子伏的能量范围内，我们成功复现了测量得到的有效面积，在 $\theta \leq 5$角分范围内误差不超过20%（图5）。然而，对于轴上光线，该模型倾向于在低能量下高估测得的有效面积，并在高能量下低估它。目前的模型难以完全复现有效面积的能量依赖性，从而导致了所观察到的趋势。

为检验经验模型在拟合范围之外的适用性，我们在不修改拟合参数的情况下，将根据离轴角不超过 5 角分的测量结果得到的最佳拟合模型外推至更大的离轴角。在约 7.5 角分的离轴角下，外推模型总体上再现了所考察能量范围内测得的有效面积，这表明在这些条件下杂散光贡献仍然相对较小。然而，在 10 角分及更大的离轴角下，出现了明显偏差，尤其是在镍K吸收边（约 8.3 千电子伏）以下，此时杂散光的贡献变得越来越显著。相比之下，在镍K吸收边以上，即使在更大的离轴角下，测得的有效面积总体上仍能在约 20% 的范围内得到再现，不过在最大的离轴角下（包括 $(\theta_y, \theta_z) = (12.5', 12.5')$），观测到的偏差接近 30%。这些结果表明，在杂散光贡献仍然相对较小的条件下，经验模型在拟合范围之外仍可提供合理的近似。

差异　　大离轴角和低光子能量下的表现可能归因于

当前模型未能充分考虑的杂散光贡献；该模型主要描述双反射分量，未明确考虑杂散光。此外，如相近绝对值离轴角下测得的有效面积差异所示，杂散光贡献表现出显著的方位角依赖性。因此，将有效面积模型扩展到更大的离轴角范围和更宽的光子能量范围，可能需要对杂散光贡献进行单独处理，包括其方位角依赖性。

4 总结与结论

FOXSI-4 和 FOXSI-5 是日本—美国联合开展的太阳探测火箭实验，旨在研究与太阳耀斑相关的粒子加速和等离子体加热。我们为 FOXSI-4 和 FOXSI-5 分别提供了一套软X射线光学系统和一套硬X射线光学系统。由于太阳耀斑具有延展结构，因此不仅有必要了解光学元件对轴上光线的响应，也有必要了解其对离轴光线的响应。然而，尽管硬X射线光学系统对轴上光线的成像性能已经得到详细评估，但其对离轴光线的响应尚未开展研究。在本研究中，我们在 SPring-8 BL29XUL 评估了成像性能，以获得高质量的点扩散函数，并在 NASA/GSFC 评估了宽能量范围内的有效面积。通过将离轴角从 -12.5 角分变更至 $+12.5$角分、步长为 2．5 角分，获得了聚焦图像；在 12 keV 下共测量了 121 个角位置。对这些数据的分析显示，随着离轴角增大，聚焦图像逐渐变长，光子通量则不断降低。此外，大角度分量在点扩散函数中的占比也有所增加。当离轴角不超过 7.5 角分时，半功率直径保持在 20 角秒以下；但在更大的离轴角下迅速变差，在 15 角分时达到约 50 角秒。为量化

