

修士学位論文

次期X線天文衛星ASTRO-H搭載 軟X線望遠鏡の地上性能評価

指導教員 大橋 隆哉 教授

首都大学東京大学院
理工学研究科 物理学 専攻
学修番号 12879320
氏名 富川 和紀

平成 26 年 2 月 28 日

概要

X線望遠鏡の持つ高い角分解能と集光力はX線天文学に飛躍的な発展をもたらした。高い角分解能は観測天体の位置・空間構造を明らかにし、集光力は検出器の小型化とともにS/N比の向上を可能にした。

X線はレンズのような直入射光学系の場合、物質の吸収を受けてしまい効率よく集光させることが難しい。一方、X線は様々な物質に対して屈折率が1よりわずかに小さく、1度以下の非常に浅い入射角で全反射を起こす。この性質を利用してX線を反射・集光する光学系の一つにWolter I型斜入射光学系がある。Wolter I型は回転放物面鏡と回転双曲面鏡を組み合わせた構造になっており、従来の日本のX線天文衛星のX線望遠鏡はこの光学系が採用されてきた。しかし、光軸から見込む反射鏡の面積は非常に小さいため、集光されるX線は極めて少ない。この問題を解決するため、反射鏡を同心円状に多重に積層した多重薄板型X線望遠鏡が考案され、より多くのX線を集光できるようになった。現在運用中のX線天文衛星「すざく」は、この多重薄板型が採用されている。

2015年度打ち上げ予定の次期X線天文衛星ASTRO-Hに搭載される軟X線望遠鏡(Soft-X-ray-Telescope: SXT)は、「すざく」衛星と同じ多重薄板型を採用しており、Quadrantと呼ばれる4分の1円筒のものが4つ組み合わせられて1台の望遠鏡を構成している。

我々は2013年に宇宙科学研究所にて、SXT FM (Flight Model) の衛星アライメントや応答関数構築に向けた地上性能評価を行った。まず、衛星アライメントに必要な情報として、望遠鏡の光軸がどこを向いているのかを把握しておく必要がある。望遠鏡の入射面に装着したキューブミラーの法線を基準とし、望遠鏡光軸の離角をセオドライトで測定する。これは測定が比較的容易な可視光の平行光を用いて行った。測定は望遠鏡を光軸と重力方向が平行となる配置(縦置き)で行い、望遠鏡の内側、半径150 mmに可視光を当てたときの、光量が最大となる傾きを望遠鏡光軸として採用した。

X線による測定は宇宙科学研究所の30 m ビームラインで行った。長いビームラインを使用することで天体からのX線に近い、高い平行度をもつX線ビームを作ることができる。X線望遠鏡を評価する主なパラメータは有効面積と結像性能が挙げられ、これらには要求値(有効面積は1 keVで450 cm²、6 keVで390 cm²、結像性能は1.7分角)が個別に設定されている。測定の結果、望遠鏡全体の有効面積はAl-K (1.5 keV)で580 ± 1 cm²、Ti-K (4.5 keV)で445 ± 1 cm²となり、望遠鏡全体における結像性能はAl-K ~ Pt-L γ (1.5 keV ~ 12.94 keV)の6つのエネルギーで1.3 ~ 1.5分角となった。これらは全て要求値を十分満たしていることがわかった。しかしQuadrant単位で見ると、高エネルギーになるほど結像性能が悪化し、10 keV以上では要求値を越えてしまっているものがあることが判明した。このような個性は望遠鏡の小さな領域にX線を当てることでその性質を理解することができる。Quadrant全体を8 × 8 mmの領域に分け、それぞれの領域の結像位置のばらつきや像の広がりから、反射鏡の位置決め誤差や形状誤差を見積もることができる。これらは結像性能劣化の要因であり、このうち、結像性能の悪化は主に位置決め誤差によって引き起こされていることがわかった。

また、様々なoff-axis角における有効面積の変化を測定した。軌道上で複数の天体を同時に観測する場合や、広がった天体の場合、天体が放つX線はoff-axis角からの入射になる。この場合、本来の天体のfluxを見積もるためにはoff-axis角に対する有効面積の変化をモデル化して

おく必要がある。Al-K や Ti-K の低エネルギーでは、Lorentzian でよく再現できたが、Pt-L α などの高エネルギー側では、大きい off-axis 角の有効面積がモデルより小さくなる傾向があり、よりよく再現するためには適当な cut-off のモデルを入れることが必要であると推測される。

X 線望遠鏡はその構造ゆえに、視野外にある天体からの X 線がある角度では正規の 2 回反射をせずに焦点面検出器に到達する。このような X 線成分は迷光と呼ばれ、特に銀河団や宇宙 X 線背景放射などの広がった天体の観測精度を大きく低下させてしまう。そのため、バツフルの役割を果たすプリコリメータが望遠鏡の入射面の上に搭載されており、二段目の反射鏡だけで反射される迷光 (secondary only 成分) を遮断することを主な目的としている。そこで、プリコリメータによって secondary only 成分が遮断されているか、想定外の迷光が洩れ込んでいないかなどの検証を行った。その結果、プリコリメータによって secondary only 成分は大幅に低減されたことが確認できたが、最も内側に配置された一段目の反射鏡だけに反射する成分 ($\sim 0.20 \text{ cm}^2$) や、一度も反射せずに通り抜ける成分 ($\sim 0.05 \text{ cm}^2$) が相対的に目立つようになった。プリコリメータの構造上これらを遮断することはできず、その対策を施すことは非常に困難であるため、実際の観測では迷光が問題にならず運用できるよう、追測定を行い、迷光が出る場所を調査した。

本論文ではこれらの具体的な測定方法、および研究結果について述べる。

目次

第 1 章	序論	18
1.1	X 線天文学	18
1.2	X 線天文衛星	18
1.3	次期 X 線天文衛星 ASTRO-H	20
1.3.1	ASTRO-H が目指すサイエンス	20
1.3.2	ASTRO-H 搭載機器	20
第 2 章	X 線光学	25
2.1	反射の原理	25
2.1.1	トムソン散乱	25
2.1.2	X 線の全反射	28
2.2	表面粗さによる X 線の反射率と散乱	31
2.2.1	運動学的回折理論	31
2.2.2	表面粗さによる反射率の低下	32
2.2.3	散乱 X 線の強度	33
第 3 章	X 線望遠鏡	37
3.1	X 線望遠鏡に用いられる光学系	37
3.2	X 線望遠鏡の性能	37
3.2.1	集光力 (有効面積)	37
3.2.2	結像性能 (HPD、PSF、EEF)	38
3.3	迷光	41
3.3.1	X 線望遠鏡内での迷光の経路	42
3.3.2	検出器に洩れ込む迷光のパターン	42
3.4	X 線望遠鏡の種類	44
3.4.1	多重薄板型	44
3.4.2	直接研磨型	44
3.5	ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡	46
第 4 章	ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡の測定システム	48
4.1	可視光光学装置	48
4.1.1	平行光源	50
4.1.2	検出器	51
4.2	宇宙科学研究所 30mX 線ビームライン	53
4.2.1	X 線発生装置	55

4.2.2	真空系	56
4.2.3	透過型フィルター・二結晶分光器	58
4.2.4	四極スリット	62
4.2.5	測定チャンバー	63
4.2.6	検出器ステージ・望遠鏡ステージ	64
4.2.7	検出器	68
第5章	可視光測定 ~ 衛星アライメントに向けた光軸・結像位置の決定 ~	72
5.1	Vignetting	73
5.2	望遠鏡を横置きにしたときの望遠鏡光軸	73
5.2.1	測定方法	73
5.2.2	測定結果	77
5.3	望遠鏡を縦置きにしたときの望遠鏡光軸	81
5.3.1	測定方法	82
5.3.2	測定結果	83
5.4	結像位置の測定とその再現性	86
5.4.1	測定方法	86
5.4.2	測定結果	87
5.5	Quadrant 毎の焦点距離	89
5.5.1	測定方法	89
5.5.2	測定結果	91
第6章	X線測定 ~ 望遠鏡の全体評価 ~	95
6.1	地上較正試験	95
6.1.1	地上較正試験の目的	95
6.1.2	測定項目とその定義	96
6.2	X線測定に向けたアライメント	97
6.2.1	セオドライト、キューブミラー、X線軸の正対	97
6.2.2	検出器中心、望遠鏡中心、X線軸の正対	101
6.3	X線による望遠鏡光軸	102
6.3.1	測定方法	102
6.3.2	測定結果	103
6.4	有効面積	107
6.4.1	測定方法	108
6.4.2	測定結果	109
6.5	SXSの視野を想定した有効面積の測定	113
6.5.1	測定方法	113
6.5.2	測定結果	113
6.6	エネルギーの違いによる vignetting の変化	115
6.6.1	測定方法	115
6.6.2	測定結果	116
6.7	焦点距離	119

6.7.1	測定方法	119
6.7.2	測定結果	119
6.8	結像性能	127
6.8.1	測定方法	127
6.8.2	測定結果	127
6.9	望遠鏡に与える重力効果の評価	159
6.9.1	望遠鏡光軸	159
6.9.2	結像性能	161
6.10	PSF (Point Spread Function) の tail 測定	168
6.10.1	測定方法	168
6.10.2	測定結果	169
6.11	迷光	171
6.11.1	プリコリメータによる secondary only 成分の遮断	171
6.11.2	測定方法	173
6.11.3	測定結果	176
第 7 章	X 線測定 ~ ローカルな部分の性能評価 ~	187
7.1	結像性能劣化の要因	187
7.2	結像性能劣化要因の分離	191
7.2.1	測定方法	191
7.2.2	測定結果	193
第 8 章	考察	219
8.1	可視光と X 線の望遠鏡光軸の比較	219
8.2	有効面積	221
8.3	結像性能	223
8.4	迷光	226
第 9 章	まとめと今後の展望	227
9.1	まとめ	227
9.2	今後の展望	228
9.2.1	SXT-2 号機の地上性能評価	228
9.2.2	応答関数の構築	228
9.2.3	No.1 に起因した迷光成分の遮断	229

目 次

1.1	X線天文衛星の性能の変遷（左上：空間分解能、右上：エネルギー分解能、下：検出感度）	19
1.2	ASTRO-H に搭載される観測機器の配置	24
2.1	電子によるトムソン散乱の散乱角依存性。	26
2.2	金の複素原子散乱因子と光学定数。（図左は金の複素原子散乱因子 f_1, f_2 、図右は金の密度を $19.32 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ としたときの光学定数 δ, β である。両図とも横軸にエネルギーをとる。）	27
2.3	プラチナの複素原子散乱因子と光学定数。（図左はプラチナの複素原子散乱因子 f_1, f_2 、図右は金の密度を $21.45 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ としたときの光学定数 δ, β である。両図とも横軸にエネルギーをとる。）	28
2.4	単層膜の理論反射率。	30
2.5	大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱。	32
2.6	物質表面による X 線の散乱。	32
2.7	粗さのある物質面上での散乱と反射。	32
2.8	回折格子による X 線の散乱。	35
3.1	左：回転放物面反射鏡、右：Wolter I 型反射鏡。	37
3.2	様々な衛星に搭載される X 線望遠鏡の有効面積。（XRT-S は望遠鏡 1 台の有効面積、その他は mission 全体の有効面積である。）- AE は ASTRO-E の略である。	38
3.3	焦点面のイメージ。左：等高線で表したものと、右：3 次元的に表したもの。	39
3.4	Point Spread Function (1 次元)。焦点面のイメージを動径方向に積分し (左)、1 次元の PSF を作る (右)。	39
3.5	PSF、EEF、HPD の関係	40
3.6	視野外に明るい点源がある場合に検出器上に洩れ込む迷光の概念図。	41
3.7	ASCA 衛星に搭載された GIS で観測されたカニ星雲からの迷光のイメージ。- カニ星雲は GIS 中心から左下に $60'$ 離れた位置にある。左下の明るい部分は 2 段目のフォイルで 1 回だけ反射される成分、右上の暗い部分は背面反射成分。	41
3.8	X 線望遠鏡内部の迷光の経路。	42
3.9	Ray-Tracing による迷光のイメージ (Al-K α : 1.49 keV)。- 上：焦点面全面、中央：XIS の視野内の secondary only 成分、下：XIS の視野内の backside 成分。左：off-axis 角= $30'$ 、右：off-axis 角= $60'$ 。	43
3.10	X 線望遠鏡の断面図。- 複数の反射鏡を同心円共焦点配置に組み込んだ、斜入射型 (Wolter-I) X 線望遠鏡の断面図。	44

3.11 「多重薄板型」X線望遠鏡。-写真はASTRO-EのXRTである。～180 μmという薄さの反射鏡(基板:アルミニウム)が0.5～1.2mm間隔で175枚も並べられている。1台20kgという軽さで大有効面積を実現する。	45
3.12 「直接研磨型」X線望遠鏡。-写真はChandraのXRTである。数cmの厚さの反射鏡(基板:ガラス)が4枚並べられている。鏡面を直接研磨しているため、結像性能が非常に良い。しかし重さは1台で1トンもある。	45
3.13 SXT FMの外観。	46
3.14 SXTの構造。左:SXTのQuadrantの領域。右:上から順番にプリコリメータ、Pprimary、Secondary。	46
4.1 衛星アライメントの概要。	49
4.2 愛媛大の平行光源。平行度は約5秒角。	50
4.3 CMOSカメラ。	51
4.4 左:右から順番にBITRAN BS-42N CCDカメラ、NIKON Ai AF Micro-Nikkor レンズ、レンズと望遠鏡に固定するための治具。右:くみ上げた様子。各接続部はアラルダイトで固着している。	52
4.5 宇宙科学研究所X線ビームラインのチャンバー配置図。	54
4.6 X線発生装置の構成図。	55
4.7 宇宙科学研究所ビームラインにおける真空・排気装置の全体図。	57
4.8 フィルターの透過率。	58
4.9 大気室チェンバー中のフィルターの配置図。	59
4.10 30m ビームライン搭載 DCM の結晶配置図。- A_θ 軸ステージの中心に第1結晶面が置かれており、X線は常に第1結晶の同じ位置に入射する。	60
4.11 Cu-K α (8.04 keV) 付近のロッキングカーブ。- DCMを回転させ、入射角度を変えていったときの光量変化を表している。30m ビームライン搭載 DCM は Cu-K α_1, α_2 を区別することができる。	60
4.12 DCM での2回反射。- DCMに入射したX線はDCM前後でビームに垂直な方向に Δx ずれる。	61
4.13 四極スリットの構成図。	62
4.14 測定チャンバーの3Dイメージ。	63
4.15 左:ビームライン最下流から見た測定チャンバーの外観。右:チャンバー上流側のドアから下流側に見たチャンバー内部。	64
4.16 上:望遠鏡ステージ、下左:検出器ステージ、下右:検出器微調整ステージの概要図。	66
4.17 左:ビームライン最下流から見た測定チャンバーの外観。右:チャンバー上流側のドアから下流側に見たチャンバー内部。	67
4.18 左:ステージドライバ付近。右:ステージコントローラ付近。信号線にフェライトが装着されている。	67
4.19 背面照射型 CCD カメラの原理 - 上:前面照射型と背面照射型の断面図、下:電荷転送の概念図。	69
4.20 ショートカットラスタースキャンの模式図。	71

5.1	Top 側に付けられているキューブミラー。写真上方向の面がキューブミラーの法線（衛星 z 軸）。	73
5.2	横置き時のステージの座標と望遠鏡の向き の定義。	74
5.3	ドラムに望遠鏡を載せる。	75
5.4	折り返し光学系の高さを調整する。	75
5.5	セオドライトで覗いたときの光の位置関係。	76
5.6	検出器を焦点距離 (5600 mm) に設置する。	76
5.7	望遠鏡の内側の領域に平行光があたるように半径 170 mm の穴が空いたマスクを付ける。	76
5.8	Q1 θ_y 方向の vignetting。	78
5.9	Q1 θ_z 方向の vignetting。	78
5.10	Q2 θ_y 方向の vignetting。	78
5.11	Q2 θ_z 方向の vignetting。	78
5.12	Q3 θ_y 方向の vignetting。	78
5.13	Q3 θ_z 方向の vignetting。	78
5.14	Q4 θ_y 方向の vignetting。	79
5.15	Q4 θ_z 方向の vignetting。	79
5.16	各 Quadrant を U-side に置いたときの望遠鏡光軸。	80
5.17	各 configuration の望遠鏡光軸を Q1U 相当の望遠鏡光軸に変換したもの。印は平均光軸。	80
5.18	縦置き時のステージの座標と望遠鏡の向き の定義。	81
5.19	折り返し光学系の高さを調整する。地面から反射鏡中心までの高さは約 140 cm。	82
5.20	やぐらは θ_y, θ_z 軸の調整が可能。	82
5.21	望遠鏡に半径 150 mm の穴が空いたマスクを取り付ける。	82
5.22	Q1 θ_y 方向の vignetting。	83
5.23	Q1 θ_z 方向の vignetting。	83
5.24	Q2 θ_y 方向の vignetting。	84
5.25	Q2 θ_z 方向の vignetting。	84
5.26	Q3 θ_y 方向の vignetting。	84
5.27	Q3 θ_z 方向の vignetting。	84
5.28	Q4 θ_y 方向の vignetting。	84
5.29	Q4 θ_z 方向の vignetting。	84
5.30	各 Quadrant を S-side に置いたときの望遠鏡光軸。	85
5.31	各 configuration の望遠鏡光軸を Q1S 相当の望遠鏡光軸に変換したもの。印は平均光軸。	85
5.32	カメラシステム の概念図。実線矢印は平行光の道筋、点線矢印はスクリーンに写った像の道筋。	86
5.33	望遠鏡の中心に CCD カメラを立てる。	87
5.34	袋ナットを用いた 3 点支持の様子。左：袋ナットでキューブ治具にカメラシステムをとりつけた様子。右：袋ナットがあたるキューブ治具部分。ネジでうめきがしてある。	87

