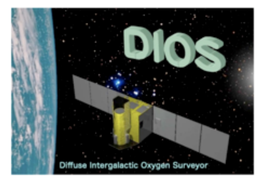
DIOS 衛星搭載用４回反射Ｘ線望遠鏡 FXT の開発の現状

P2-013 宇宙科学シンポジウム 2013.01.09-10

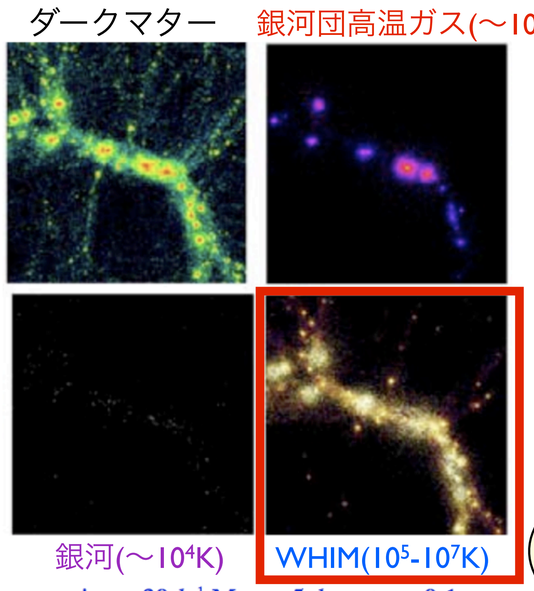
杉田聡司、 田原譲、 櫻井郁也 、渡辺剛、増田忠志、鳥居龍晴、松下幸司、立花健二、大西崇文 (名大)

Xray Astrophysics Nagoya University



DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)

ダークマター　銀河団高温ガス(～10^7K)



銀河(～10^4K)　WHIM(10^5-10^7K)

size = 30 h^{-1} Mpc ≈ 5 deg at z = 0.1

Yoshikawa et al. 2001, ApJ, 558, 520

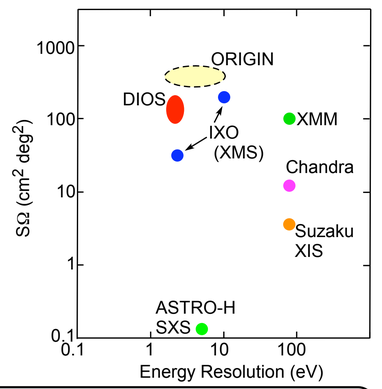
WHIM 観測
(銀河間中高温ガス：
Warm-Hot intergalactic medium
：10^5K - 10^7 K)
宇宙大規模構造のプローブ
-ダークマター
-ミッシング・バリオン
OVII, OVIII Kα 輝線
WHIM(10^6K)のベストプローブ

観測上の問題

- 観測天体が拡散
- 面輝度が低い
- 天の川銀河の豊富な放射輝線

→ 広視野 / 大有効面積 / 高エネルギー分解能 (TES型マイクロカロリメータ)

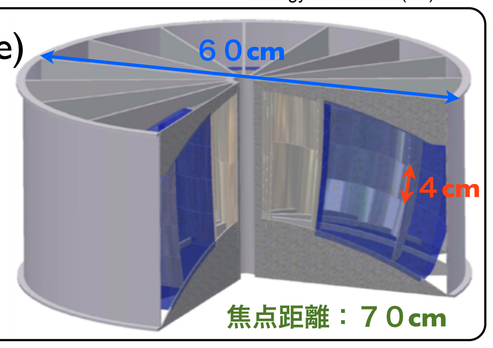
有効面積	200 cm²
視野	50' diameter
GRASP(SΩ)	100 cm²deg²@0.6keV
空間分解能	5' >
エネルギー分解能	5 eV > (FWHM)@0.5-1.5keV
観測帯域	0.3 - 1.5 keV
ミッションライフ	5 yr



FXT(Four-stage X-ray Telescope)

大有効面積・広視野を短焦点で実現

DIOSミッションに最適化した光学系を設計



FXT (Four-Stage X-ray Telescope)