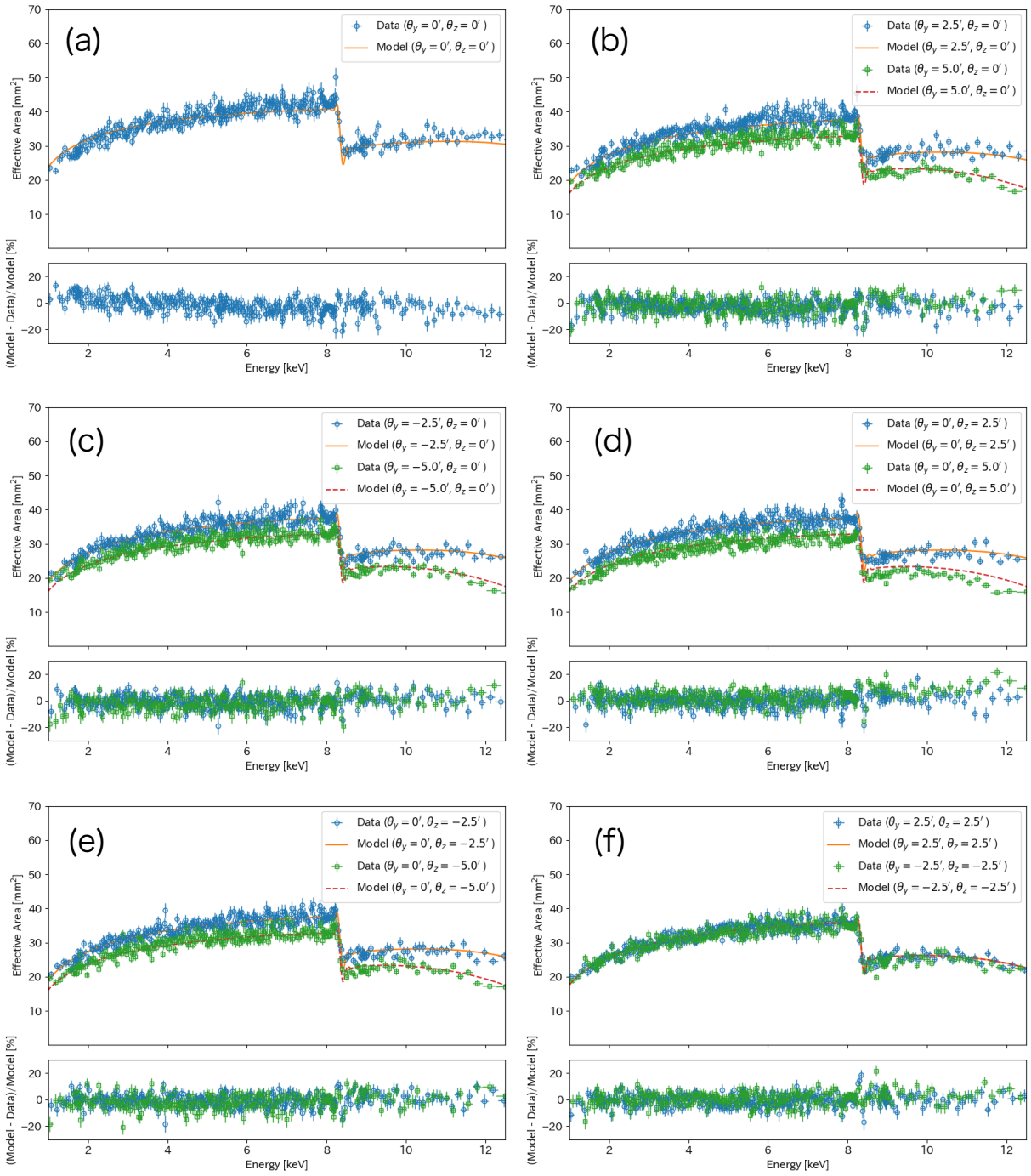

图5 NASA/GSFC 100米X射线束线上轴上和离轴光线的有效面积测量值与模型值对比。各面板所示离轴位置（θ_y, θ_z）分别为：**(a)**（0′, 0′）；**(b)**（2.5′, 0′）和（5.0′, 0′）；**(c)**（−2.5′, 0′）和（−5.0′, 0′）；**(d)**（0′, 2.5′）和（0′, 5.0′）；**(e)**（0′, −2.5′）和（0′, −5.0′）；**(f)**（2.5′, 2.5′）和（−2.5′, −2.5′）。测量数据以蓝色圆圈和绿色方块表示，相应的最佳拟合模型分别以橙色实线和红色虚线表示。

为了定量描述半功率直径的离轴角依赖性，我们采用了一个模型，该模型考虑了Wolter-I光学系统离轴成像特性导致的模糊，以及由镜面面形误差引起的轴上模糊分量，并假设后者与离轴角无关。该模型成功再现了 12 keV 下半功率直径整体的离轴角依赖性。