5.35	CCD1 による結像位置。	88
5.36	CCD2 による結像位置。	88
5.37	焦点距離と像の形 (LR 法)	89
5.38	検出器と SXT の焦点距離の関係。	90
5.39	Q1 θ_y 方向の vignetting。	91
5.40	Q1 θ_z 方向の vignetting。	91
5.41	Q2 θ_y 方向の vignetting。	92
5.42	Q2 θ_z 方向の vignetting。	92
5.43	Q3 θ_y 方向の vignetting。	92
5.44	Q3 θ_z 方向の vignetting。	92
5.45	Q4 θ_y 方向の vignetting。	92
5.46	Q4 θ_z 方向の vignetting。	92
5.47	Quadrant 毎の焦点距離 (5600 mm) からのずれ。縦軸は光量の比、横軸は焦点距離からのずれ。イメージの半分の領域の光量の比を赤線と黒線で表している。データは Linear + Constant でフィット。左上: Q1U、右上: Q2U、左下: Q3U、右下: Q4U。	94
6.1	D1F ビームラインの概略図。矢印があるところのピンホールやスリットを用いてセオドライトを X 線軸に正対させた。3 回測定を繰り返し、5 秒角程度で正対できている。	98
6.2	セオドライトから見た角度の関係。	100
6.3	口の字ラスタースキャン。	101
6.4	口の字ラスタースキャンで得られたイメージ。	102
6.5	Q1 θ_y 方向の vignetting。	103
6.6	Q1 θ_z 方向の vignetting。	103
6.7	Q2 θ_y 方向の vignetting。	104
6.8	Q2 θ_z 方向の vignetting。	104
6.9	Q3 θ_y 方向の vignetting。	104
6.10	Q3 θ_z 方向の vignetting。	104
6.11	Q4 θ_y 方向の vignetting。	104
6.12	Q4 θ_z 方向の vignetting。	104
6.13	望遠鏡光軸 θ_y 方向の vignetting。	105
6.14	望遠鏡光軸 θ_z 方向の vignetting。	105
6.15	Q1U における各 Quadrant の X 線光軸と、望遠鏡全体の X 線光軸。	106
6.16	SXT の理想的な有効面積のエネルギー依存性。	107
6.17	左: ペンシルビームを用いた望遠鏡測定の様式図。望遠鏡の光軸と検出器を同期して動かす、望遠鏡入射面全面をペンシルビームで走査する。右: Q1U をラスタースキャンするステージの経路の例。	109

6.18	望遠鏡光軸における有効面積のエネルギー依存性。 は Q1U、×は Q2C、 は Q3D、 は Q4W、 は Quadrant4つを合計した有効面積を表し、◇はすざく衛星、+は要求値の有効面積を表す。青色の曲線と点線はそれぞれ反射鏡の表面粗さを 4\AA としたときの望遠鏡1台の有効面積の理想値と予想値(理想値の80%)、紫の曲線と点線はそれぞれ表面粗さを 4\AA としたときの Quadrant1つの有効面積の理想値と予想値(理想値の80%)を表す。	110
6.19	DCMによるX線軸のずれに伴う光軸補正の概念図。紫の直線が本来のX線軸で、紫の点線がDCM挿入時のX線軸である。X線軸と光軸を正対させるため、軸が傾いた分だけ望遠鏡も傾ける必要がある。	112
6.20	望遠鏡光軸における Q1 の vignetting。	114
6.21	望遠鏡光軸における Q2 の vignetting。	114
6.22	望遠鏡光軸における Q3 の vignetting。	114
6.23	望遠鏡光軸における Q4 の vignetting。	114
6.24	望遠鏡光軸における望遠鏡全体の vignetting。	114
6.25	斜め 45° vignetting の測定点マップ。	115
6.26	斜め 45° vignetting の軸の関係。黄色い軸に関して傾ける。	116
6.27	Al- $K\alpha$ の有効面積角度依存性。	117
6.28	Ti- $K\alpha$ の有効面積角度依存性。	117
6.29	Cu- $K\alpha$ の有効面積角度依存性。	117
6.30	Pt- $L\alpha$ の有効面積角度依存性。	117
6.31	Pt- $L\beta$ の有効面積角度依存性。	117
6.32	Pt- $L\gamma$ の有効面積角度依存性。	117
6.33	多色での比較。スケールは liner。	118
6.34	多色での比較。スケールは log。	118
6.35	Q1U の焦点距離イメージ。左上： $\Delta FL - 40$ mm、真ん中左： $\Delta FL - 20$ mm、下： $\Delta FL 0$ mm、真ん中右： $\Delta FL + 20$ mm、右上： $\Delta FL + 40$ mm	120
6.36	Q2C の焦点距離イメージ。左上： $\Delta FL - 40$ mm、真ん中左： $\Delta FL - 20$ mm、下： $\Delta FL 0$ mm、真ん中右： $\Delta FL + 20$ mm、右上： $\Delta FL + 40$ mm	121
6.37	Q3D の焦点距離イメージ。左上： $\Delta FL - 40$ mm、真ん中左： $\Delta FL - 20$ mm、下： $\Delta FL 0$ mm、真ん中右： $\Delta FL + 20$ mm、右上： $\Delta FL + 40$ mm	122
6.38	Q4W の焦点距離イメージ。左上： $\Delta FL - 40$ mm、真ん中左： $\Delta FL - 20$ mm、下： $\Delta FL 0$ mm、真ん中右： $\Delta FL + 20$ mm、右上： $\Delta FL + 40$ mm	123
6.39	Q1 における LR 法。	124
6.40	Q2 における LR 法。	124
6.41	Q3 における LR 法。	124
6.42	Q4 における LR 法。	124
6.43	Q1 における HPD 法。	125
6.44	Q2 における HPD 法。	125
6.45	Q3 における HPD 法。	125
6.46	Q4 における HPD 法。	125

6.47 X線 (LR法&HPD法) と可視光による焦点距離の比較。縦軸は設計値からのずれを表す。	126
6.48 Al-K α における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	128
6.49 Al-K α における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	129
6.50 Al-K α における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	130
6.51 Al-K α における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	131
6.52 Al-K α における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上：Quadrant 毎の PSF の比較、右上：Quadrant 毎の EEF の比較、中央左：XRT の PSF、中央右：XRT の EEF、下：XRT のイメージ。	132
6.53 Ti-K α における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	133
6.54 Ti-K α における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	134
6.55 Ti-K α における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	135
6.56 Ti-K α における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	136
6.57 Ti-K α における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上：Quadrant 毎の PSF の比較、右上：Quadrant 毎の EEF の比較、中央左：XRT の PSF、中央右：XRT の EEF、下：XRT のイメージ。	137
6.58 Cu-K α における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projeccuon X 方向、右上：イメージの projeccuon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	138
6.59 Cu-K α における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projeccuon X 方向、右上：イメージの projeccuon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	139
6.60 Cu-K α における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projeccuon X 方向、右上：イメージの projeccuon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	140
6.61 Cu-K α における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projeccuon X 方向、右上：イメージの projeccuon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	141
6.62 Cu-K α における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上：Quadrant 毎の PSF の比較、右上：Quadrant 毎の EEF の比較、中央左：XRT の PSF、中央右：XRT の EEF、下：XRT のイメージ。	142
6.63 Pt-L α における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlaon X 方向、右上：イメージの projecptlaon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	143
6.64 Pt-L α における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlaon X 方向、右上：イメージの projecptlaon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	144

6.65	Pt- $L\alpha$ における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlaon X 方向、右上：イメージの projecptlaon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	145
6.66	Pt- $L\alpha$ における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlaon X 方向、右上：イメージの projecptlaon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	146
6.67	Pt- $L\alpha$ における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上：Quadrant 毎の PSF の比較、右上：Quadrant 毎の EEF の比較、中央左：XRT の PSF、中央右：XRT の EEF、下：XRT のイメージ。	147
6.68	Pt- $L\beta$ における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlbon X 方向、右上：イメージの projecptlbon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	148
6.69	Pt- $L\beta$ における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlbon X 方向、右上：イメージの projecptlbon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	149
6.70	Pt- $L\beta$ における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlbon X 方向、右上：イメージの projecptlbon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	150
6.71	Pt- $L\beta$ における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlbon X 方向、右上：イメージの projecptlbon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	151
6.72	Pt- $L\beta$ における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上：Quadrant 毎の PSF の比較、右上：Quadrant 毎の EEF の比較、中央左：XRT の PSF、中央右：XRT の EEF、下：XRT のイメージ。	152
6.73	Pt- $L\gamma$ における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlgon X 方向、右上：イメージの projecptlgon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	153
6.74	Pt- $L\gamma$ における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlgon X 方向、右上：イメージの projecptlgon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	154
6.75	Pt- $L\gamma$ における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlgon X 方向、右上：イメージの projecptlgon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	155
6.76	Pt- $L\gamma$ における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projecptlgon X 方向、右上：イメージの projecptlgon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。	156
6.77	Pt- $L\gamma$ における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上：Quadrant 毎の PSF の比較、右上：Quadrant 毎の EEF の比較、中央左：XRT の PSF、中央右：XRT の EEF、下：XRT のイメージ。	157
6.78	Quadrant 毎の HPD のエネルギー依存性。	158
6.79	Q3U における光軸を Q1U 相当に変換した光軸。	160

6.80 Q1D の PSF。	162
6.81 Q1D の EEF。	162
6.82 Q1D のイメージ。	162
6.83 Q1U のイメージ。	162
6.84 Q2W の PSF。	163
6.85 Q2W の EEF。	163
6.86 Q2W のイメージ。	163
6.87 Q2C のイメージ。	163
6.88 Q3U の PSF。	164
6.89 Q3U の EEF。	164
6.90 Q3U のイメージ。	164
6.91 Q3D のイメージ。	164
6.92 Q4C の PSF。	165
6.93 Q4C の EEF。	165
6.94 Q4C のイメージ。	165
6.95 Q4W のイメージ。	165
6.96 Q3U における XRT の PSF。	166
6.97 Q3U における XRT の EEF。	166
6.98 Q3U における XRT のイメージ。	166
6.99 Q1U における XRT のイメージ。	166
6.100 Q1U と Q3U における HPD の比較。	167
6.101 検出器を上下にずらすことで SXI の視野をカバーする。	168
6.102 PSF tail 測定 の概念図。	168
6.103 SXI の視野。 Nominal position から最大で 33.5 分角の視野をカバーする。	169
6.104 Al-K α のイメージ。	170
6.105 Al-K α における PSF tail。	170
6.106 Ti-K α のイメージ。	170
6.107 Ti-K α における PSF tail。	170
6.108 Cu-K α のイメージ。	170
6.109 Cu-K α における PSF tail。	170
6.110 Al-K α 、Ti-K α 、Cu-K α における PSF tail の比較。	171
6.111 プリコリメータを搭載した望遠鏡の断面図。 - 一段目のフォイルの真上に望遠鏡と同じ 同心円上の円筒を立てることで、反射鏡すれすれを通過する迷光を取り除くことができる。	172
6.112 Ray-tracing によるシミュレーション。左：On-axis、中央：+30'、右：-30'。	173
6.113 迷光の経路。反射鏡に番号を振って光子の反射経路を定義する。	173
6.114 Quadrant の配置の定義と測定方法の概念図。	174
6.115 セクタースキンの概念図。	175
6.116 off-axis 角 +30' における迷光の分布。	176
6.117 off-axis 角 -30' における迷光の分布。	176
6.118 Al-K α と Cu-K α の有効面積の比較。	177
6.119 イメージ全体の有効面積と SXS の視野での有効面積の比較。	177

6.120	-60' ~ +60' の迷光のイメージ。1' ピッチ。@Al-K α	178
6.121	-60' ~ +60' の迷光のイメージ。1' ピッチ。@Cu-K α	179
6.122	off-axis 角 -30' におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α	180
6.123	off-axis 角 -30' におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α	180
6.124	off-axis 角 -15' におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α	181
6.125	off-axis 角 -15' におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α	181
6.126	on-axis におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α	182
6.127	on-axis におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α	182
6.128	off-axis 角 +15' におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α	183
6.129	off-axis 角 +15' におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α	183
6.130	off-axis 角 +30' におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α	184
6.131	off-axis 角 +30' におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α	184
6.132	off-axis 角 +45' におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α	185
6.133	off-axis 角 +45' におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α	185
6.134	off-axis 角 +60' におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α	186
6.135	off-axis 角 +60' におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α	186
7.1	反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり。	188
7.2	左：スポットスキヤンのイメージ、右：各スポットでの結像位置を一点に合わせたイメージ。	189
7.3	反射鏡の形状による像の広がり。	189
7.4	各スポットの結像位置のばらつきの例。原点が Quadrant の結像位置となっている。	190
7.5	Quadrant の結像位置から測定点の半数が収まる直径を位置決め誤差とする。縦軸は測定数で規格化している。	190
7.6	反射鏡の位置決めによる像の広がり。	190
7.7	レンズの公式。	192
7.8	スポットスキヤンの概念図。	192
7.9	左：Q1 のスポットイメージ、右：各スポットでの結像位置を一点に合わせたイメージ。	194
7.10	各スポットにおける結像位置のばらつきの分布。	194
7.11	各スポットの HPD マップ。	195
7.12	Quadrant の結像位置から各スポットの結像中心のずれ。	195
7.13	Quadrant の結像位置を中心にして求めた各 spot の HPD マップ。	195
7.14	各スポットが反射する光量の度合い。Direct の光量を 1 としている。	195
7.15	半径 55 mm ~ 84 mm にある各スポットの結像位置。	196
7.16	半径 84 mm ~ 113 mm にある各スポットの結像位置。	196
7.17	半径 113 mm ~ 142 mm にある各スポットの結像位置。	196
7.18	半径 142 mm ~ 171 mm にある各スポットの結像位置。	196
7.19	半径 171 mm ~ 200 mm にある各スポットの結像位置。	197
7.20	半径 200 mm ~ 230 mm にある各スポットの結像位置。	197
7.21	各半径毎の結像位置を重ね合わせたもの。	197

7.22	-45 ° ~ -30 ° にある各スポットの結像位置。	198
7.23	-30 ° ~ -15 ° にある各スポットの結像位置。	198
7.24	-15 ° ~ 0 ° にある各スポットの結像位置。	198
7.25	0 ° ~ +15 ° にある各スポットの結像位置。	198
7.26	+15 ° ~ +30 ° にある各スポットの結像位置。	199
7.27	+30 ° ~ +45 ° にある各スポットの結像位置。	199
7.28	各角度毎の結像位置を重ね合わせたもの。	199
7.29	左：Q2 のスポットイメージ、右：各スポットでの結像位置を一点に合わせたイメージ。	200
7.30	各スポットにおける結像位置のばらつきの分布。	200
7.31	各スポットの HPD マップ。	201
7.32	Quadrant の結像位置から各スポットの結像中心のずれ。	201
7.33	Quadrant の結像位置を中心にして求めた各 spot の HPD マップ。	201
7.34	各スポットが反射する光量の度合い。Direct の光量を 1 としている。	201
7.35	半径 55 mm ~ 84 mm にある各スポットの結像位置。	202
7.36	半径 84 mm ~ 113 mm にある各スポットの結像位置。	202
7.37	半径 113 mm ~ 142 mm にある各スポットの結像位置。	202
7.38	半径 142 mm ~ 171 mm にある各スポットの結像位置。	202
7.39	半径 171 mm ~ 200 mm にある各スポットの結像位置。	203
7.40	半径 200 mm ~ 230 mm にある各スポットの結像位置。	203
7.41	各半径毎の結像位置を重ね合わせたもの。	203
7.42	-45 ° ~ -30 ° にある各スポットの結像位置。	204
7.43	-30 ° ~ -15 ° にある各スポットの結像位置。	204
7.44	-15 ° ~ 0 ° にある各スポットの結像位置。	204
7.45	0 ° ~ +15 ° にある各スポットの結像位置。	204
7.46	+15 ° ~ +30 ° にある各スポットの結像位置。	205
7.47	+30 ° ~ +45 ° にある各スポットの結像位置。	205
7.48	各角度毎の結像位置を重ね合わせたもの。	205
7.49	左：Q3 のスポットイメージ、右：各スポットでの結像位置を一点に合わせたイメージ。	206
7.50	各スポットにおける結像位置のばらつきの分布。	206
7.51	各スポットの HPD マップ。	207
7.52	Quadrant の結像位置から各スポットの結像中心のずれ。	207
7.53	Quadrant の結像位置を中心にして求めた各 spot の HPD マップ。	207
7.54	各スポットが反射する光量の度合い。Direct の光量を 1 としている。	207
7.55	半径 55 mm ~ 84 mm にある各スポットの結像位置。	208
7.56	半径 84 mm ~ 113 mm にある各スポットの結像位置。	208
7.57	半径 113 mm ~ 142 mm にある各スポットの結像位置。	208
7.58	半径 142 mm ~ 171 mm にある各スポットの結像位置。	208
7.59	半径 171 mm ~ 200 mm にある各スポットの結像位置。	209
7.60	半径 200 mm ~ 230 mm にある各スポットの結像位置。	209

7.61	各半径毎の結像位置を重ね合わせたもの。	209
7.62	-45 °～ -30 °にある各スポットの結像位置。	210
7.63	-30 °～ -15 °にある各スポットの結像位置。	210
7.64	-15 °～ 0 °にある各スポットの結像位置。	210
7.65	0 °～ +15 °にある各スポットの結像位置。	210
7.66	+15 °～ +30 °にある各スポットの結像位置。	211
7.67	+30 °～ +45 °にある各スポットの結像位置。	211
7.68	各角度毎の結像位置を重ね合わせたもの。	211
7.69	左：Q4 のスポットイメージ、右：各スポットでの結像位置を一点に合わせたイメージ。	212
7.70	各スポットにおける結像位置のばらつきの分布。	212
7.71	各スポットの HPD マップ。	213
7.72	Quadrant の結像位置から各スポットの結像中心のずれ。	213
7.73	Quadrant の結像位置を中心にして求めた各 spot の HPD マップ。	213
7.74	各スポットが反射する光量の度合い。Direct の光量を 1 としている。	213
7.75	半径 55 mm ～ 84 mm にある各スポットの結像位置。	214
7.76	半径 84 mm ～ 113 mm にある各スポットの結像位置。	214
7.77	半径 113 mm ～ 142 mm にある各スポットの結像位置。	214
7.78	半径 142 mm ～ 171 mm にある各スポットの結像位置。	214
7.79	半径 171 mm ～ 200 mm にある各スポットの結像位置。	215
7.80	半径 200 mm ～ 230 mm にある各スポットの結像位置。	215
7.81	各半径毎の結像位置を重ね合わせたもの。	215
7.82	-45 °～ -30 °にある各スポットの結像位置。	216
7.83	-30 °～ -15 °にある各スポットの結像位置。	216
7.84	-15 °～ 0 °にある各スポットの結像位置。	216
7.85	0 °～ +15 °にある各スポットの結像位置。	216
7.86	+15 °～ +30 °にある各スポットの結像位置。	217
7.87	+30 °～ +45 °にある各スポットの結像位置。	217
7.88	各角度毎の結像位置を重ね合わせたもの。	217
7.89	各 Quadrant の形状誤差と位置決め誤差の比較。	218
8.1	可視光と X 線による望遠鏡光軸の比較。	219
8.2	可視光と X 線による Quadrant 光軸の比較。	220
8.3	理想値に対する実験値の比の平均の標準偏差の変化。	223
8.4	反射鏡の傾斜角と臨界角の関係。	224
8.5	Q3 の半径 55 mm ～ 155 mm の領域における形状誤差。	225
8.6	Q3 の半径 55 mm ～ 155 mm の領域における位置決め誤差。	225
8.7	半径毎の形状誤差。	225
8.8	位相角毎の形状誤差。	225
8.9	半径毎の位置決め誤差。	226
8.10	位相角毎の位置決め誤差。	226