Extended Wolter-I Optics

・DIOS の光学系は小型の焦点面検出器(TES)に対して広視野が要求される

・Wolter-I 型光学系を4段に拡張し、3, 4 段目に回転双曲面を追加することで、短焦点・広視野の光学系を実現する

Design parameters of DIOS-FXT

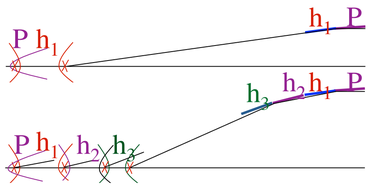
・Ext Wolter-I 型光学系は反射回数が増加するため低エネルギー帯域(DIOS-FXTの設計では 1.5 keV以下)に限られるが短焦点で大口径が可能となる

・ベースは Suzaku, ASTRO-H と同様に多重薄板型円錐近似望遠鏡

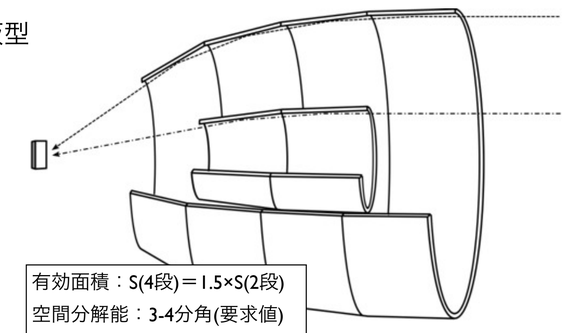
・小径部は 2 回反射、大径部は 4 回反射で設計

	DIOS-FXT	Suzaku-XRT
焦点距離	70 cm	450 cm
口径	60 cm	40 cm
反射鏡	4 cm	10 cm
円錐頂角	40.6 deg	3.8 deg
観測帯域	0.3 - 1.5 keV	0.3 - 10 keV
鏡面物質	C 25Å+Ni 25Å +Pt300Å	Au

Wolter-I optics: Parabola – Hyperbola

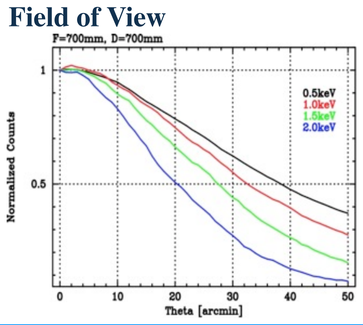


Extended Wolter-I optics:
Parabola –Hyperbola1 –H2 –H3

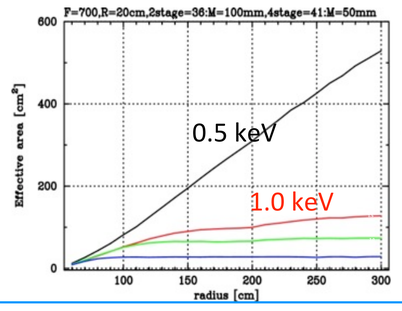


有効面積：S(4段)＝1.5×S(2段)
空間分解能：3-4分角(要求値)
位置決め誤差：＜8μm
形状誤差：0.2分角

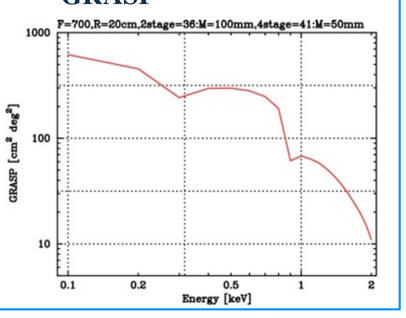
Field of View



Effective Area



GRASP



New fabrication method

New method of fabrication process

Suzaku, ASTRO-H と同様に、ミラー基板に反射金属をエポキシで接着するフォイル・レプリカ法で製作する

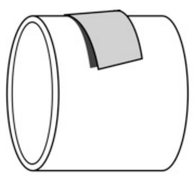
・FXT は円錐頂角が大きいため反射面転写用の円筒ガラスマンドレルと基板の形状差が大きくなる