在1.0–12.5 千电子伏的能量范围内，对离轴角从 -12.5到 $+12.5$ 角分以2.5角分为步长进行变化时的有效面积进行了测量，作为测量矩阵的一部分，共获得31个角位置。在这种情况下，当离轴角达到7.5角分或更大时，杂散光进入探测器视场，因此测得的有效面积包含了杂散光贡献。对于轴上光线，在6.4 千电子伏和10 千电子伏处，有效面积分别为 41.3 ± 1.9 mm^2 和 $32.3 \pm 1.6\mathrm{mm}^2$ 。在离轴角为5角分时，6.4 千电子伏处的有效面积降低了20%，10 千电子伏处降低了30%，表明降低程度也取决于能量。测得的有效面积通常比光线追迹模拟计算值低约20%，且差异有随能量降低而增大的趋势。为解释这一差异，我们引入了经验修正因子，并利用离轴角在5角分以内获得的数据对其进行了拟合。结果证实，对于不超过5角分的离轴角，该模型能够将有效面积的离轴角依赖性复现到20%以内。外推至更大的离轴角时，在约7.5角分处显示出合理的一致性；即使在更大的离轴角下，在镍K吸收边以上通常也能保持在20%以内。然而，在离轴角为10角分及更大时，低能量处出现了显著差异，此时杂散光贡献变得十分重要。杂散光贡献明显的方位角依赖性表明，进一步完善有效面积模型时，可能需要明确考虑这一分量及其方位角依赖性。

本研究表征的硬X射线光学系统已分别于2024年和2026年成功搭载FOXSI-4和FOXSI-5飞行。本研究给出的离轴成像性能和有效面积测量结果，为构建任务专用响应函数提供了必要的校准数据，同时考虑了各任务的对准情况。

披露声明

作者声明不存在任何可能影响本研究客观性或本文撰写的经济利益、商业关联或其他潜在利益冲突。

代码、数据和材料可用性

本研究期间生成和/或分析的数据集可根据合理请求向通讯作者获取。

致谢

FOXSI-4 和 FOXSI-5 探空火箭任务分别由 NASA 低成本进入太空（LCAS）计划通过资助编号 80NSSC22K0577 和 80NSSC25M7045 提供资助。我们感谢美国国家科学基金会（NSF）通过资助编号 AGS-1429512 和 AGS-1752268，为明尼苏达大学的空间物理学研究提供支持。FOXSI-4 任务还获得了 ISAS/JAXA 小科学计划和日本学术振兴会科学研究费助成项目（资助编号 JP21H04486）的支持。FOXSI 实验团队感谢沃洛普斯和白沙导弹靶场（WSMR）的 NASA 和 NSROC 团队，以及 Poker Flat Research Range 和阿拉斯加大学费尔班克斯分校（UAF）地球物理研究所的工作人员对两项任务的支持。我们还感谢来自众多参与机构、不同专业领域和各个职业阶段的 FOXSI 实验团队全体成员所作的贡献

这项工作获得了日本学术振兴会科学研究费助成项目资助编号 JP22K18274 和 JP20K20920（I.M.）、JP23H00156（H.M.）以及 JP18H03724、JP22H00134 和 JP21KK0052（N.N.）的支持，同时还获得了 JST FOREST计划（资助编号 JP MJFR2369，日本）（I.M.）的支持。此外，本研究还获得了 JST SPRING（资助编号 JPMJSP2125）的支持。本工作在名古屋大学宇宙地球环境研究所（ISEE）联合研究计划框架下开展。同步辐射实验在 SPring-8 的 BL29XUL 光束线上进行，并获得日本同步辐射研究所（JASRI）的批准（提案编号 2024A1457）。在 SPring-8 使用 BL29XUL 得到了理化学研究所的支持。Y.Y. 和 K.S. 感谢日本学术振兴会青年研究人员奖学金（分别为 DC1 和 PD）提供的支持，资助编号分别为 JP26KJ1366 和 JP26KJ0023。Y.Y. 还感谢日本天文学会授予的早川幸男基金提供的经费支持。M.Y. 感谢岩垂奖学基金会提供的经费支持。K.A. 感谢服部国际奖学基金会（HISF）的慷慨支持。K.S. 和 K.A. 还感谢“THERS Make New Standards Program for the Next Generation Researchers”提供的经费支持。OpenAI 的 ChatGPT 和 Anthropic 的 Claude 被用于协助英文编辑、翻译和语法支持。