表 目 次

1.1	SXT の設計パラメータ。	21
1.2	HXT の設計パラメータ。	22
1.3	SXS への性能要求。	22
1.4	SXI 諸元。	23
1.5	HXI への性能要求。	23
1.6	SGD への性能要求。	24
2.1	金とプラチナの臨界面。	30
3.1	SXT の設計パラメータ。	47
4.1	愛媛大平行光源の仕様。	50
4.2	CMOS カメラの仕様。	51
4.3	CCD カメラの仕様。 BITRAN 製。	52
4.4	レンズの仕様。 Nikon 製。	53
4.5	X 線発生装置の仕様。	56
4.6	特性 X 線と対応するフィルターの種類。	58
4.7	望遠鏡ステージ、検出器ステージの基本情報。	65
4.8	ガスフロー型比例計数管の仕様。	68
4.9	マルチチャンネルアナライザー MCA8000A の仕様。	68
4.10	背面照射型 CCD カメラの仕様。	70
5.1	望遠鏡に平行光を当てる条件とそれに準じた測定項目。	72
5.2	測定条件。	77
5.3	Vignetting のフィット結果。ローレンツ+定数でフィット。誤差は 90%エラー。	79
5.4	各 Quadrant を U-side にしたときのキューブミラー法線と光軸の離角。	80
5.5	Q1U 相当の望遠鏡光軸に変換したときのキューブミラー法線と光軸の離角。 Average は各光軸の算術平均。	80
5.6	横置き時と縦置き時の side の相関。	81
5.7	測定条件。	83
5.8	Vignetting のフィット結果。ローレンツ+定数でフィット。誤差は 90%エラー。	85
5.9	各 Quadrant を S-side に置いたときのキューブミラー法線と光軸の離角。	85
5.10	Q1S 相当の望遠鏡光軸に変換したときのキューブミラー法線と光軸の離角。	85
5.11	測定条件。	88
5.12	3 点支持におけるカメラシステムの結像位置の履歴 (Q2S)。	88
5.13	測定条件。	91

5.14 vignetting のフィット結果。ガウシアン+定数でフィット。誤差は 90%エラー。	93
5.15 測定条件。	93
5.16 LR 法による焦点距離の結果。	93
6.1 X 線軸に正対させるセオドライトの値の履歴。括弧内はセオドライトの移動量。正負はビームライン座標に順している。	98
6.2 セオドライトを X 線軸に正対させたときの、各場所の位置。5 秒ぐらいでセオドライトと X 線軸正対していることが分かる。	99
6.3 測定条件。	103
6.4 各 Quadrant の Vignetting における有効面積。	105
6.5 Vignetting のフィット結果。Gaussian でフィット。誤差は 90%エラー。	106
6.6 Q1U における各 Quadrant の X 線光軸と望遠鏡光軸の値。	106
6.7 測定条件。	110
6.8 望遠鏡光軸における各 Quadrant の有効面積。	111
6.9 Quadrant 光軸における各 Quadrant の有効面積。	111
6.10 測定条件。	113
6.11 有効面積の 90%が入る最大・最小の off-axis 角。	113
6.12 測定条件。	116
6.13 エネルギー毎の望遠鏡光軸と視野。	118
6.14 斜め vignetting の Lorentzian によるフィット結果。	118
6.15 測定条件。	119
6.16 LR 法と HPD 法による焦点距離の結果。	126
6.17 測定条件。	127
6.18 各エネルギーに対する Quadrant の HPD。XRT は望遠鏡一台分を意味する。括弧内はイメージの中心座標 (単位は [pixel]) 。	158
6.19 測定条件。	159
6.20 Q3D における光軸を Q1U 相当に直した光軸の値。	161
6.21 測定条件。	161
6.22 Q3U の configuration での HPD の値。	167
6.23 測定条件。	169
6.24 off-axis 角 +30' における迷光の有効面積。	176
6.25 off-axis 角 -30' における迷光の有効面積。	176
7.1 測定条件。	193
7.2 各 Quadrant の形状誤差と位置決め誤差。	218
8.1 望遠鏡光軸の測定条件。	219
8.2 各 configuration における Quadrant 毎の光軸。括弧内は (Azimuth(θ_z), Elevation(θ_y)) を表す。	220
8.3 望遠鏡光軸における望遠鏡全体の有効面積。	221

第1章 序論

1.1 X線天文学

天文学は、宇宙とその起源、つまりは自分たちの生きている自然界を理解することが究極的な目的である。理解するということは即ち、我々の物理法則が遠い宇宙でも適用できるかということであるが、そのためには広大な宇宙に存在する多くの天体の物理現象を知る必要がある。そこで我々は、古来から天体の光 = 電磁波を観測してきた。天体が放つ電磁波は天体からの多くの情報を我々にもたらしてくれる。では天体が放つ電磁波の中で、X線の波長領域(0.1 ~ 100 keV)はどのような特徴があるのだろうか。

X線の特徴の一つとして、エネルギーが高いことが挙げられる。例えば、可視光と比べるとそのエネルギーは3桁も高い。これ程の高エネルギーは、1千万度 ~ 1億度の高温プラズマ領域や中性子星やブラックホール近傍の強い重力場、超新星爆発などの強い衝撃波による電子の加速など、物質の極限状態から生み出される。また、X線はもう一つの特徴として透過率が大きいことが挙げられる。これにより、可視光領域では観測できない暗黒星雲や厚いガス雲の中に隠された天体を観測することが可能となる。

しかしX線は大気によって吸収されてしまうため、地球上で観測することは困難である。そのため、観測機器を衛星に搭載し、大気の吸収の効果が及ばない領域(大気圏外)に運んで観測する必要がある。これにより、1962年のジャッコーニとロッシがロケットによる観測を行うまで、太陽以外からのX線を観測することは不可能であった。しかしそれ以後の気球実験、さらには1970年の「Uhuru」衛星以降は数々のX線天文衛星が打ち上げられ、観測が行なわれてきた。その結果、現在の観測対象は恒星のコロナから、白色わい星、中性子星、ブラックホール候補天体、活動銀河核などの高密度天体、また超新星残骸、銀河団などの高温プラズマ天体などの多岐にわたる。さらに近年では、地上の加速器では再現できない高エネルギーを生み出すX線放射領域は、高エネルギー物理の検証の場として用いられるようになってきている。また、2012年はX線天文学が始まって50周年を迎える年となった。

1.2 X線天文衛星

X線領域の観測は、一般的に光子のカウントレートが低く、典型的には1 count/secほどである。よってその観測は、1つ1つの光子について、入射時間、進行方向、エネルギー(波長)を測定することになる。このため、一部例外はあるが、X線天文衛星は、(X線望遠鏡 or コリメーター) + (エネルギーや時間分解能を持つ検出器)という組み合わせで観測機器が搭載されている。

X線天文衛星が始まったのは1970年代以降で、これまで多くの衛星が打ち上げられ、その度に新しい発見とともに衛星の技術的進化・発展が進んだ。1970年代前半の主な衛星は(コリ

1.2 X 線天文衛星

メーター) + (ガス比例計数管) という組み合わせで、Uhuru、Ariel - 5、OSO - 8、HEAO - 1 などがある。この世代の典型的な感度は 1 mCrab^1 程度であった。

しかし 1978 年の Einstein 衛星で劇的な進化を遂げる。即ち X 線望遠鏡の登場である。これまでの (コリメーター) + (ガス比例計数管) という組み合わせは、検出器の開口面積を大きくすれば、それに比例して多くの光子を集めることができる。但しそれと同時に検出器のバックグラウンドとなる宇宙 X 線背景放射 (CXB) が増えてしまう。さらにもう一つのバックグラウンドである荷電粒子などの宇宙線は検出器の体積に比例して大きくなるため、検出器を大きくしてもその感度には限界がある。しかし X 線望遠鏡を用いることで目的の天体の X 線のみを見ることができ、小さな開口面積の検出器で多くの光子を集めることが出来る。これにより検出感度 (シグナルノイズ比: S/N 比) は劇的に改善され、Einstein の検出感度は $0.1 \mu\text{Crab}$ を達成した。

さらに 1999 年に打ち上げられた XMM や Chandra などといった X 線天文衛星は、秒角単位の分解能を持つ X 線望遠鏡と X 線 CCD カメラという組み合わせになってきている。

日本の衛星は「はくちょう」をはじめ、これまでの比例計数管の 2 倍のエネルギー分解能をもつ蛍光比例計数管を搭載した「てんま」、 4000 cm^2 という大面積でありながら低いノイズをもつ比例計数管が搭載された「ぎんが」などがある。現在は 2005 年に打ち上げられた「すざく」が運用中で、これまでに宇宙の構造形成やブラックホール直近領域の探査等で順調に成果をあげている。

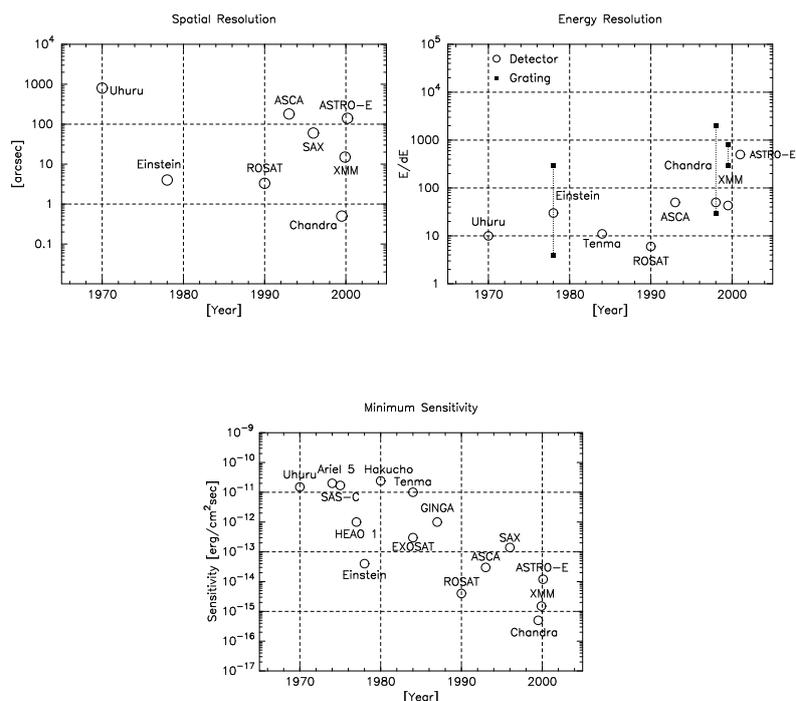


図 1.1: X 線天文衛星の性能の変遷 (左上: 空間分解能、右上: エネルギー分解能、下: 検出感度)

¹mCrab はカニ星雲の X 線強度の 1000 分の 1 を表す。

1.3 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

ASTRO-H は日本の第 6 番目の X 線天文衛星であり、2015 年度の打ち上げが予定されている。世界初となるマイクロカロリメータの搭載により、軟 X 線 (0.3 - 10.0 keV) での超高分解能分光観測を行うほか、合計 2 種類の X 線望遠鏡 4 種類の検出器の搭載により、0.3 ~ 600 keV の広帯域で「すざく」の 2 桁上となる世界最高の感度を目指すものである。

1.3.1 ASTRO-H が目指すサイエンス

ASTRO-H が目指すサイエンスは世界最高のエネルギー分解能を持ち、X 線からガンマ線までの広大なエネルギー観測による研究は、宇宙のダイナミックな進化と非熱的物質を含めたエネルギー集中過程の解明を目指すものである。具体的なサイエンスの目的を以下に挙げる。

- 銀河団中の高温ガスから発生する X 線のドップラー計測による速度測定により、数千万光年規模の宇宙史最大の現象である銀河団衝突を実測し、宇宙の大きな構造がどのように成長してきたかを解明。
- ブラックホール周囲の物質によって吸収されにくい、硬 X 線での高感度観測により、80 億光年遠方までの巨大ブラックホールを「すざく」の約 100 倍の感度で観測し、巨大ブラックホールが銀河進化に果たす役割を解明。
- ブラックホールの極近傍の物質の運動を測定することで重力のゆがみを把握し、相対論的時空の構造を明らかにする。
- 宇宙に存在する高エネルギー粒子 (宇宙線) がエネルギーを獲得する現場の物理状態を測定し、重力や衝突・爆発のエネルギーが宇宙線を生み出す過程を解明する。
- 距離 (年齢) の異なる銀河団内のダークマターの分布と総質量を測定し、銀河団の進化に影響を与えるダークマターと暗黒エネルギーの役割を探求する。

1.3.2 ASTRO-H 搭載機器

ASTRO-H には以下の観測装置が搭載される。

- 軟 X 線精密分光測定システム
軟 X 線望遠鏡 (SXT) と軟 X 線分光器 (SXS) を組み合わせたシステムである。0.3~10 keV のエネルギー領域に置いて、エネルギー分解能 10 eV 以下の分光測定が可能である。
- 軟 X 線撮像分光システム
軟 X 線望遠鏡 (SXT) と軟 X 線分光検出器 (SXI) を組み合わせたシステムである。観測帯域は 0.5 ~ 14 keV であり、38 分角四方という広い視野をもつ。

- 硬 X 線撮像分光システム
硬 X 線望遠鏡 (HXT) と硬 X 線撮像検出器 (HXI) を組み合わせたシステムである。1 ~ 60 keV のエネルギー領域において、従来より 1 桁以上優れた感度で X 線の空間分布とスペクトルを得ることができる。
- 軟 γ 線検出器 (SGD)
10 ~ 300 keV において、現在の検出器を 1 桁以上上回る感度を有し、1 度を切る狭い視野角と、新しいバックグラウンド除去を組み合わせた観測システムである。

各システムを構成するサブシステムについて以降で簡単に述べる。

軟 X 線望遠鏡 (SXT)

軟 X 線望遠鏡は軟 X 線領域 (0.3 - 25 keV) の X 線を集光、結像する X 線望遠鏡である。ASTRO-H には同じ設計である SXT-S と SXT-I が搭載され、それぞれの焦点面には SXS、SXI が設置される。SXT はすざく衛星に搭載された X 線望遠鏡をアップグレードしたものである。SXT の設計パラメータを表 1.1 にまとめる。

表 1.1: SXT の設計パラメータ。

口径	450 mm
焦点距離	5,600 mm
反射鏡積層数	203 枚
反射膜	Au
反射鏡基盤の厚さ	~ 79 枚目 165 μ m ~ 153 枚目 241 μ m ~ 203 枚目 318 μ m
入射角	0.15 ~ 0.59 °

硬 X 線望遠鏡 (HXT)

硬 X 線望遠鏡は硬 X 線領域 (5.0 - 80 keV) の X 線を集光・結像する X 線望遠鏡である。HXT の反射鏡には Pt/C 多層膜スーパーミラーが用いられている。深さ方向に周期長を変化させた多層膜を積み重ねており、それぞれの層でブラッグ条件を満たす X 線が強め合い、結果として広いエネルギー領域で反射率を持つ。これにより硬 X 線領域での結像が可能である。HXT の設計パラメータを表 1.2 にまとめる。

軟 X 線分光器 (SXS)

SXS は優れたエネルギー分解能で分光と撮像を行う検出器である。SXS は、センサ部 (FEA)、冷凍機、寒剤を含むデュワー、およびセンサからの信号処理、デュワーの温度計測や制御を行

表 1.2: HXT の設計パラメータ。

口径	450 mm
焦点距離	12,000 mm
反射鏡積層数	213 枚
反射膜	Pt/C 多層膜スーパーミラー
反射鏡基盤の厚さ	~ 79 枚目 165 μ m ~ 153 枚目 241 μ m ~ 203 枚目 318 μ m
入射角	0.15 ~ 0.59 °

う電気回路系、入射 X 線の強度を調節するフィルターホイール (FW/FDE) の各コンポーネントで構成される。現時点でエネルギー分解能 8 eV を達成しており、SXS ではこのチップを用いて動作温度を下げることによって、すざく衛星搭載の XRS と同等以上のエネルギー分解能を実現することをベースラインとする。また、冷凍機システムは、すざく衛星での結果をふまえ個体ネオンをなくし、断熱消磁冷凍機、液体ヘリウム、機械式冷凍機という単純な構造になっている。SXS への性能要求を表 1.3 にまとめる。

表 1.3: SXS への性能要求。

エネルギー帯域	0.3 - 10 keV
検出効率 @0.6 keV	0.15 以上
検出効率 @7 keV	0.7 以上
エネルギー分解能	10 eV 以上 (FWHM、6 keV)
アレイ全面積	5 mm \times 5 mm 以上
アレイフォーマット	6 \times 6
最大計数率	30 c/s
軌道寿命	2 年以上

軟 X 線分光検出器 (SXI)

SXI は、SXT と組み合わせた、0.5 - 25 keV の領域で撮像分光を受け持つ検出器である。SXI 全体のシステムは具体的に、X 線 CCD 素子とそれを納めるハウジングを含むセンサー、X 線 CCD 素子を直接冷却するベルチェ素子、ベルチェの廃熱を宇宙空間に捨てるラジエーターとそこまで熱を運ぶヒートパイプを含む冷却系、CCD の駆動読み出し系、読み出したデータの機上処理回路、温度制御回路等を含む電子回路系のコンポーネントから構成される。これはすざく衛星の X 線 CCD カメラに準じた構成であるが、技術開発が進んだことを反映し随所に改良が施されている。表 1.4 に SXI 諸元をまとめる。

表 1.4: SXI 諸元。

エネルギー帯域	0.5 - 12 keV (ベースライン案) 0.5 - 12 keV (ゴールライン案)
CCD サイズ	50 mm × 50 mm
CCD 形式	フレーム転送型
視野	19 分角 × 19 分角
フォーマット	2048 × 2048 × 2 pixel
ピクセルサイズ	24 μm × 24 μm
読み出しサイクル	4 秒
重量	4 kg (センサー部) 1.8 kg (エレキ部)

硬 X 線分光検出器 (HXI)

HXI は数 keV から 80 keV の広いエネルギー帯域で撮像観測を行うものであり、井戸型の BGO にすっぽりと覆われたハイブリット型の検出器である。HXI は 10 keV から 80 keV までを担当する CdTe ピクセル検出器の上部に、5 keV 前後から 30 keV までの領域を担当する多層化両面シリコンストリップ検出器 (SGGD) を持つ。3.2 cm 四方で 0.5 mm 厚の DSSD を 2 枚から 4 枚と、2 cm 四方以上のサイズを持ち、0.5 - 0.75 mm 厚の CdTe ピクセルを 1 枚用いる。HXI への性能要求を表 1.5 にまとめる。

表 1.5: HXI への性能要求。

エネルギー帯域	5 - 60 keV
エネルギー分解能	<1.5 keV (FWHM, 60 keV)
検出器視野	5 × 5 度以上
検出器 BGD	$1-3 \times 10^{-4}$ cnt s ⁻¹ cm ⁻² keV ⁻¹ 以下

軟 γ 線検出器 (SGD)