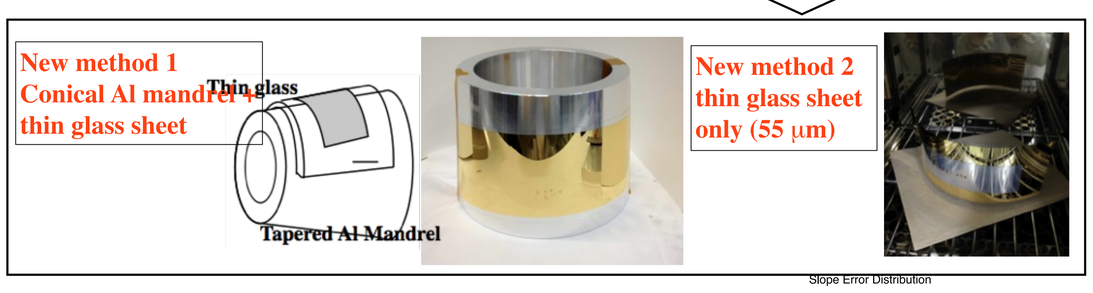
・マンドレル(蒸着金属)と基板を接着するエポキシ厚みの均一性が悪くなり反射面形状が悪くなる恐れがある

この形状差を解消するため、薄板ガラス(55-200 um)と金属円錐金型を組み合わせることで表面粗さと基板に沿った形状を確保したマンドレルの製作を進めている。薄板ガラスの厚さにより金属金型に薄板ガラスを巻く形式とガラスのみで基板に沿わせる 2 種類を検討している。

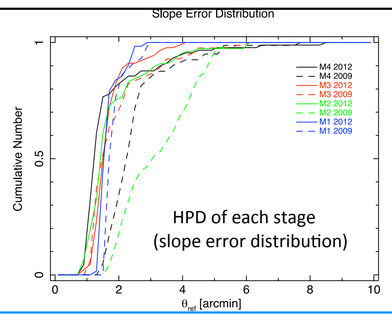
Geometry of FXT mirror of 180 mm diameter

Φ180	一回反射 焦点距離 (mm)	各段の半径 (Top-Bottom) (mm)	半径差 (mm)	円錐頂角 (deg)
M1	2810.6	89.97-89.33	0.64	0.9
M2	918.3	89.33-87.42	1.91	2.7
M3	533.9	87.42-84.26	3.16	4.5
M4	362.2	84.26-79.78	4.48	6.3





新方式によって製作されたミラーはスロープエラーの評価において前回の X 線テストモデルに使用したミラーより改善されていることが確認された。



X-ray Measurement of FXT demonstration model at NASA/MSFC

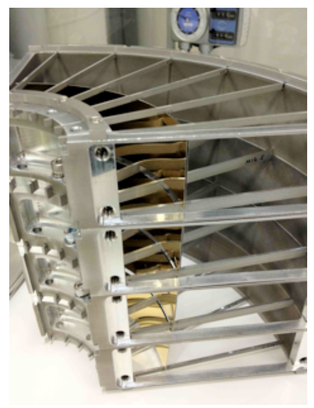
FXT demonstration model

我々は 2009 年に最初の FXT テストモデルを製作し、NASA/MSFC X線ビームラインで評価を行った。その結果焦点距離と有効面積はほぼ設計通りだったが結像性能が HPD で 11.4 分角と設計値を下回る結果となった。

この 2009 年のハウジングをベースに、ミラーを保持するアライメントバーの溝の遊びを 100 um から 20 um に減らし、新方式で製作したミラーを組み込んだ新テストモデルを製作した。

Parameters of FXT demonstration model

Focal length	700 mm
Diameter	180 mm
Height of mirror	40 mm
Incident angle	θ_{1st} = 0.90, θ_{4th} = 6.3 deg
Reflection surface	Au

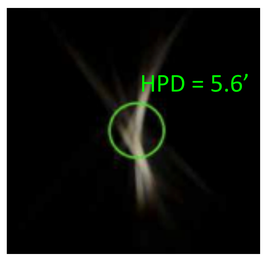


New FXT demonstration model with two nested ϕ180 mm mirror

Optical measurement

X線測定の前に、テストモデルの 4 回反射可視光イメージを取得し、 HPD で 5.6 分角が得られた。また反射光を無限円焦点のレンズ系で撮影することによってその輝度分布から母線方向と円周方向それぞれの形状誤差要素の評価を行った。

4-fold reflection focal plane image



Angular resolution error budget of 4th reflection

Slope error	arcmin
single reflection	1.5
four fold reflection	3.0
Circularity :	
single reflection	2.0
four fold reflection	4.0
(Positioning error	2.0)
Total :	5.4