参考文献

1 高抟伸介、Ikuyuki Mitsuishi、志村拓真……石原大辅，《基于太阳表面磁场—日冕关系对X射线明亮的G型矮星日冕特性的研究》，《天体物理学杂志》**901**，70（2020）。

2 Kazuki Ampuku、Ikuyuki Mitsuishi、Philip Kaaret……K. D. Kuntz，《探测与银河系相关的软X射线辐射的全天分布——

布》，《天体物理学杂志》**1011**，55（2026年）。

3 Ellen G. Zweibel 和 Masaaki Yamada，“天体与实验室等离子体中的磁重联”，《天文学与天体物理学年评》**47**（第47卷，2009年），291–332（2009年）。

4 Fan Guo、Yi-Hsin Liu、Seiji Zenitani . .. Masahiro Hoshino，“高能天体物理学中的磁重联及相关粒子加速”，《空间科学评论》**220**，43（2024年）。

5 Satoshi Masuda、Takeo Kosugi、Hirohisa Hara . . . Saku Tsuneta，“太阳耀斑中的硬X射线源与主要能量释放位置”，《日本天文学会刊》**47**，677–689（1995年）。

6 Khan, J. I.、Hudson, H. S. 和 Mouradian, Z.，“太阳上环状耀斑的软X射线分析”，《天文学与天体物理学》**416**(1)，323–332（2004年）。

7 J. David Bohlin, Kenneth J. Frost, Peter T. Burr ...George L. Withbroe，《太阳活动极大期任务》，《太阳物理学》**65**，5–14（1980）。

8 Y. Tanaka，《日鸟卫星简介》，《太阳物理学》**86**，3–6（1983）。

9 Y. Ogawara, T. Takano, T. Kato . . . Y. Uchida，《SOLAR-A任务：概述》，《太阳物理学》**136**，1–16（1991）。

10 R. P. Lin, B. R. Dennis, G. J. Hurford . . . A. Conway，《鲁文·拉马蒂高能太阳光谱成像仪（RHESSI）》，《太阳物理学》**210**，3–32（2002）。

11 T. Kosugi、K. Matsuzaki、T. Sakao……L. Golub，《Hinode（Solar-B）任务：概述》，《太阳物理学》**243**，3–17（2007）。

12 M¨uller、D.、St. Cyr、O. C.、Zouganelis、I.....Williams，《太阳轨道飞行器任务——科学概述》，《天文学与天体物理学》**642**，A1（2020）。

13 L. Golub, E. DeLuca, G. Austin . . . S. Varisco，《日出号任务的X射线望远镜（XRT）》，《太阳物理学》**243**，63–86（2007）。

14 S¨am Krucker、Steven Christe、Lindsay Glesener . . . Robert P. Lin，《聚焦光学X射线太阳成像仪（FOXSI）：仪器与首次飞行》，载于太阳物理与空间天气仪器 *V*，Silvano Fineschi 和 Judy Fennelly 编，**8862**，88620R，国际光学与光子学学会，SPIE（2013）。

15 Steven Christe、Lindsay Glesener、Camilo Buitrago-Casas . . . S¨am Krucker，《FOXSI-2：聚焦光学X射线太阳成像仪的第二次飞行升级》，《天文仪器杂志》**05**（01），1640005（2016）。

16 Sophie Musset、Juan Camilo Buitrago-Casas、Lindsay Glesener.....S¨am Krucker，《FOXSI第三次探空火箭飞行中的鬼像射线抑制及早期结果》，载于天文学紫外、*X*射线和伽马射线空间仪器 *XXI*，Oswald H. Siegmund 编，**11118**，1111812，国际光学与光子学学会，SPIE（2019）。