SGD はコンプトン散乱の運動学を適用した、狭い視野を持つ半導体多層コンプトンカメラである。半導体多層コンプトンカメラは、高いエネルギー分解能をもつ両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) と、ガンマ線に高い感度をもつテルル化カドニウム (CdTe) 半導体ピクセル検出器から構成される。観測対象からのガンマ線は、パッシブあるいはアクティブなコリメータによってしぼられた視野から、この半導体コンプトンカメラにより検出される。SGD への性能要求を表 1.6 にまとめる。

1.3 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

表 1.6: SGD への性能要求。

エネルギー帯域	10 - 300 keV
エネルギー分解能	2-3 keV (FWHM、40 keV)
有効面積	100 cm ² 以上
検出器視野	0.6 × 0.6 度以上
検出器 BGD	1 × 10 ⁻⁶ cnt s ⁻¹ cm ⁻² keV ⁻¹ 以下

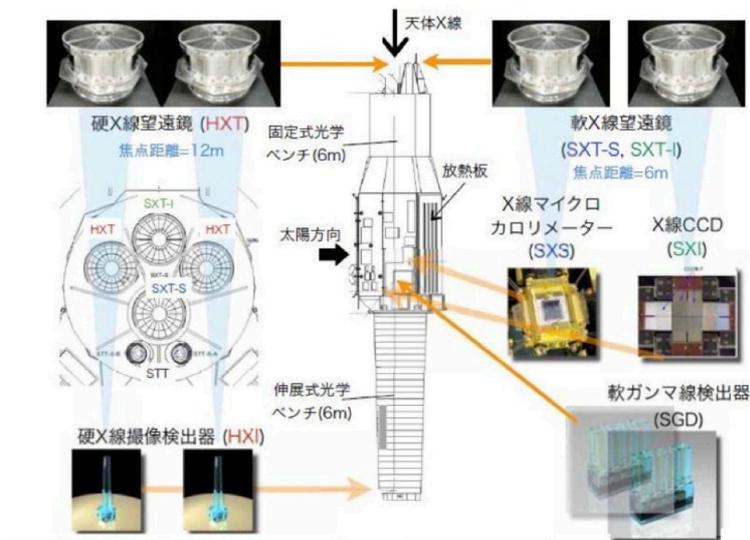
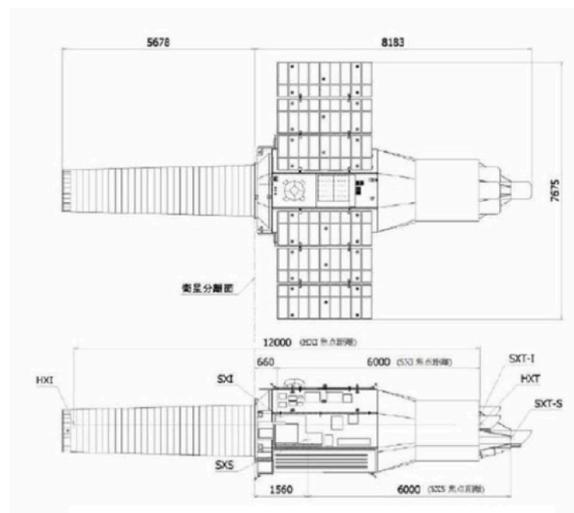


図 1.2: ASTRO-H に搭載される観測機器の配置

第2章 X線光学

X線は1895年ドイツの物理学者レントゲンによって発見された。X線は我々がいつも見ている可視光と同じ光の一種だが、可視光に比べ約1000倍もの高いエネルギーをもっている。X線は原子と直接相互作用（衝突）するために、電子密度の高い（電子が多い）金やプラチナが反射鏡に用いられる。全反射とは、屈折率の大きい物質から屈折率の小さい物質へ光が入射する時に起きる現象で、入射してきた光を90%以上反射する。X線領域では物質の屈折率は1より小さくなるため、真空中（屈折率 = 1）からくるX線に対しては全反射をおこす。例えば反射面にプラチナを用いた鏡に対しては、X線の入射角度が約 0.5° 以下の場合に全反射をおこす。本章では、このような高エネルギーのX線の反射の原理と、表面粗さによって生じるX線の散乱について取り扱う。

2.1 反射の原理

2.1.1 トムソン散乱

物質中を z の距離だけ通過した電磁波の電場に対する波動方程式の一般解は、真空での波長を λ として、複素屈折率 \tilde{n}

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) - i\beta(\lambda) \quad (2.1)$$

を用いることで、

$$E(z, t) = E_0 \exp\left(-\frac{2\pi i}{\lambda}(\tilde{n}z - ct)\right) \quad (2.2)$$

$$= E_0 \exp\left(-\frac{2\pi\beta}{\lambda}z\right) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda}(nz - ct)\right] \quad (2.3)$$

と書ける。ここで、 E_0 は $z=0$ での電場の振幅である。この式は、第1項が屈折率の虚数部分 β を消衰係数とした減衰関数で、第2項が物質中での振動を表している。つまり、 $\mu = 2\pi\beta/\lambda$ とすると、距離 z を通過した波の強度 $I(z) = |E(z)|^2$ はもとの強度 I_0 に対して、

$$I(z) = I_0 \exp(-\mu z) \quad (2.4)$$

と減衰する事を意味している。実際は μ の代わりに、これを物質の密度 ρ で割った質量吸収係数 μ_m が使われる事が多い。

X線が物質中に入射すると、ある断面積で原子がX線と弾性散乱を起こす。これをトムソン散乱と言う。簡便のため、まず自由電子によるトムソン散乱を考える。振幅が E_0 である入射X

2.1 反射の原理

線の電磁波によって、原子中の束縛電子に双極子的な強制振動を引き起こし、この電子を源として入射 X 線と同じ振動数を持つ二次的な X 線が放射される。再放射された散乱波は方向依存性をもっており、散乱波の振幅 E_s は双極子軸と散乱波の進行方向の角度 χ との間に、

$$E_s = \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi \quad (2.5)$$

の関係がある (図 2.1)。ここで、 r_e は次で定義する電子古典半径である。

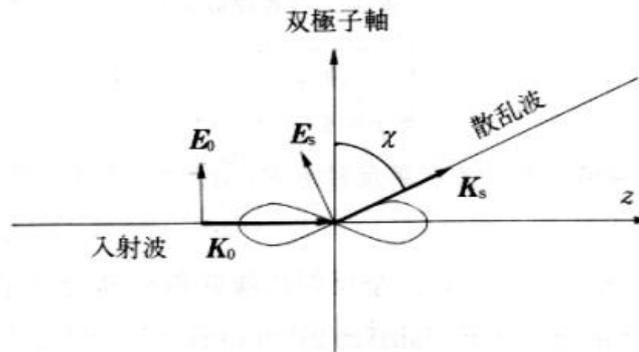


図 2.1: 電子によるトムソン散乱の散乱角依存性。

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2.82 \times 10^{-13} [\text{cm}] \quad (2.6)$$

一方、原子核も電荷を持っており、入射 X 線によって振動させられる。しかし、振動とそれによって引き起こされる二次的な放射は、荷電粒子が非相対論的運動の場合、加速度に比例するため、電子に比べ非常に大きな質量を持つ原子核からの再放射は無視することができる。

以上より原子全体での散乱は、自由電子による散乱波の重ね合わせだけで考えれば良いように思えるが、実際の電子は原子核に束縛されている。さらに周囲の原子との相互作用があるため補正が必要となる。この補正のために原子散乱因子 f を以下のように定義する。

$$f \equiv \frac{1 \text{ 個の原子によって散乱された波の振幅}}{1 \text{ 個の電子によって散乱された波の振幅}} \quad (2.7)$$

$$= f_1(E, \phi) + i f_2(E, \phi) \quad (2.8)$$

この補正を加えると、原子による散乱振幅 E_s は

$$E_s = f(E, \phi) \times \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi = [f_1(E, \phi) + i f_2(E, \phi)] \times \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi \quad (2.9)$$

となる。注意しなければならないのは、この f_1, f_2 は入射 X 線のエネルギーだけではなく、散乱角 ϕ にも依存することである。これは散乱角が増えると原子内の各電子による散乱波の位相がずれるためである。しかし後で扱う内容は散乱角 $\simeq 0$ の場合のみでなので、 $f_1(E, \phi), f_2(E, \phi)$

2.1 反射の原理

を、それぞれ $f_1(E, 0), f_2(E, 0)$ の値で近似できる。これにより、 f_1, f_2 は相対論的量子分散理論で求めることができ、次式のように表すことができる。

$$f_1(E, 0) = Z + \frac{1}{\pi r_e h c} \int_0^\infty \sigma(W) \frac{W^2}{E^2 - W^2} dW - \Delta_{rel} \quad (2.10)$$

$$f_2(E, 0) = \frac{1}{2\pi r_e h c} E \sigma(E) \quad (2.11)$$

f_1 の第 1 項は原子中の電子数を表し、第 2 項は異常分散の効果を表している。第 3 項は相対論的補正項で X 線領域では無視できる。よって、吸収端から離れたところでは $f_1 = Z$ と近似できる。また f_2 は原子による光電吸収を表す因子である。原子散乱因子 f_1, f_2 は物質の屈折率 n や吸収係数 β と

$$\delta = 1 - n = \frac{e^2 \hbar^2}{2\epsilon_0 m_e E^2} f_1 = \frac{N_a r_e}{2\pi} \lambda^2 f_1 \quad (2.12)$$

$$\beta = \frac{e^2 \hbar^2}{2\epsilon_0 m_e E^2} f_2 = \frac{N_a r_e}{2\pi} \lambda^2 f_2 = \frac{\lambda}{4\pi} \mu = \frac{\rho \lambda}{4\pi} \mu_m \quad (2.13)$$

の関係がある。ただし $N_a = (N_0/A)\rho^1$ とする。

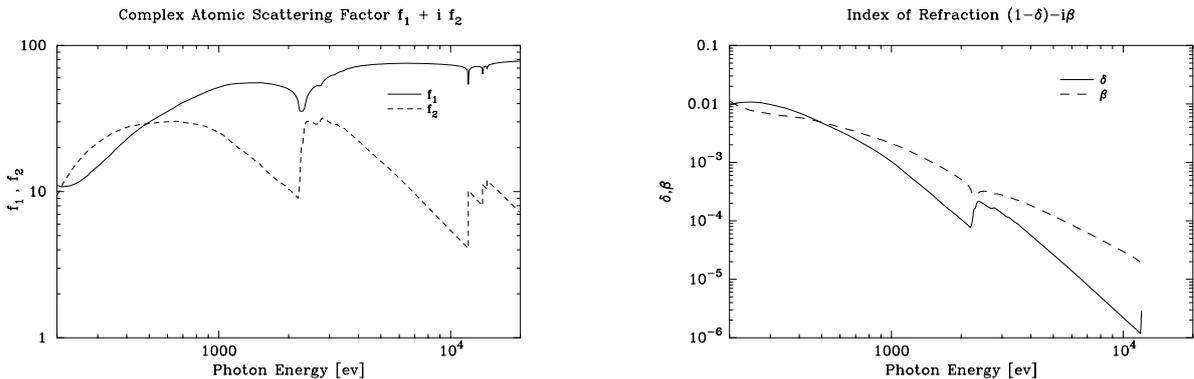


図 2.2: 金の複素原子散乱因子と光学定数。(図左は金の複素原子散乱因子 f_1, f_2 、図右は金の密度を $19.32 \text{ [g/cm}^3]$ としたときの光学定数 δ, β である。両図とも横軸にエネルギーをとる。)

¹ N_0 はアボガドロ数、 A は原子質量数、 ρ は原子密度である。

2.1 反射の原理

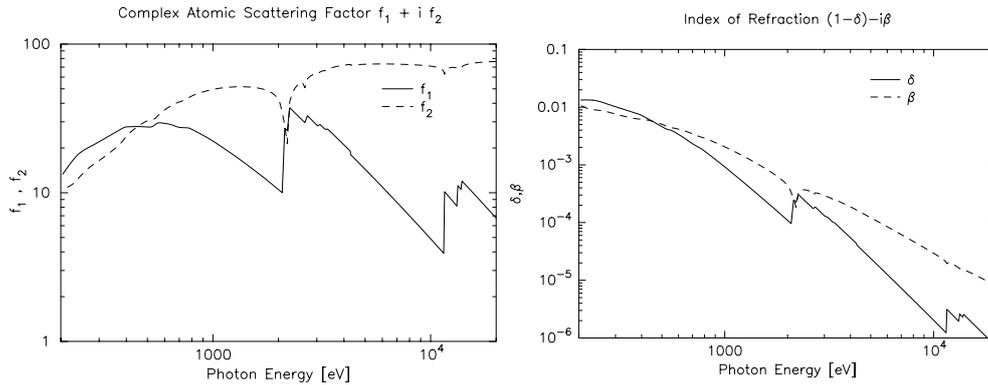


図 2.3: プラチナの複素原子散乱因子と光学定数。(図左はプラチナの複素原子散乱因子 f_1 、 f_2 、図右は金の密度を $21.45 \text{ [g/cm}^3]$ としたときの光学定数 δ 、 β である。両図とも横軸にエネルギーをとる。)

2.1.2 X線の全反射

図 2.2, 2.3 より、物質の屈折率が 1 よりわずかに小さいことが分かる。これにより、X 線が物質表面に臨界角 θ_c よりも小さい角度で入射すれば全反射を得る事ができる。ここで真空中から物質（屈折率 \tilde{n} ）に X 線が入射した場合を考える。それぞれ表面から測った入射角、屈折角を θ_i 、 θ_r とすると、スネルの法則により

$$\cos \theta_i = \tilde{n} \cos \theta_r \quad (2.14)$$

の関係がある。 $\theta_r = 0$ の時の θ_i が θ_c であるから、吸収を無視 ($\beta = 0$) すると、

$$\cos \theta_c = \tilde{n} \simeq 1 - \delta \quad (2.15)$$

となる。さらに図 2.2, 2.3.2.3 で示したように、 $\delta \ll 1$ であるから、 $\theta_c \ll 1 \text{ rad}$ である。そこで $\cos \theta_c \simeq 1 - \frac{\theta_c^2}{2}$ の近似を用いると

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} \quad (2.16)$$

となる。よって (2.12) 式より、 $\rho \text{ [g/cm}^3]$ 、 $E \text{ [keV]}$ 、 $\lambda \text{ [nm]}$ を用いて θ_c は

$$\theta_c = 1.332 \times 10^{-2} \left(\frac{\rho f_1}{A} \right)^{1/2} \lambda \text{ [deg]} \quad (2.17)$$

$$= 1.651 \times 10^{-2} \left(\frac{\rho f_1}{A} \right)^{1/2} \frac{1}{E} \text{ [deg]} \quad (2.18)$$

2.1 反射の原理

と書ける。(2.10) 式は吸収端から十分離れたところでは $f_1 \sim Z$ である事を示し、重元素の場合 $Z/A \sim 0.5$ であるから、(2.16) 式は結局

$$\theta_c \propto \sqrt{\rho\lambda} \quad (2.19)$$

と求まる。したがって反射面にはしばしば密度の大きな物質である金や白金が用いられる。

真空から複素屈折率 \tilde{n} を持つ物質に X 線が入射した場合、界面に平行な電場ベクトルを持つ P 偏光と、垂直な電場ベクトルを持つ S 偏光に対する反射振幅 r_p, r_s は、 E と H の境界条件より、フレネルの式から

$$r_p = \frac{\sin \theta_r - \tilde{n} \sin \theta_i}{\sin \theta_r + \tilde{n} \sin \theta_i}, \quad r_s = \frac{\sin \theta_i - \tilde{n} \sin \theta_r}{\sin \theta_i + \tilde{n} \sin \theta_r} \quad (2.20)$$

である。反射強度はそれぞれの偏光につき複素共役との積をとり

$$R_p = r_p r_p^*, \quad R_s = r_s r_s^* \quad (2.21)$$

と書ける。全反射の様な極端な斜入射では反射率はほとんど偏光に依らない。よって反射率は

$$R = \frac{R_p + R_s}{2} \quad (2.22)$$

と考えて良い。したがって反射率は臨界角 θ_c で規格化すると、

$$R = \frac{h - \frac{\theta}{\theta_c} \sqrt{2(h-1)}}{h + \frac{\theta}{\theta_c} \sqrt{2(h-1)}} \quad (2.23)$$

$$h = \left(\frac{\theta}{\theta_c}\right)^2 + \sqrt{\left(\left(\frac{\theta}{\theta_c}\right)^2 - 1\right)^2 + \left(\frac{\beta}{\delta}\right)^2}$$

となる。

図 2.4 に (2.23) 式を用いて計算した、真空と物質の界面での X 線の反射率計算結果を示す。横軸は臨界角で規格化した入射角である。このように、反射率は $\theta/\theta_c = 1$ 以下の全反射領域でのみ高く、臨界角を超えると急速に減衰する。また X 線の吸収が少ないとき ($\beta/\delta = 0$)、全反射領域 ($\theta/\theta_c = 1$ 以下) での反射率は 100% であるが、吸収が大きくなる (すなわち β/δ の値が大きくなる) にしたがって全反射領域の反射率が低下することが分かる。したがって反射物質には、密度が大きく、 β/δ が小さい、さらには物理的、化学的に安定な物質である金や白金が有用である。

2.1 反射の原理

表 2.1: 金とプラチナの臨界角。

物質	原子番号	原子量	密度 [g/cm ³]	Al-K α	Cu-K α
Pt	78	195.08	21.45	2.64 °	0.58 °
Au	79	196.97	19.32	2.52 °	0.56 °

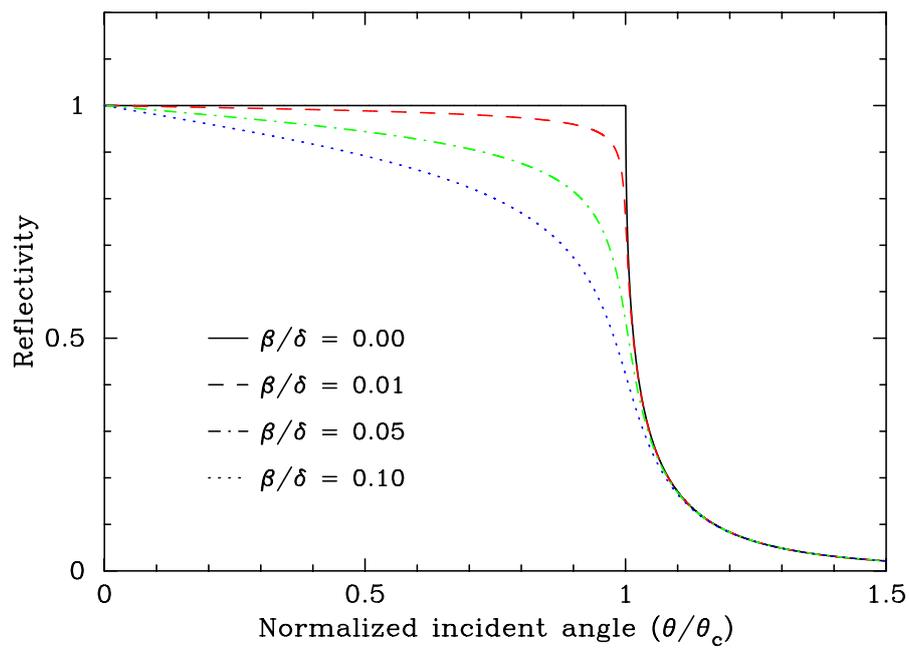


図 2.4: 単層膜の理論反射率。

2.2 表面粗さによる X 線の反射率と散乱

2.2.1 運動学的回折理論

有限の大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱を考える。物質表面による散乱はボルンの第一近似²が適用できるので、物質からの散乱波の振幅は各原子による散乱波の振幅を、電子の位置による位相のずれを考慮して重ね合わせたものとなる。