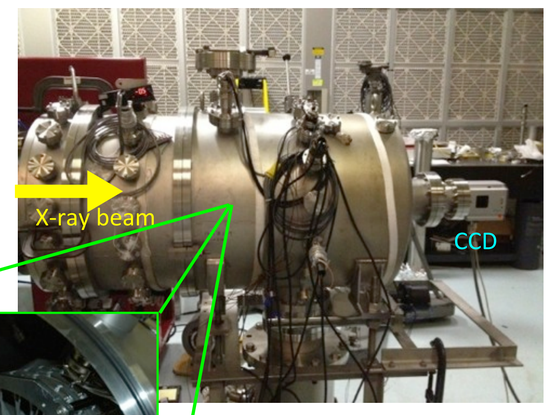
X-ray Measurement at NASA/MFSC

2012 年 5 月 7-13 日に MSFC の 100 m X線ビームラインにおいて性能評価を行った。X線のエネルギーは 1.5 keV (Al) 、焦点面検出器として CCD iKon-L DO936N を用いて、 On-Axis と pitch と yaw をそれぞれ ± 1° 傾けた Off-Axis イメージを取得した。

On-Axis イメージにおいて、焦点距離は設計値の 700 mm とほぼ一致(±1mm程度)し、結像性能に関しては HPD 5.5 分角が得られた。これは 2009 年のテストモデルから 2 倍の性能改善となりミッション要求値に大幅に近づいた。また可視光測定の結果とほぼ一致し、これにより実験室に設置した可視平行光による調整や性能評価システムが FXT の評価に有用であることが確認できた。

有効面積と Off-Axis のイメージは解析中である。

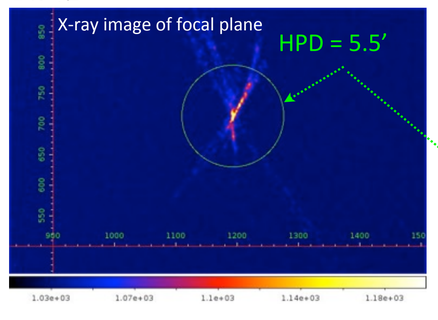
Vacuum chamber at MSFC 100 m beam line



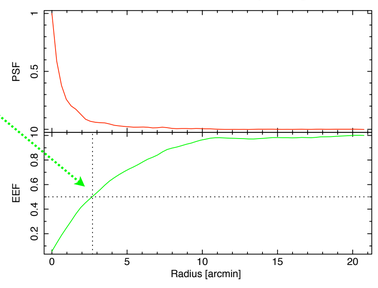
setup of FXT in the chamber

CCD	iKon-L DO936N-low-#BN	
	Active Pixels	2048 x 2048
	Pixel Size	13.5um x 13.5um
	Image Area	27.6mm x 27.6mm
	Frame Rate	0.92 frame/sec
	Efficency of CCD	80-70% (1.3-1.7keV)
Set up	Temp -40度、1MH at 16bit Gain x1	

X-ray	Al, 5keV, 0.17mA



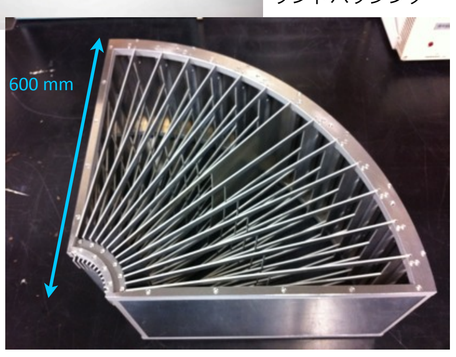
PSF and EEF of X-ray image



Full size test model

FXT-BBM の製作に向けて、我々は ASTRO-Hを超える (直径 600 mm) 大径のミラー開発およびフルサイズのクアドラントハウジングの設計、製作を行っている。

- 大径ミラー製作において、熱成形・転写金型の大型化を回避するため従来の全周型ではなく放電加工による 1/6 周金型の製作を行った
- ハウジングにおいては、ミラーの位置決め誤差とその調整の難易度を考慮した結果、従来のテストモデルとは異なり 4 段一体型とし、ミラーの保持も格段個別のバーではなく一枚のプレートとし、強度の観点から本数を 6 本から 13 本に増加した。プレートの加工は名古屋大学装置開発室で行い、QL 測定では溝の位置精度は要求値の ± 3 um 程度に収まっている

ϕ500 mm M4 金型

フルサイズクアドラントハウジング