17 S¨am Krucker、Steven Christe、Lindsay Glesener.....Robert Lin，《聚焦光学X射线太阳成像仪的首批图像》，《天体物理学杂志快报》**793**，L32（2014）。

18 Shin-nosuke Ishikawa、Lindsay Glesener、S¨am Krucker.....Juliana Vievering，《FOXSI-2探空火箭探测到太阳日冕中的纳耀斑加热等离子体》，《自然天文学》**1**，771–774（2017）。

19 P. S. Athiray ，Juliana Vievering、Lindsay Glesener.....Daniel Ryan，《FOXSI-2 太阳微 -

耀斑。I. 多仪器差分发射测量分析与热能》，《天体物理学杂志》**891**，78（2020）。

20 Juliana T. Vievering、Lindsay Glesener、P. S. Athiray……S¨am Krucker，“FOXSI-2太阳微耀斑。II. 硬X射线成像光谱学和耀斑能量学”，《天体物理学杂志》**913**，15（2021）。

21 Buitrago-Casas, Juan Camilo、Glesener, Lindsay、Christe, Steven……Bale, Stuart D.，“利用FOXSI观测到的最微弱太阳日冕硬X射线”，《天文学与天体物理学》 **665**，A103（2022）。

22 Juan Camilo Buitrago-Casas、Juliana Vievering、Sophie Musset……Yixian Zhang，“FOXSI-4：用于观测太阳耀斑的高分辨率聚焦X射线火箭载荷”，载于第二十二届天文学紫外、*X*射线和伽马射线空间仪器学，Oswald H. Siegmund 编，**11821**，118210L，国际光学与光子学学会，SPIE（2021）。

23 Wayne H. Baumgartner、Stephen Bongiorno、Jeffery Kolodziejczak……C. Grant Davis，《FOXSI-4高分辨率全壳复制式X射线光学元件》，载于第十一届极紫外、*X*射线和伽马射线天文学光学，Stephen L. O’Dell、Jessica A. Gaskin、Giovanni Pareschi……Daniele Spiga 编，**12679**，126790C，国际光学与光子学学会，SPIE（2023年）。

24 Kazuki Ampuku、Koki Sakuta、Ryuto Fujii……Ikuyuki Mitsuishi，《太阳耀斑探测火箭FOXSI-4的X射线光学元件研制：地面标定》，载于《空间望远镜与仪器*2024*：从紫外线到伽马射线》，Jan-Willem A. den Herder、Shouleh Nikzad 和 Kazuhiro Nakazawa 编，**13093**，1309323，国际光学与光子学学会，SPIE（2024年）。

25 Riko Shimizu、Noriyuki Narukage、Taro Sakao……Rie Suzaki，《CMOS传感 -

器在搭载于探空火箭实验FOXSI-4上的太阳耀斑软X射线成像光谱学中的评估》，载于第十一届天文学*X*射线、光学和红外探测器会议，Andrew D. Holland和Kyriaki Minoglou编，**13103**，1310308，国际光学与光子学学会，SPIE（2024年）。

26 Shunsaku Nagasawa、Takahiro Minami、Shin Watanabe……Tadayuki Takahashi，《宽禁带碲化镉双面条纹探测器的成像与能谱性能》，《核仪器与方法：物理研究*A*辑》：加速器、光谱仪、探测器及相关设备**1075**，170362（2025年）。

27 Shunsaku Nagasawa、Takahiro Minami、Shin Watanabe……Tadayuki Takahashi，《用于硬X射线高分辨率成像的宽禁带碲化镉条纹探测器》，《核仪器与方法：物理研究*A*辑》：加速器、光谱仪、探测器及相关设备**1050**，168175（2023年）。

28 Anna Tosolini、Savannah Perez-Piel、Juan Camilo Buitrago-Casas…… Yusuke Yoshida，《FOXSI-5探空火箭载荷上Timepix3探测器性能的初步报告》，载于第十二届天文学*X*射线、光学和红外探测器会议，Kyriaki Minoglou和Konstantin D. Stefanov编，**14157**，141571X，国际光学与光子学学会，SPIE（2026年）。