入射波と散乱波の波数ベクトルをそれぞれ k 、 k_0 として、散乱ベクトル q を

$$\mathbf{q} = \mathbf{k} - \mathbf{k}_0 \quad (2.24)$$

と定義する。この大きさは、

$$|\mathbf{q}| = q = \frac{4\pi \sin \theta}{\lambda} \quad (2.25)$$

である。但し、 2θ は k と k_0 のなす角である。

すると点 P からの散乱波は、原点からの散乱波との間に位相差 $(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{r} (= \mathbf{q} \cdot \mathbf{r})$ を生ずる。ここで位置 \mathbf{r} での原子の数密度を $\rho(\mathbf{r})$ とすると、微小体積要素 $d\mathbf{r}$ で散乱される波の振幅は、 $\rho(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{q}\mathbf{r})d\mathbf{r}$ に比例する。したがって、強度 I_0 の X 線が入射した場合の散乱体全体からの散乱波の強度は、

$$S(\mathbf{q}) \equiv N \int \exp(-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (2.26)$$

として、

$$I = I_0 f^2 |S(\mathbf{q})|^2 \quad (f : \text{原子散乱因子}) \quad (2.27)$$

となる。これは、散乱体が固体、液体、気体でも適用できる一般的な式で、運動学的回折理論の基礎を与える式である。

次に図 2.6 のような物質表面での X 線の散乱を考える。粗さのある平面を考えた時に、図 2.7 のように、平均の表面に x, y 軸を、それに垂直に z 軸を定義する。これから q のそれぞれの方向に対する成分は、 xz 面内から X 線が入射したとし、図 2.6 で定義する角度を用いると、 $q(q_x, q_y, q_z)$ の成分はそれぞれ、

$$q_x = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_i - \cos \theta_s \cos \phi) \quad (2.28)$$

$$q_y = \frac{2\pi}{\lambda} (-\cos \theta_s \sin \phi) \quad (2.29)$$

$$q_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_i + \sin \theta) \quad (2.30)$$

²物質中で X 線が 1 回しか散乱されないときに使用できる近似で、物質と X 線との相互作用が十分小さい時に適用できる。

2.2 表面粗さによる X 線の反射率と散乱

となる。ここで、物質表面上での反射に運動学的回折理論を適用し、(2.23) 式の R_0 を用いることで、反射 X 線の強度は、

$$I = I_0 R_0 \left| \frac{1}{A} \int_A dx dy \exp[-iq_z Z(x, y)] \exp[-i(q_x x + q_y y)] \right|^2 \quad (2.31)$$

と導ける (A は X 線があたっている領域)。

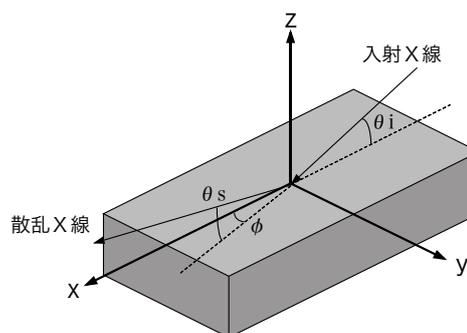
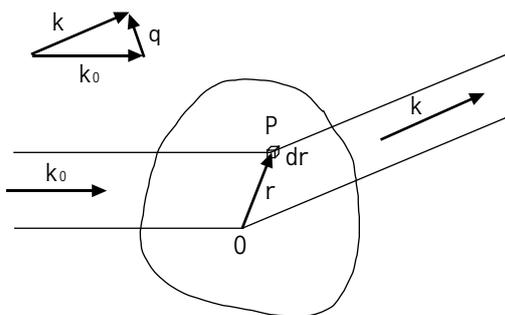


図 2.5: 大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱。

図 2.6: 物質表面による X 線の散乱。

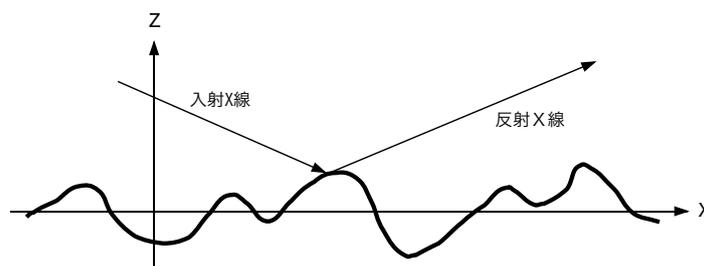


図 2.7: 粗さのある物質面上での散乱と反射。

2.2.2 表面粗さによる反射率の低下

ここでは、 $q_z Z(x, y) \ll 1$ となるような滑らかな平面上での正反射³(以後、「反射」とは正反射 X 線で、「散乱」とは正反射以外の方向へ進む X 線とする。)の反射強度について考える。

まず、 $q_z Z(x, y) \ll 1$ により $q_z Z(x, y)$ を含むエクスポネンシャルを 2 次の項まで展開し、

³平均の法線方向に垂直な面に対する入射角 θ_i と散乱角 θ_s が等しい場合にその X 線を正反射光、その散乱角を正反射な方向という。

2.2 表面粗さによる X 線の反射率と散乱

$$\exp(-iq_z Z(x, y)) \simeq 1 - iq_z Z(x, y) - \frac{1}{2!}(q_z Z(x, y))^2 \quad (2.32)$$

ここで第 2 項は大角度への散乱を表す項であるため、今のように非常に滑らかな平面では無視できる。そこで、さらに

$$\simeq \exp\left(-\frac{1}{2}(q_z Z(x, y))^2\right) \quad (2.33)$$

と近似できる。正反射では、 $\theta_i = \theta_s, \phi = 0$ であるので、 $q_x = q_y = 0, q_z = 2 \sin \theta_i$ となり、(2.31) 式にあてはめると、

$$I = I_0 R_0 \left| \frac{1}{A} \int_A \exp[-iq_z Z(x, y)] dx dy \right|^2 \quad (2.34)$$

$$\simeq I_0 R_0 \left(\exp\left(\frac{1}{2}(q_z Z(x, y))^2\right) \frac{1}{A} \int_A Z^2(x, y) dx dy \right)^2 \quad (2.35)$$

ここで表面粗さ σ を考えると、 $\frac{1}{A} \int_A Z^2(x, y) dx dy = \sigma^2$ であるので、

$$I = I_0 R_0 \left(\exp\left(-\frac{1}{2}(q_z \sigma)^2\right) \right)^2 \quad (2.36)$$

$$= I_0 R_0 \exp\left(-\left(\frac{4\pi\sigma \sin \theta_i}{\lambda}\right)^2\right) \quad (2.37)$$

と書き直せる。(2.37) 式の R_0 にかかる項は Debye-Waller 因子⁴ と呼ばれる。このフレネルの反射率 R_0 に Debye-Waller 因子をかけたものは、特に $q_z Z(x, y) \ll 1$ となる条件では実験結果を非常によく再現している。

Debye-Waller 因子を見ると、波長の -2 乗に比例して減衰効果が大きくなることが分かる。X 線領域（波長が $0.1 \sim 100 \text{ \AA}$ ）の様に非常に短かな波長域では、可視光光学系のような直入射光学系を用いると⁵、数 \AA 程度の粗さで反射率が大きく低下してしまう。しかし、ASTRO-E XRT 等では極端な斜入射光学系を用いているため、 $\sin \theta_i$ の効果の分 σ の値が数 \AA まで観測に十分な反射率を得ることができる。

2.2.3 散乱 X 線の強度

次に、X 線の散乱（正反射でない散乱成分）について議論する。散乱についてはいくつかの理論があるが、 $q_z \cdot z$ の小さい場合のみに適用できるものがほとんどである。ここではそれらのうち、代表的な 2 つの理論について述べる。

⁴Debye-Waller 因子は、本来は結晶中の原子位置の熱運動による揺らぎを考慮に入れるために導入された。

⁵2.1 と矛盾しているように思われるかも知れないが、X 線領域でも Bragg 反射を用いた多層膜ミラーによる直入射鏡が可能である。

Plain-Wave Born Approximation : PWBA

まず (2.34) 式を、

$$I = I_0 R_0 \frac{1}{A} \int_A dx dy \frac{1}{A} \int_A dx' dy' \exp(-iq(Z(x, y) - Z(x', y'))) \times \exp(-i(q_x(x - x') + q_y(y - y'))) \quad (2.38)$$

と変形する。ここで相対座標 $(X, Y) \equiv (x' - x, y' - y)$ を導入し、 $g(X, Y)$ を

$$g(X, Y) \equiv \langle (z(x', y') - z(x, y))^2 \rangle \quad (2.39)$$

と定義する。ここで、 (X, Y) は $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ の距離だけ離れた 2 点間の粗さを表している。しかし $R \rightarrow \infty$ のときには $g(X, Y)$ は無限大にはならないはずである。(なぜなら、 $R \rightarrow \infty$ のときは反射率が 0 となってしまうから。) よって、適当なカットオフ ξ をつけ、例えば、

$$g(R) = 2\sigma^2 \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{R}{\xi}\right)^{2h}\right) \right) \quad (2.40)$$

とし、 $g(X, Y)$ を適当な値 $2\sigma^2$ に収束させるようにする。

ここでさらに、 $z(x', y') - z(x, y)$ がガウス分布であると仮定すると、(2.38) 式は、

$$I = I_0 R_0 \frac{1}{A} \int_A dX dY \exp\left(-\frac{q_z^2 g(X, Y)}{2}\right) \exp(-i(q_x X + q_y Y)) \quad (2.41)$$

と書き直せる。

さらに、correlation function $C(X, Y)$

$$C(X, Y) \equiv \langle z(x', y') z(x, y) \rangle = \sigma^2 - \frac{1}{2} g(X, Y) \quad (2.42)$$

を定義することにより、(2.41) 式を

$$I = I_0 R_0 \exp(-q_z^2 \sigma^2) \frac{1}{A} \int dX dY \exp(q_z^2 C(X, Y)) \exp(-i(q_x X + q_y Y)) \quad (2.43)$$

と書き直す。ここで $F(q_z, R) \equiv \exp(q_z C(X, Y)) - 1$ とすると、 $R \rightarrow \infty$ では $F \rightarrow 0$ となるため、(2.43) 式を正反射成分と散乱成分に分けることができる⁶。よって、 $I = I_{spec} + I_{diff}$ を分けて表記すると、

$$I_{spec} = I_0 R_0 \exp(-q_z^2 \sigma^2) \delta(q_x) \delta(q_y) \quad (2.44)$$

$$I_{diff} = I_0 R_0 \exp(-q_z^2 \sigma^2) \frac{1}{2} \int_0^\infty dR R F(q_z, R) J_0(q_z, R) \quad (2.45)$$

⁶無限大の平面上に光があたっている場合には散乱は 0 になるはずであるため

2.2 表面粗さによる X 線の反射率と散乱

となり、(2.44) 式は、(2.36) 式と一致していることが分かる。これは正反射成分と散乱成分の反射強度を同時に得ることができ、 $q_z \sigma$ が小さい場合には、比較的实验結果を再現している。ただし、(2.40) 式が物質の表面状態をあたえるわけであるが、これが形状測定の結果と一致しないことも多く、問題点も多い。最近では粗さが比較的大きい表面に対しても適用できる、Distorted-Wave Born Approximation(ひずみ波 Born 近似) : DWBA がよく使われている。

Bidirectional Reflectivity Distribution Function : BRDF

この理論は正反射でない散乱成分のみを取り扱うため、(2.31) 式とは考え方を異にする。まず物質表面を表面波長 l が連続的に変化する正弦波の重ね合わせと考え、入射 X 線は表面のその多数の回折格子 (図 2.8) によって散乱させると考える。

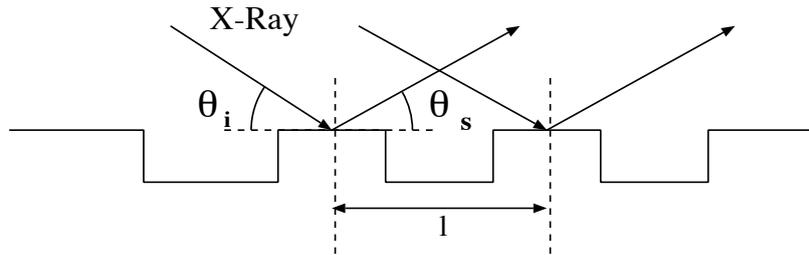


図 2.8: 回折格子による X 線の散乱。

但し、回折格子による回折光は 0 次及び 1 次が支配的であるため、回折条件の式

$$m\lambda = l(\cos \theta_i - \cos \theta_s) \quad (2.46)$$

での $m = 1$ の回折光のみについて考える。ここで、表面上の凹凸を表す関数として、Power Spectral Density(PSD) 数を導入する。表面上の点 (x, y) における凹凸の高さを $Z(x, y)$ とすると、その PSD 関数はフーリエ成分の 2 乗として表せ、

$$PSD_2(f_x, f_y) = \frac{1}{A} \left| \int_0^A \exp(2\pi i(f_x x + f_y y)) Z(x, y) dx dy \right|^2 \quad (2.47)$$

の式で与えることで、回折格子による θ_s への 1 次の散乱強度は、

$$\frac{dI}{d\theta_s} = I_0 \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \sin \theta_i \sin^2 \theta_s \sqrt{R(\theta_i)R(\theta_s)} PSD_2(f_x, f_y) \quad (2.48)$$

と与えられる。ここで、 λ^4 はレイリーの blue-sky 因子、 \sin の項は幾何学的効果、 $R(\theta)$ は (2.23) 式の $R_0(\theta)$ である。この項は臨界角付近の散乱強度の急激な変化 (Yoneda 効果) を補正するために導入してある。

注意すべき点は、BRDF は (2.31) 式での、 z 方向の変位による位相の変化 $\exp(-iq_z Z(x, y))$ をこの式では考慮していない。よって、当然ながら $q_z Z(x, y) \ll 1$ となる非常に滑らかな面内

2.2 表面粗さによる X 線の反射率と散乱

にのみ適用できる。実際の X 線散乱測定では 1 次元のみの測定が普通であるので 1 次元の式を与えると、

$$\frac{dI}{d\theta_s} = I_0 \frac{\pi}{\lambda} \sin \theta_i \sin^2 \theta_s \sqrt{R(\theta_i)R(\theta_s)} PSD_1(f_x) \quad (2.49)$$

$$\text{但し、} PSD_1(f_x) = \frac{1}{L} \left| \int_0^L \exp(2\pi i f_x x) Z(x) \right|^2 \quad (2.50)$$

となる。

第3章 X線望遠鏡

3.1 X線望遠鏡に用いられる光学系

可視光で像をつくるには、レンズを利用した屈折光学系を用いるのがふつうである。しかしX線領域ではほとんどの物質に対して屈折率が1よりもわずかに小さいため、ほとんど屈折を起こさない。そのためX線を集める技術は反射光学系を用いるのが一般的である。しかしX線の直入射の反射率は非常に小さいので、臨界角以下（ $\sim 1^\circ$ 以下）の小さい角度で全反射をさせて集光させる、斜入射光学系を用いる。斜入射光学系の例を図3.1に示す。Wolter I型斜入射光学系では、回転放物面と回転双曲面の内面で入射されるX線を2回反射させ、焦点に集光させる。これにより焦点距離を短くすることができる。

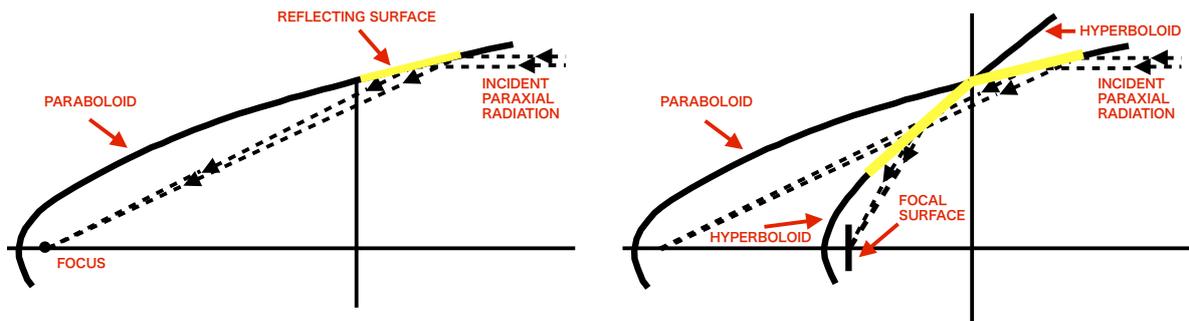


図 3.1: 左：回転放物面反射鏡、右：Wolter I 型反射鏡。

3.2 X線望遠鏡の性能

望遠鏡の性能は大別すると集光力と結像性能によって表される。ここではこの2つの性能を評価するために必要な物理量を定義する。

3.2.1 集光力（有効面積）

X線望遠鏡の集光力は、光軸方向から見た反射面の面積（開口面積）に、反射率を掛けた有効面積と呼ばれる量で表す。有効面積 S_{eff} は次の式で定義される。

$$S_{eff}(E) = \int S(\theta)R^2(\theta, E) \quad (3.1)$$

ここで、 $S(\theta)$ は一段目の反射鏡に入射角が $\theta \sim \theta + d\theta$ の間にある開口面積で、 $R(\theta, E)$ は入射角 θ 、エネルギー E の時の鏡面の反射率である。反射は一段目と二段目でそれぞれ入射角 θ の2回反射となるため、 $R^2(\theta, E)$ となっている。ここで、有効面積を増大させるためには、光学望遠鏡の様に焦点距離を一定にして口径を大きくしただけでは、外側ほど反射鏡への入射角が大きくなるので、反射率が落ち実質的な光量の増加は望めない。つまり、焦点距離を一定にした場合、臨界角を越えるほど口径を大きくすれば、それ以上口径を大きくしても有効面積が増えることはない。そこで、望遠鏡の口径とともに重要となるのが口径内に占める反射面の割合（開口効率）である。開口効率を上げるためには、鏡面基板の厚さをできるだけ薄くし、積層枚数を上げればよい。最後に様々な衛星の有効面積の比較を図 3.2 に示す。