29 Sanjiv K. Tiwari、Navdeep K. Panesar、Ronald L. Moore……Charles Kankelborg，《在M1.6级太阳耀斑的峰值后阶段，Hi-C Flare在11 MK辐射中捕捉到的一个突发精细尺度亮核》，《天体物理学杂志快报》**995**，L45（2025）。

30 Juan Camilo Buitrago-Casas，《FOXSI-5：面向太阳高分辨率聚焦X射线观测的火箭再次飞行》。NASA提案编号。23-HLCAS23-0009（2024年）。

31 Ryuto Fujii、Koki Sakuta、Kazuki Ampuku……Ikuyuki Mitsuishi，《太阳耀斑探测火箭FOXSI-4的X射线光学元件研制：振动测试》，载于*2024*年空间望远镜与仪器：从紫外线到伽马射线，Jan-Willem A. den Herder、Shouleh Nikzad和Kazuhiro Nakazawa编，**13093**，130936Y，国际光学与光子学学会，SPIE（2024年）。

32 Ryuto Fujii、Koki Sakuta、Kazuki Ampuku……Ikuyuki Mitsuishi，“连接同步辐射技术与空间天文学的电铸X射线光学元件开发”，太平洋天文学会出版物**138**，045003（2026年）。

33 Yusuke Yoshida、Koki Sakuta、Kazuki Ampuku……Ikuyuki Mitsuishi，“太阳耀斑探测火箭 FOXSI-4 的 X射线光学元件开发：光线追迹模拟”，载于 《空间望远镜与仪器*2024*：从紫外线到伽马射线》，Jan-Willem A. den Herder、Shouleh Nikzad 和 Kazuhiro Nakazawa 编，**13093**，130936W，国际光学与光子学学会、 SPIE （2024年）。

34 Yusuke Yoshida、Kazuki Ampuku、Koki Sakuta……Ikuyuki Mitsuishi，“太阳耀斑探测火箭 FOXSI-5 的 X射线光学元件开发”，载于 《空间望远镜与仪器*2026*：从紫外线到伽马射线》，Shouleh Nikzad、Kazuhiro Nakazawa 和 Marco Feroci 编，**14146**，141464K，国际光学与光子学学会、SPIE（2026年）。

35 Hidekazu Mimura、Yoshinori Takei、Takehiro Kume……Haruhiko Ohashi，《用于软X射线纳米聚焦的精密椭球面镜制造》，《科学仪器评论》**89**，093104（2018）。

36 Gota Yamag　uchi、Yusuke Matsuzawa、Takehiro Kume……Hidekazu Mimura，《高效且

精确地利用石英玻璃芯模通过镍电铸复制制造 Wolter I 型 X 射线反射镜》，*Reviewof ScientificInstruments* **94**，124501（2023）。

37 L. P. VanSpeybroeck 和 R. C. Chase，“用于 X 射线天文学的抛物面-双曲面望远镜设计参数”，《应用光学》**11**，440–445（1972年）。

38 Rozenn Boissay-Malaquin、Takayuki Hayashi、Keisuke Tamura . . . Meng Chiao，“X 射线成像与光谱任务（XRISM）X 射线反射镜组件的地面标定：I 测量装置与有效面积”，载于《空间望远镜与仪器 *2022*：从紫外线到伽马射线》，Jan-Willem A. den Herder、Shouleh Nikzad 和 Kazuhiro Nakazawa 编，**12181**，121811U，国际光学与光子学学会，SPIE（2022年）。

39 B.L. Henke、E.M. Gullikson 和 J.C. Davis，“X射线相互作用：在 E = 50-30,000 eV、Z = 1-92 时的光吸收、散射、透射和反射”，《原子数据与核数据表》**54**(2)，181–342（1993年）。

40 Yoshiyuki Tsusaka、Hisanori Suzuki、Koujun Yamashita……Yang Soong，《先进宇宙学与天体物理卫星 X射线望远镜的表征：飞行前标定与射线追迹》，《应用光学》**34**，4848–4856（1995）。