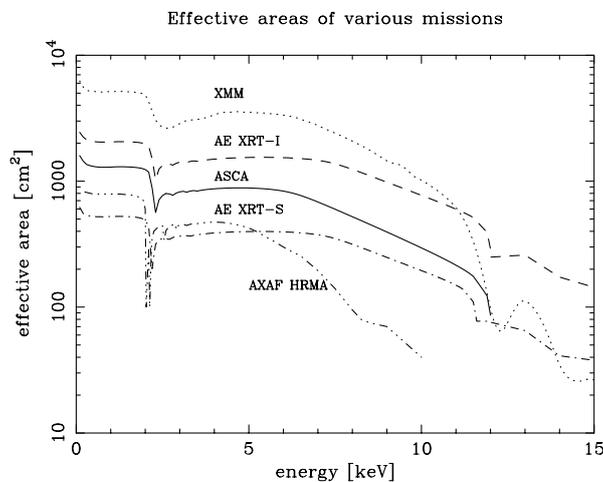


図 3.2: 様々な衛星に搭載される X 線望遠鏡の有効面積。(XRT-S は望遠鏡 1 台の有効面積、その他は mission 全体の有効面積である。) – AE は ASTRO-E の略である。

3.2.2 結像性能 (HPD、PSF、EEF)

結像性能の評価には、以下の 3 つの物理量が用いられる。

1. HPD (Half Power Diameter) - 全光量の 50% が含まれる円の直径

平行な X 線が X 線望遠鏡に入射し、焦点面上に作るイメージの例を図 3.3 に示す。理想的にはイメージは 1 点に結像するが、実際には図 3.3 のように広がりを持ったイメージとなり、この広がり的大小で結像性能（角分解能）が決まる。この広がり的大小を表すのに、HPD (Half Power Diameter) が用いられる。これは、全光量の 50% が含まれる円の直径である¹。HPD の値が小さいほど結像性能が良いといえる。

¹一般に、分解能を表すのに FWHM(Full Width at Half Maximum) が使われる。しかし、斜入射光学系の XRT

3.2X 線望遠鏡の性能

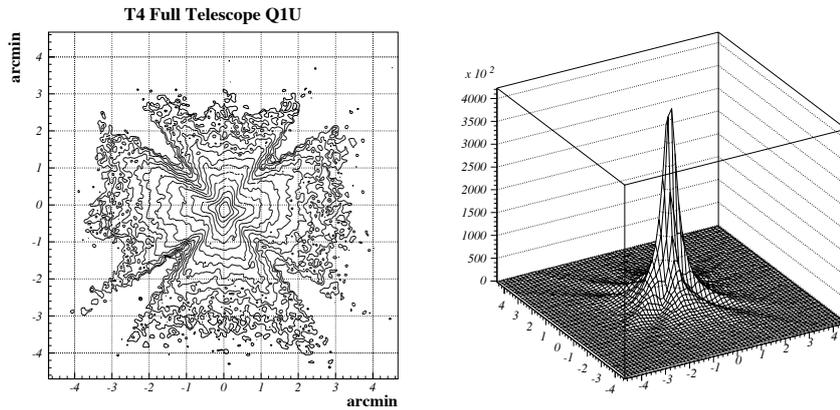


図 3.3: 焦点面のイメージ。左：等高線で表したものと、右：3 次元的に表したもの。

2. PSF (Point Spread Function) - 半径 r の円周上に含まれる単位面積当りの光量

焦点面に作られる 2 次元のイメージ上で、半径 r の円周上に含まれる単位面積当りの光量を PSF と呼ぶ (図 3.4)。これは、無限遠にある点源から放射された X 線が、XRT の焦点面に作る輝度分布であり、PSF のコアの部分に鋭いピークを持つほど結像性能が良いといえる。

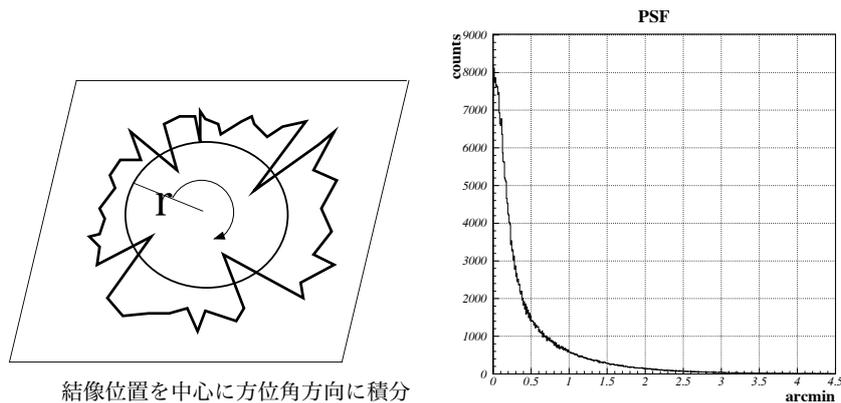


図 3.4: Point Spread Function (1 次元)。焦点面のイメージを動径方向に積分し (左)、1 次元の PSF を作る (右)。

の輝度分布は中心部に鋭いピークを持ち、中心付近の強度分布についてはガウス分布/半径の関数型で表すことができる。すると、半径が小さくなると、ピークの輝度は $1/r$ で高くなる。これは位置分解能がより良い焦点面検出器を使えば、検出器の 1 画素あたりの面積とともに r がさらに小さくなるので、ピークの高さはより高くなることになる。つまり使用する検出器の位置分解能によって、FWHM の値が異なってしまう。これでは斜入射光学系の結像性能を評価することはできない。一方、HPD は全光量の 50% を含む円の直径であり、全光量にのみ依存した値なので、検出器の位置分解能に依存しない。このため、斜入射光学系の望遠鏡を評価するには HPD が適している。

3. EEF(Encircled Energy Function) - 半径 r の円内に含まれる光量

結像中心から半径 r の円内に含まれる光量を EEF と呼ぶ。EEF は以下の関係式に示したように PSF の積分形となっている。

$$EEF(r) = \int_0^r 2\pi PSF(r)dr \quad (3.2)$$

EEF のプロットにおいて、縦軸が 50%の時の横軸の値 (半径) を 2 倍した値が HPD に相当する。最後に PSF、EEF、HPD の関係について図 3.5 にまとめる。図 3.5 は、入射した X 線の全光量を 1 と規格化した時の EEF、 $r = 0$ の時 1 になるようにした PSF の r 依存性を表している。PSF のピークが鋭いもの、EEF の立ち上がりが鋭いものほど結像性能が良いといえるが、これを定量的に表すために HPD を用いている。図 3.5 の場合では、EEF が 0.97 分角の時に全光量の 50%になっているので、HPD はその 2 倍の 1.94 分角となる。

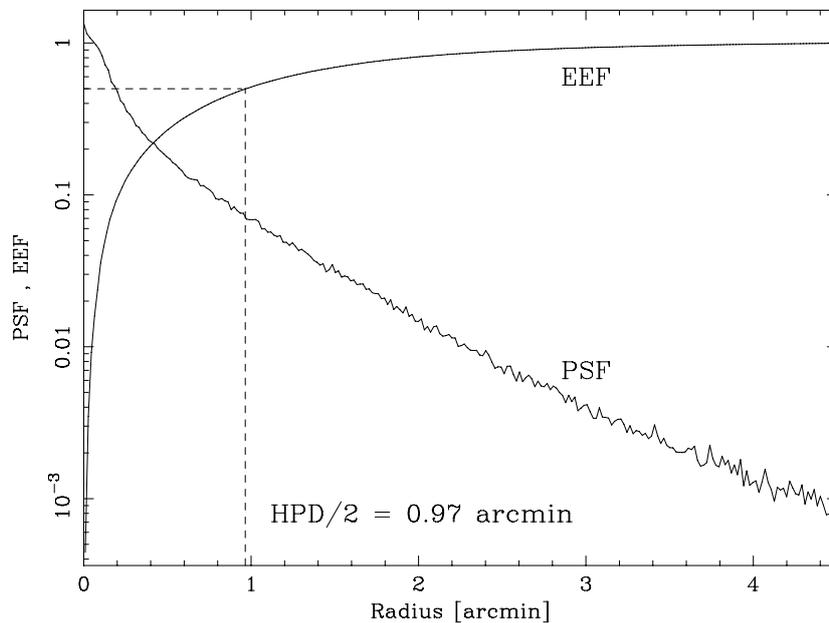


図 3.5: PSF、EEF、HPD の関係

3.3 迷光

観測対象となる X 線天体の周りには別の X 線天体がある場合や、銀河団のような広がった X 線天体の一部を観測する場合には、対象となる天体からの他に、望遠鏡の視野外にある X 宣言からの X 線も、望遠鏡内部で複雑な経路をたどって焦点面検出器上に到達する。このような X 線を迷光 (Stray Light) と呼ぶ。迷光が検出器上に洩れ込むと、対象となる天体からの X 線と区別ができないため、衛星の観測精度が老化してしまう。

図 3.6 に視野外に明るい点源がある場合に検出器に洩れ込む迷光の概念図を示す。図 3.6 に描かれているように、視野外の点源の本来の結像位置は検出器の外側にあるが、像の一部が迷光として検出器内に洩れ込むのが分かる。迷光は上記のような場合、特に銀河団の観測、宇宙 X 線背景放射 (CXB) の観測、銀河面サーベイなどの空間的に広がった天体の観測に影響する。実際に ASCA 衛星では、このような観測において検出器に洩れ込む迷光が確認されている。図 3.6 に ASCA 衛星で観測されたカニ星雲による迷光の GIS によるイメージを示す。この図ではカニ星雲は望遠鏡の光軸から $60'$ 離れた左下の位置にある。図 3.6 から分かるように、検出器面全体に迷光が広がっている。

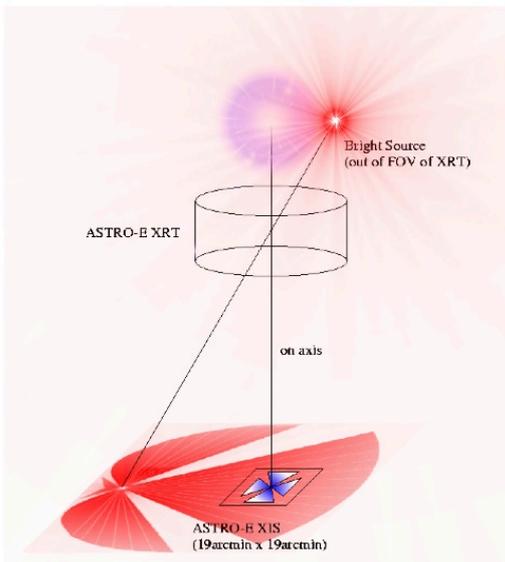


図 3.6: 視野外に明るい点源がある場合に検出器上に洩れ込む迷光の概念図。

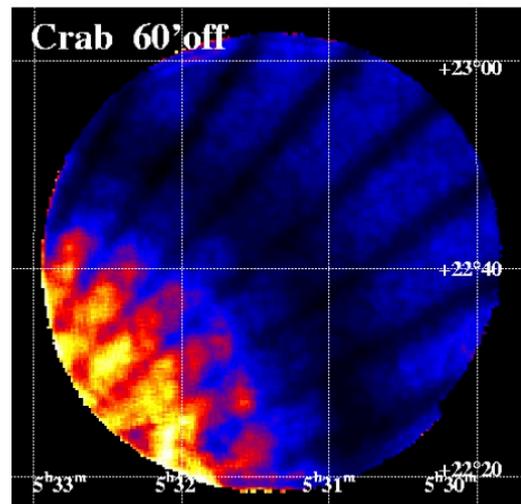


図 3.7: ASCA 衛星に搭載された GIS で観測されたカニ星雲からの迷光のイメージ。 - カニ星雲は GIS 中心から左下に $60'$ 離れた位置にある。左下の明るい部分は 2 段目のフォイルで 1 回だけ反射される成分、右上の暗い部分は背面反射成分。

3.3.1 X線望遠鏡内での迷光の経路

正常2回反射 (Normal 成分) 以外の迷光は、望遠鏡内部の経路によって以下の4種類に分類される (図 3.8)。

1. 1段目のフィルで1回だけ反射される成分 (Primary only 成分)
2. 2段目のフォイルで1回だけ反射される成分 (Secondary 成分)
3. 素通りする成分 (No reflection または Direct 成分)
4. 背面反射を含むそれ以外の成分 (Backside 成分)

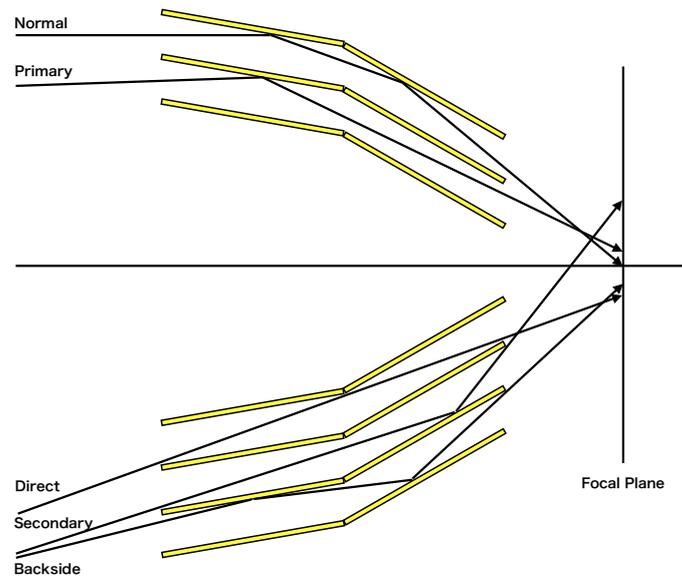


図 3.8: X線望遠鏡内部の迷光の経路。

3.3.2 検出器に洩れ込む迷光のパターン

X線望遠鏡内部での経路の他に、実際に検出器に洩れ込む迷光がどのように観測されるかを前もって理解しておくことも重要である。実際に ASTRO-EII の性能評価では Ray-Tracing を用いたシミュレーションを行い、検出器上に現れる迷光のパターンを調べている (図 3.9 H.Mori et al., 2003)。反射率および散乱に関しては ASTRO-E の地上較正試験によって得られた値を用いている。反射鏡表面の粗さは 5 \AA とした反射率曲線を使っており、入射 X 線のエネルギーは $\text{Al-K}\alpha (1.49 \text{ keV})$ である。

検出器面上での迷光のパターンを見ると、図 3.9 で示したように secondary only 成分が検出器の下側に強く現れている。一方で上側の backside 成分はそれほど高いレベルではない。また secondary only 成分については、望遠鏡のアライメントバーによる影が見えている。以後、全体として低エネルギーの X 線による迷光を主に取り除くことを考える必要がある。高エネルギー

3.3 迷光

側では臨界角のために大きな off-axis 角で迷光量が減少しているが、全反射領域では、望遠鏡の幾何学的構造を反映しているだけなので、 $20' - 60'$ の範囲では secondary only 成分の flux 量はどのエネルギーでも殆んど変化はない。正常 2 段反射成分は結像位置が検出器の外へ出ていくので flux 量が急激に減少する。flux レベルは On-axis の正常 2 段反射成分の 0.1% の secondary only 成分が $20' - 60'$ の範囲で検出器面内に洩れ込む。例えば銀河団において、中心領域から $30'$ 離れた裾を観測する場合に、中心領域の強度が 1000 倍であれば、迷光と観測領域からの X 線が同レベルになってしまい、パラメータの決定精度を大幅に劣化させてしまう。これから結論されることとして、迷光としては secondary only 成分が最も寄与が大きいということがわかる。

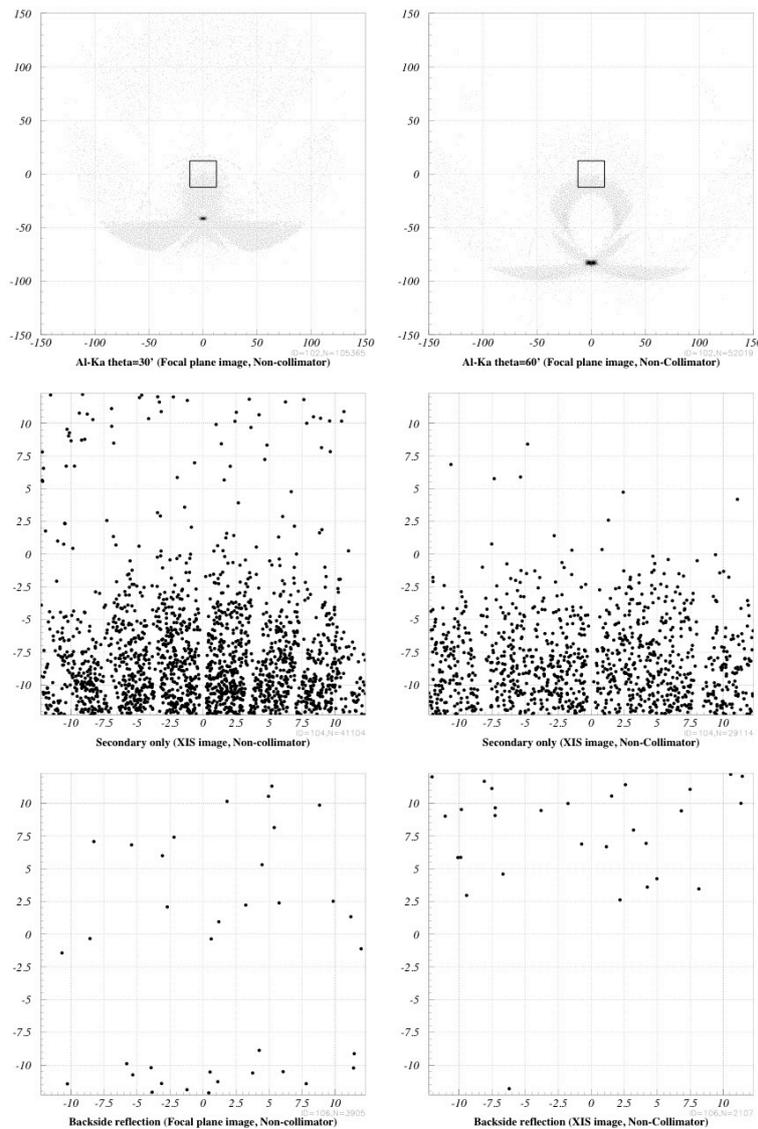


図 3.9: Ray-Tracing による迷光のイメージ ($\text{Al-K}\alpha$: 1.49 keV)。- 上: 焦点面全面、中央: XIS の視野内の secondary only 成分、下: XIS の視野内の backside 成分。左: off-axis 角= $30'$ 、右: off-axis 角= $60'$ 。

3.4 X線望遠鏡の種類

斜入射光学系では、X線入射方向から見た鏡の見込む面積は小さくなり、鏡の実面積の1/100以下になる。そのため集光力を増すには鏡は1枚ではなく、図3.10に示すように多数の鏡を同心円上に配置することが必要になる。

3.4.1 多重薄板型

集光力をできるだけ大きくするため考案された望遠鏡として、「多重薄板型」X線望遠鏡がある。これは、基板の厚さを $\sim 0.2\text{ mm}$ と極力薄くし、非常に多数(~ 200 枚)の反射鏡を同心円状に並べたもので、軽量でありながら高い開口効率を実現する。鏡面基板は直接研磨せず、アルミニウム薄板に金のレプリカをとる方法によって平滑な鏡面を実現している。ただし反射鏡は2次曲面ではなく、円錐面に近似して製作している。我が国では、あすか衛星をはじめ、ASTRO-E、すざく衛星と、このタイプの望遠鏡の開発を進めてきた。

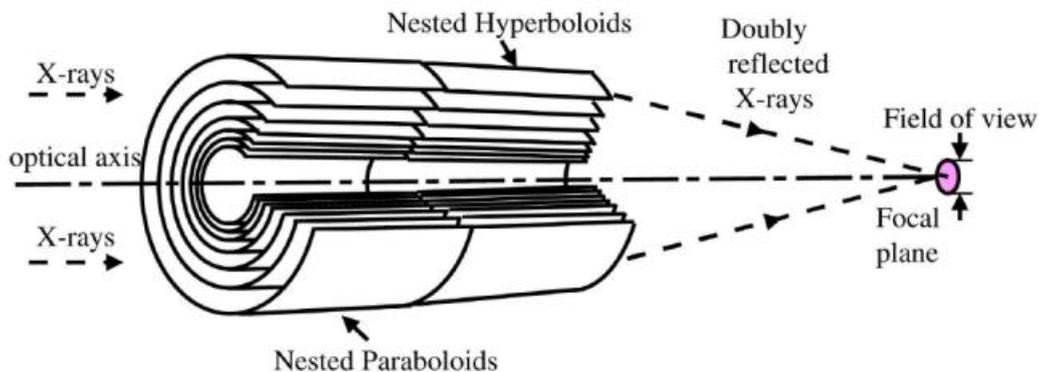


図 3.10: X線望遠鏡の断面図。-複数の反射鏡を同心円共焦点配置に組み込んだ、斜入射型 (Wolter-I) X線望遠鏡の断面図。

3.4.2 直接研磨型

一方、望遠鏡の結像性能を重視した「直接研磨型」X線望遠鏡がある。これは鏡面を直接切削、研磨し、正確な非球面(放物面又は双曲面)加工を行う。具体的には、ゼロデュアーガラス²を、小型工具を走査させ部分的に工具の滞留時間をコンピュータ制御することで、非球面形状に加工する。さらにその表面に金などを蒸着し反射率を稼ぐ。

この方法で製作された反射鏡は、鏡面を正確な理想2次曲面に加工することができるため、非常に高い結像性能を実現することができる。実際に「直接研磨型」X線望遠鏡を搭載したChandraでは結像性能0.5秒角を達成している。しかし、加工のため基板として用いるガラスの厚さを数cm程度必要とするため、開口効率は非常に悪く、またその重量は非常に大きくなる。ChandraではX線望遠鏡だけで1.5トンもの重さになる。

²熱膨張率が非常に小さく、宇宙空間のような苛酷な状況下でも安定して高分解能の結像性能を保つことができる。

3.4X 線望遠鏡の種類

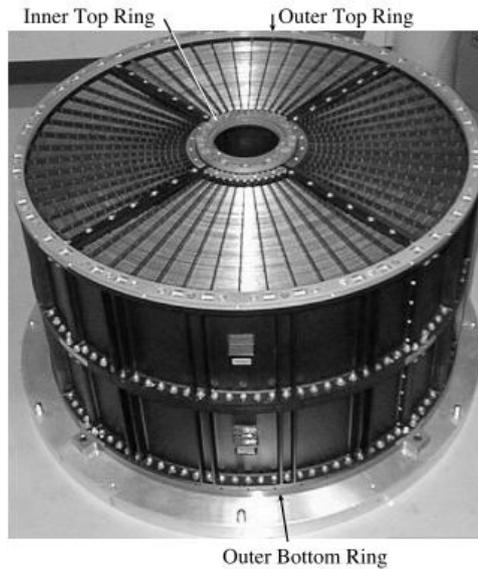


図 3.11: 「多重薄板型」X 線望遠鏡。-写真は ASTRO-E の XRT である。~ 180 μm という薄さの反射鏡 (基板: アルミニウム) が 0.5 ~ 1.2mm 間隔で 175 枚も並べられている。1 台 20 kg という軽さで大有効面積を実現する。

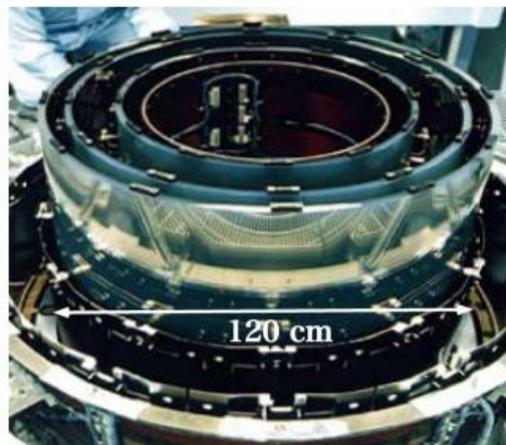


図 3.12: 「直接研磨型」X 線望遠鏡。-写真は Chandra の XRT である。数 cm の厚さの反射鏡 (基板: ガラス) が 4 枚並べられている。鏡面を直接研磨しているため、結像性能が非常に良い。しかし重さは 1 台で 1 トンもある。

3.5 ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡

2015 年度打ち上げ予定の ASTRO-H には、0.3 -12 keV の範囲の X 線を捉える軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT) が搭載され、カロリメータと組み合わせることによって、今までにない高エネルギー分解能で宇宙の謎に挑む。その構造はすざく衛星などと同じ多重薄板型が採用されており、図 3.14 に示すように Quadrant と呼ばれる 1/4 円筒を 4 つ組み合わせた構造になっている。さらに反射鏡を二段に並べた Wolter-I 型の構造を取っているため、Quadrant は上下二段に分割されており、上段を Primary、下段を Secondary と呼んでいる。また、Quadrant には反射鏡が 203 枚積層されており、反射率を稼ぐために金が表面に蒸着されている。望遠鏡の上段には迷光の漏れ込みを遮断するプリコリメータが載せられている。

図 3.13 と表 3.1 に、本論文で測定した SXT Flight Model(SXT FM) の外観と設計パラメータを載せる。



図 3.13: SXT FM の外観。

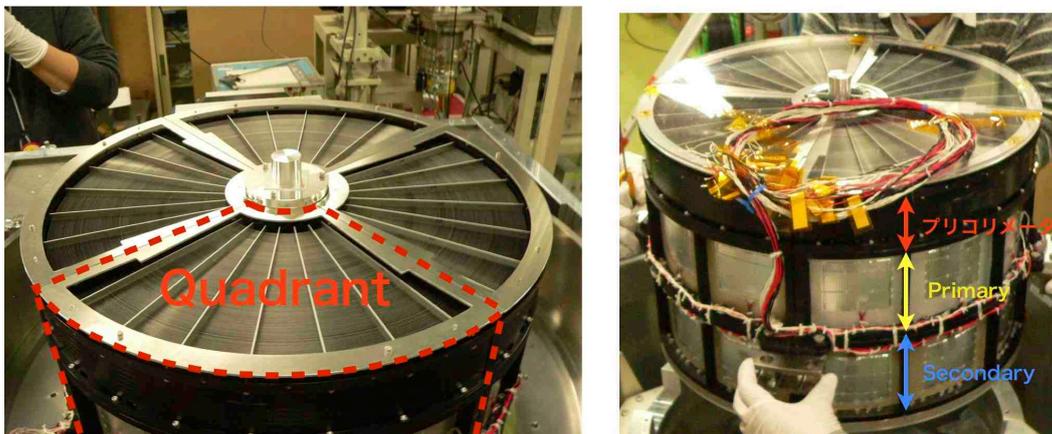


図 3.14: SXT の構造。左:SXT の Quadrant の領域。右:上から順番にプリコリメータ、Primary、Secondary。

表 3.1: SXT の設計パラメータ。

口径	450 mm
焦点距離	5600 mm
反射鏡積層数	203 枚
反射膜	Au
反射鏡の高さ	101.6 mm
反射鏡基盤の厚さ	~ 79 枚目 $165 \mu\text{m}$ ~ 153 枚目 $241 \mu\text{m}$ ~ 203 枚目 $318 \mu\text{m}$
入射角	$0.15 \sim 0.59^\circ$
要求される有効面積	$450 \text{ cm}^2 @ 1 \text{ keV}$ $390 \text{ cm}^2 @ 6 \text{ keV}$
要求される空間分解能 (HPD)	1.7 分角

第4章 ASTRO-H搭載 軟X線望遠鏡の測定システム

4.1 可視光光学装置

衛星には衛星 z 軸というものが定義されており、この衛星 z 軸とX線望遠鏡の光軸が一致するように搭載しなければならない。この軸がお互いにずれていると、集光されたX線が焦点面検出器に届かない等の問題が起こり、観測自体が破綻することになる。そのため、衛星に搭載する前にあらかじめ望遠鏡の光軸がどこを向いているかを調べておく必要がある。

望遠鏡にはアライメントキューブ（以下、キューブミラー）と呼ばれる立方体の形をしたミラー¹が装着されており、本測定においては、このキューブミラーの法線を衛星 z 軸に見立てている。これに対し、別途に望遠鏡の光軸を測定することでその法線からの離角を求める。また、望遠鏡の結像位置も把握しておかなければならない。たとえ光軸と衛星 z 軸が正対していたとしても、望遠鏡の結像位置（ x, y 座標）が検出器から外れてしまえば意味を成さない。

衛星アライメントでは、ベースプレートと呼ばれるプレート上にリファレンスミラー²、及びアライメントマーカーが取り付けられている。このリファレンスミラーの法線が衛星 z 軸と定義されており、望遠鏡に取り付けたキューブミラー法線と正対させることができる。キューブミラーと光軸の離角は本実験により定まるので、離角分だけシムで調整して傾けることによって衛星 z 軸と光軸を正対させる。一方、結像位置はあらかじめ本実験でカメラシステム（詳細は5.4章）にその位置を記録しておく。こうすることで、ベースプレートに記されたアライメントマーカーとカメラシステムに記録した結像位置を一致させることができ、望遠鏡搭載位置の x, y 座標が一点に定まる。衛星アライメントの概念図を図4.1に示す。

本来、X線望遠鏡はX線を集光するための望遠鏡であるが、可視光領域でも全反射を起こして集光する。そのため光軸を調べる時にはしばしば可視光を利用した平行光源が用いられる。本実験においては、望遠鏡光軸、結像位置の記録は可視光を使って測定する。

¹6面全てがミラーになっている。

²望遠鏡に取り付いているキューブミラーと同様のものだが、区別をつけるため、ベースプレートに取り付けられているキューブミラーはリファレンスミラーと呼ぶことにする。

4.1 可視光光学装置

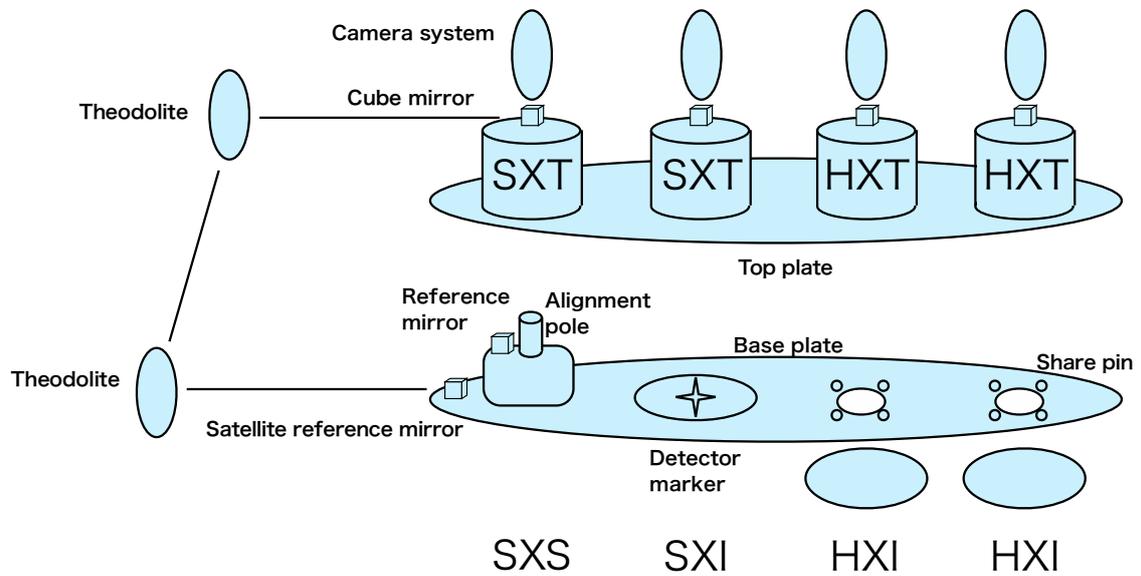


図 4.1: 衛星アライメントの概要。

4.1 可視光光学装置

4.1.1 平行光源

可視光測定は愛媛大の平行光源を使用する（図 4.2）。接眼部に取付けたピンホール光源からの照射光が平面斜鏡、主鏡の順に照射され、反射光が筒先から $\phi 450$ mm の平行光になり筒前方へ照射される。100 ~ 1000 μm の 4 種類のピンホールを使って、平行度を調整する。測定で使用した 100 μm の場合、およそ 5 秒角と非常に高い平行度を実現している。表 4.1 に平行光源の仕様を示す。

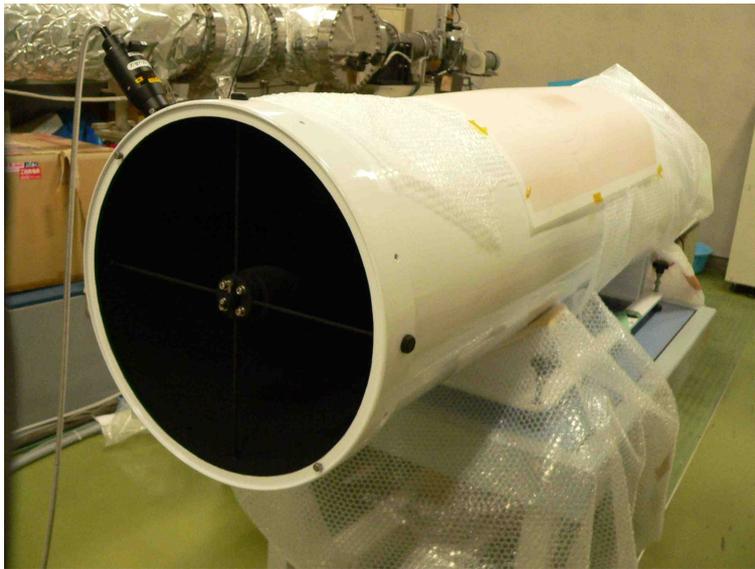


図 4.2: 愛媛大の平行光源。平行度は約 5 秒角。

表 4.1: 愛媛大平行光源の仕様。

口径	450 mm
ピンホール	1000 μm , 500 μm , 300 μm , 100 μm
平行度	5 秒角（ピンホール 100 μm 時）
焦点距離	1824 mm

4.1 可視光光学装置

4.1.2 検出器

CMOS カメラ

望遠鏡で集光された可視光は CMOS カメラ (Canon 製 EOS 40D : 図 4.3) で撮像する。 CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) の基本的な働きは CCD と同じで、光を電気信号に変えるイメージセンサーである。 CCD と違う点は、信号の読み出し速度の速さと、消費電力の少なさが挙げられる。また、周辺回路を含めてひとつひとつのセンサーに信号読み出しのためのチップがセットになっているため、比較的 low コストで製造することができる。表 4.2 に CMOS カメラの仕様を示す。



図 4.3: CMOS カメラ。

表 4.2: CMOS カメラの仕様。

形式	ストロボ内蔵デジタル一眼レフ AF・AE カメラ
撮像素子	22.2 × 14.8 mm、約 1010 万画素
ISO 感度	ISO 100 ~ 1600 相当、ISO 3200 相当の感度拡張が可能
記録画素数	3888 × 2592 ピクセル
記録方式	JPEG、RAW(14 ビット)
シャッター	電子制御式フォーカルプレーンシャッター
シャッタースピード	1/8000 ~ 30 秒 (1/3、1/2 段ステップ)
電源	専用リチウムイオン充電電池 (BP-511A/511/514/512)
サイズ	145.5(幅) × 73.5(奥行) × 107.8(高さ) mm
重さ	約 740 グラム (本体のみ)

4.1 可視光光学装置

カメラシステム

望遠鏡の結像位置の再現性を測定する際に用いるシステム。CCDカメラ、レンズ、望遠鏡とカメラシステムを固定する治具の3つから成る(図4.4)。CCDカメラはBITRAN BS-42N、レンズはNIKON Ai AF Micro-Nikkor 200mm f/4D IF-EDを使用。表4.3および4.4にCCDカメラとレンズの仕様を示す。



図 4.4: 左 : 右から順番に BITRAN BS-42N CCD カメラ、NIKON Ai AF Micro-Nikkor レンズ、レンズと望遠鏡に固定するための治具。右 : くみ上げた様子。各接続部はアルルダイトで固着している。

表 4.3: CCD カメラの仕様。BITRAN 製。

型番	BS-42N
通信形式	USB または PCI
CCD 素子	KAI-04022
画素数	400 万画素
ピクセル数	2048 × 2048
A/D 変換	16 bit(65536 階調)
冷却方法	空冷または水冷 1 段ペルチェ素子、ファン付
冷却温度	空冷時 外気温-25 °C 水冷時 水温-30 °C
シャッタースピード	0.03 秒から 1 時間まで (0.1 秒刻み)
カメラ寸法	約 78mm(W) × 107mm(H) × 91mm(D)
重さ	約 600 グラム
画像データ形式	RAWTIFF(非圧縮)BMPJPEGGIF など

4.2 宇宙科学研究所 30mX 線ビームライン

表 4.4: レンズの仕様。Nikon 製。

型番	Ai AF Micro-Nikkor 200mm f/4D IF-ED
焦点距離	200 mm
最大絞り	50 mm
最小絞り	6.25 mm
画角	12 °20'(35mm 判一眼レフカメラ、FX フォーマットのデジタル一眼レフカメラ)
最短撮影距離	0.5 m
最大撮影倍率	1 倍
カメラ寸法	約 76 mm (最大径) × 193 mm
重さ	約 1190 グラム