41 Kristin K. Madsen、Fiona A. Harrison、Craig B. Markwardt……William W. Zhang，《NuSTAR 高能聚焦 X 射线望远镜的标定》，《天体物理学杂志增刊系列》**220**，8（2015）。

42 Koji Mori、Takeshi Go Tsuru、Kazuhiro Nakazawa……William W. Zhang，《聚焦相对论宇宙与宇宙演化：FORCE 任务》，*PoS* **MULTIF2017**，077（2018年）。

Yusuke Yoshida 是名古屋大学 Uxg实验室的博士生。他于2024年和2026年分别在名古屋大学获得学士和硕士学位。他的研究兴趣包括X射线望远镜的研制。他是SPIE和日本天文学会的会员。他在SPIE天文望远镜 + 仪器2024年会议上获得海报奖。他从事FOXSI-4/5 X射线光学系统的研究，包括地面标定和建模。他正在开发用于立方体卫星和微型卫星的X射线仪器。

Ikuyuki Mitsuishi 于2012年获得东京大学物理学博士学位。目前，他是名古屋大学理学研究科的讲师。他领导了FOXSI-3探空火箭实验薄膜滤光片以及成像X射线偏振探测器（IXPE）热屏蔽罩的开发，还负责开发由日本提供、用于FOXSI-4和FOXSI-5探空火箭任务的软X射线和硬X射线光学系统。目前，他是COMIX（紧凑型模块化X射线成像仪）项目的首席研究员。该项目旨在为包括立方体卫星和微型卫星在内的小型空间平台开发超短焦距X射线光学元件和超薄石墨烯滤光片。他的观测研究兴趣涵盖广泛空间尺度上的高能天体物理现象，从恒星和银河系，到星暴星系、星系团以及宇宙中的大尺度结构。

其他作者的简介暂无。

图表目录

1 SPring-8 的 1 千米光束线 BL29XUL（左）和 NASA/GSFC 的 100 米束线（右）实验装置概览。

2 使用 HBX-KLAEES 在 SPring-8 BL29XUL 测得的 12 keV 条件下，作为离轴角 θ_y 和 θ_z函数的组合聚焦图像。

3 12 keV 下的聚焦图像及相应的 PSF 和包围能量函数。左上和右上面板分别显示从图2中选取的 $(\theta_y, \theta_z) = (0', 5.0')$ 和 $(0', 10.0')$ 处的聚焦图像。左下和右下面板分别显示根据这些图像计算得到的相应 PSF 和包围能量函数。轴上图像显示于 Fujii等（2026）的图6中。作为比较，左下和右下面板中还分别显示了轴上光线的 PSF 和包围能量函数。$(\theta_y, \theta_z) = (0', 0'), (0', 5.0'),$ 和 $(0', 10.0')$ 的数据分别以蓝色实线、橙色虚线和绿色点划线表示。

4 12 keV 下图2所示全部数据的离轴角对半功率直径的依赖性。横轴表示离轴角的绝对值，定义为$\theta = \sqrt{\theta_y^2 + \theta_z^2}$；纵轴表示以角秒为单位的半功率直径。测得的半功率直径值以蓝色圆圈表示，使用公式2得到的最佳拟合模型以橙色实线表示。

5 NASA/GSFC 100米X射线束线中轴上和离轴光线的测量有效面积与模型有效面积比较。各面板所示的离轴位置（θ_y，θ_z）为：(a)（$0'$，$0'$）；(b)（$2.5'$，$0'$）和（$5.0'$，$0'$）；(c)（$-2.5'$，$0'$）和（$-5.0'$，$0'$）；(d)（$0'$，$2.5'$）和（$0'$，$5.0'$）；(e)（$0'$，$-2.5'$）和（$0'$，$-5.0'$）；以及(f)（$2.5'$，$2.5'$）和（$-2.5'$，$-2.5'$）。测量数据以蓝色圆圈和绿色方块表示，相应的最佳拟合模型分别以橙色实线和红色虚线表示。

表格目录