4.2 宇宙科学研究所 30mX 線ビームライン

X線望遠鏡の性能評価には平行度の高いX線ビームが必要となる。これは観測天体からのX線がほぼ完全な平行光とみなせるためである。従来、日本のX線天文衛星のX線望遠鏡の性能評価は、宇宙科学研究所に設置されている30m X線ビームラインを用いてきた。X線ビームラインには位置の可変機構を持たない固定式X線発生装置が採用されており、固定式発生装置からのビームは、陰極ターゲット面の数 mm 角の領域を焦点として発生する。従って、例えば数 m 先で口径の大きなX線ビームを得ようとする、完全な平行光にはならず拡散光になってしまう。そこでX線ビームラインでは高い平行度を得るために、四極スリットにより細く絞ったペンシルビームを用いる。固定式発生装置から出射されたビームは、まず制動放射による連続X線を除去するためフィルターや二結晶分光器にかけられる。そして発生装置から 27 m の距離にある四極スリットによって、典型的には 2 mm × 2 mm 角までX線ビームを絞ってコリメートした後、X線望遠鏡に照射する。この場合、X線ビームの平行度は固定式発生装置の実効焦点を点源と見なすと、~13 秒角の平行度が達成される。その反面、X線ビームをX線望遠鏡入射面全面に一度に照射することは不可能となる。結像性能及び有効面積の測定では、望遠鏡全面にX線ビームを照射する必要があるが、固定式発生装置は位置の可変機構を持たないことから、X線望遠鏡と検出器が乗るステージをX線発生装置に対して相対的に移動させることによって、全面照射を再現する。

X線望遠鏡の性能測定は Quadrant または望遠鏡全体で行ない、これらを望遠鏡ステージに取り付ける。そしてセオドライトを用いてビームラインの系と可視光で求めた望遠鏡の光軸を合わせた後、四極スリットによって細く絞ったペンシルビームを使って、望遠鏡によって集光されるX線光子が最大になるよう $S\theta_y$ 軸、 $S\theta_z$ 軸、 S_y 軸、 S_z 軸を調整し、さらに厳密に各軸の軸合わせを行なう。その後、望遠鏡の性能測定を行う。

図 4.5 に宇宙科学研究所X線ビームラインの全体図を示す。また、このビームラインを構成するサブシステムの詳細について順に説明していく。

4.2 宇宙科学研究所 30mX 線ビームライン

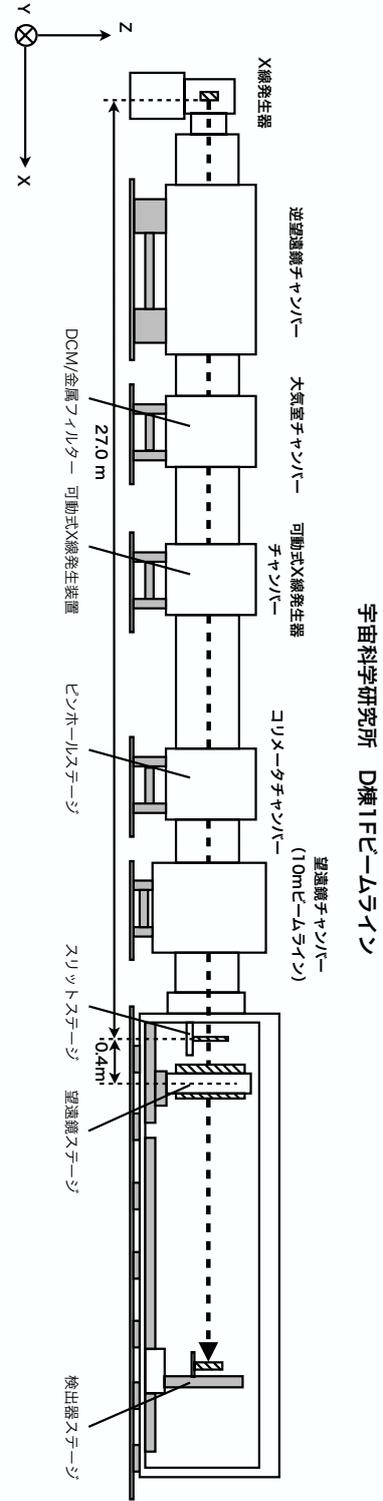


図 4.5: 宇宙科学研究所 X 線ビームラインのチャンパー配置図。

4.2.1 X 線発生装置

宇宙科学研究所標準 X 線光源室に設置されている X 線発生装置は、水冷式回転対陰極型の理学電機製ロータフレックス (RU-200) である。X 線発生原理は次のようになっている (図 4.6)。まず陽極であるフィラメントを加熱することによって熱電子を発生させる。この熱電子は、回転する陰極ターゲットとの間にかげられた管電圧によって加速され、ターゲットに衝突する。この時制動放射のメカニズムによって電子の受けた加速度と垂直方向に電磁波が発生する。管電圧は kV のオーダーなので、発生する電磁波は X 線領域が主となる。一方で、ターゲットに蒸着された金属の内殻電子を弾き飛ばしめるので、外殻電子のエネルギー準位との差にしたがった特性 X 線も発生する。

宇宙科学研究所 X 線ビームラインでの測定に用いるターゲット物質としては、C-K α (0.282 keV)、Al-K α (1.49 keV)、Ti-K α (4.51 keV)、Cu-K α (8.04 keV)、Pt-L α (9.44 keV) の 5 種類である。照射された熱電子のターゲット上でのスポットサイズは 0.5 mm \times 10 mm であるが、X 線の出射方向 (X 軸) に対してターゲットの回転軸は 6° 傾けて取り付けられているために、下流側から見込むビームの実効焦点サイズは 0.5 mm \times 1 mm になる。また X 線ビームの強度とエネルギー領域は、フィラメント電流と管電圧を調整することで制御している。X 線発生装置の仕様を表 4.5 に示す。

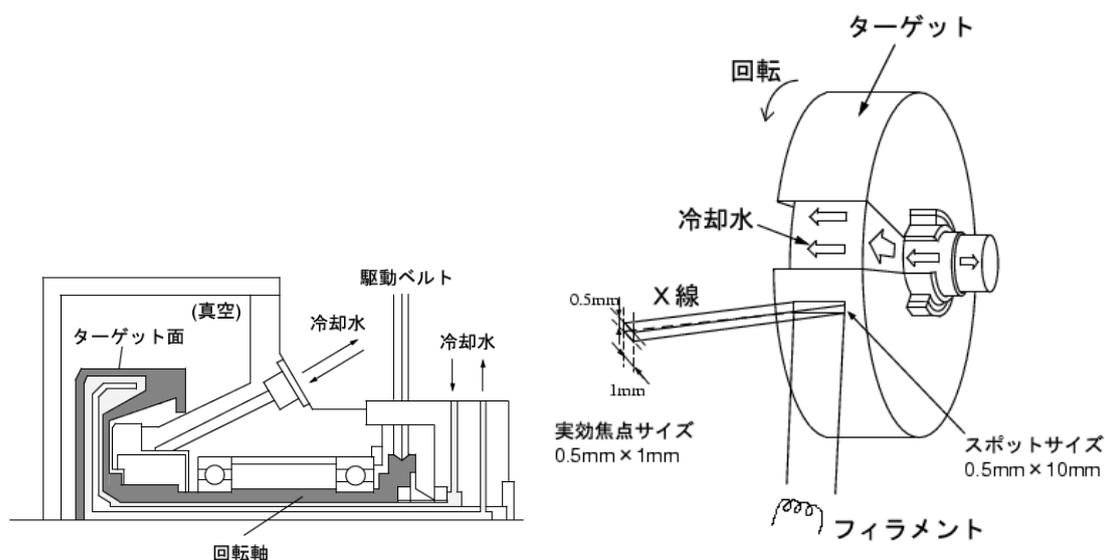


図 4.6: X 線発生装置の構成図。

表 4.5: X 線発生装置の仕様。

最大定格出力	60kV 200mA (12kW)
管電圧設定	5 ~ 60kV
管電流設定	10 ~ 200 mA
ターゲット回転数	6000 rpm
X 線源サイズ	1.0(Z) × 10(Y) mm ²
実効焦点サイズ	1.0(Z) × 1.0(Y) mm ²
X 線ビーム強度の安定性	< 3% (立ち上げから 1 時間後)

4.2.2 真空系

宇宙科学研究所 X 線ビームラインの長さは、高い平行度を実現するために 36 m にもおよぶ。しかし地上較正試験時に使用される X 線領域 (~10 keV) では、大気中の分子による吸収や散乱のために X 線は大気中をこれほどの距離を進むことができない。そこで X 線の進むダクトを真空に引いて、大気分子による吸収、散乱を防いでいる。ビームライン全系に、ロータリーポンプとターボ分子ポンプの組が 9 組、さらに測定チャンバーの粗引き用にスクロールポンプが 2 台、ロータリーポンプとメカニカルブースターポンプの組が 1 台設置され、ゲートバルブによって分けられた 6 つのエリアを個別に真空引きをする。ロータリーポンプは大気圧から ~ 10^{-1} Torr 程度までの低真空を粗引きし、 10^{-1} Torr 以上の高真空では、ターボ分子ポンプと背圧用補助ポンプとしてロータリーポンプを同時に使用して真空引きを行なっている。

ビームライン全系の真空度は主に 5 つのワイドレンジゲージでモニターされている。ワイドレンジゲージはピラニゲージとマグネトロンゲージを組み合わせたものであり、真空度 1.0×10^{-3} Torr でピラニゲージからマグネトロンゲージに自動的に切り替わり、大気から 1.0×10^{-9} Torr の範囲で真空度を測定することができる。またこの 5 つのワイドレンジゲージの出力結果は House Keeping 用のパソコンで管理することができる。X 線発生装置の真空度はピラニゲージ (測定範囲: $7.6 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^{-3}$ Torr)、イオンゲージ (測定範囲: $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-7}$ Torr)、でモニターされており、通常大気圧 ~ 10^{-3} Torr まではピラニゲージ、 $10^{-3} \sim 10^{-7}$ Torr まではイオンゲージを使用している。

図 4.7 に宇宙科学研究所 X 線ビームラインに設置されている真空・排気装置の全体図を示す。

4.2 宇宙科学研究所 30mX 線ビームライン

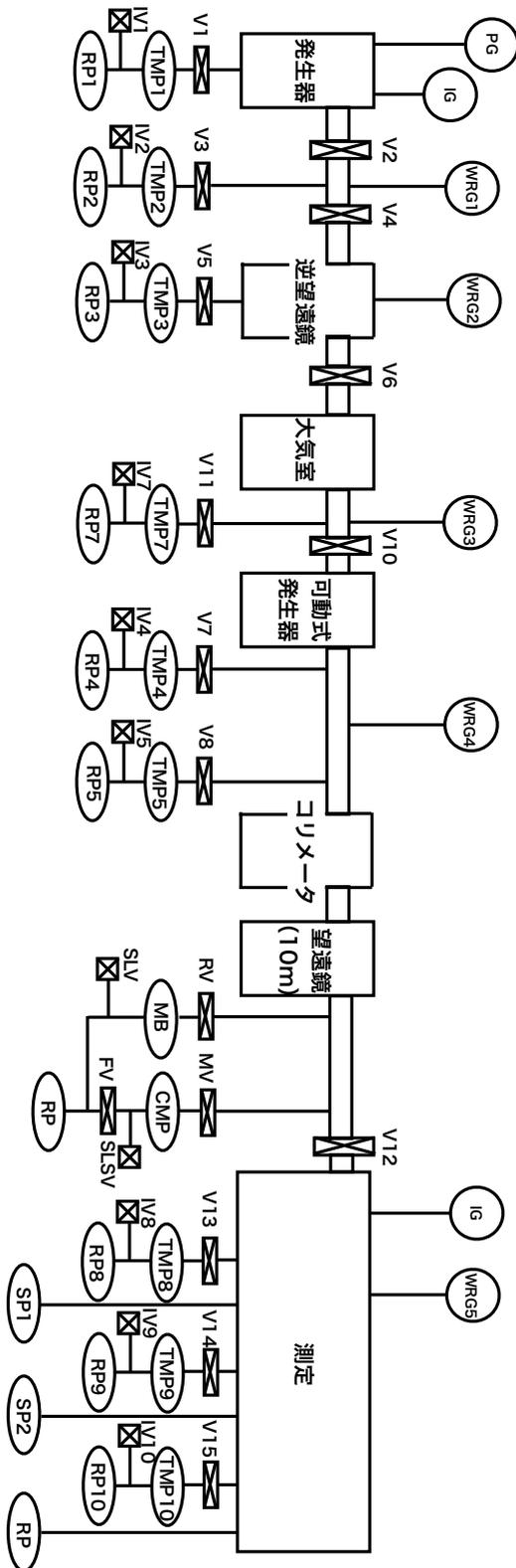


図 4.7: 宇宙科学研究所ビームラインにおける真空・排気装置の全体図。

4.2.3 透過型フィルター・二結晶分光器

X線発生装置からのX線は、前述したように特性X線と制動放射による連続X線からなるが、X線の正反射及び散乱成分は強いエネルギー依存性を持っているために、測定にはできる限り単色なX線を用いる方が良い。このために、大気室チェンバーには数種類のフィルターが入っており、目的とする特性X線以外のエネルギーの連続X線をフィルターで取り除くことによって単色化を行なっている。フィルターの構成を図4.9に示す。

- 透過型フィルター

透過型フィルターは物質の吸収端における吸収係数の急激な変化を利用した、最も簡単な分光素子である。各フィルタのK吸収端が、目的とする特性K-X線のエネルギーのすぐ上に来ていることを利用して、特性X線より高エネルギー側の連続X線を取り除くことができる。しかし低エネルギー側の連続X線及び $K\beta$ 線は除去することができない。

X線望遠鏡の測定に用いられる特性X線とその時に使うフィルタの種類を表4.6に示す。また各フィルターの透過率を図4.8に示す。

表 4.6: 特性X線と対応するフィルターの種類。

特性X線	フィルター物質	フィルターの厚さ [μm]
Al-K α (1.49 keV)	Al	15
Ti-K α (4.51 keV)	Ti	50
Cu-K α (8.04 keV)	Ni	40
Pt-L(9.44 keV)	Ni	40

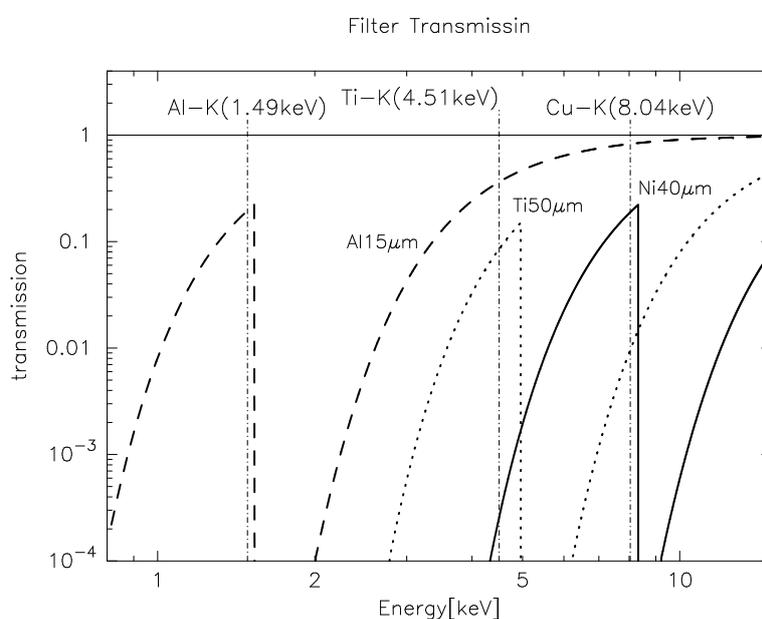


図 4.8: フィルターの透過率。

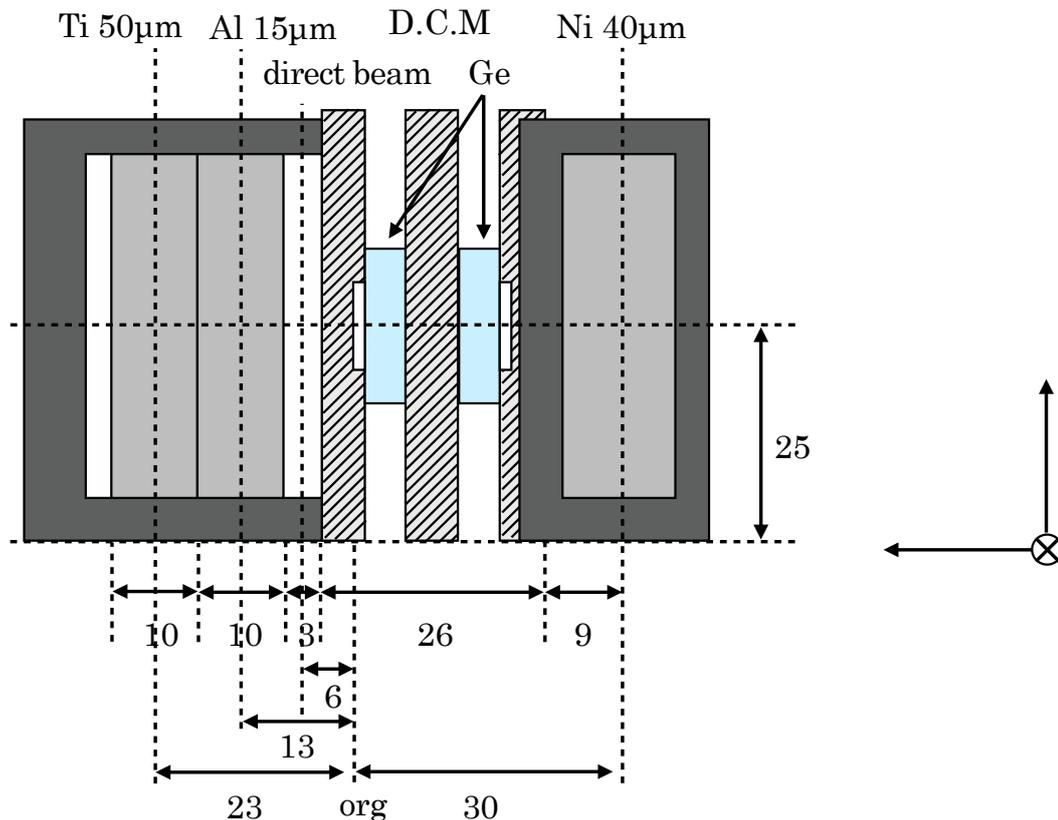


図 4.9: 大気室チェンバー中のフィルターの配置図。

● 二結晶分光器

大気チェンバ には二結晶分光器 (Double-crystal Monochromator : DCM) が設置されている。これはブラッグ反射 ($\lambda = 2d \sin \theta$) を利用した分光器である。1999年7月に DCM が 30m ビームラインに設置され、以降 Pt の蛍光 X 線を用いた測定が可能となった。DCM は他の波長においても、フィルターでは混入の防げない吸収端より低エネルギー側の連続成分をカットすることができる。特に X 線望遠鏡の有効面積が急激に減少していく $E = 10 \text{ keV}$ 付近の測定を行なえることは重要であり、さらに詳細な応答関数の作成が可能となる。

DCM は一体加工された厚さ 3 mm の Ge(220) の結晶面を平行に向かい合わせた形をしており、入射した X 線は 2 回のブラッグ反射によって単色化される。この一対の結晶が回転ステージ (A_θ 軸ステージ) の上に乗っており、さらにこのステージが並進ステージ (A_y 軸ステージ) に乗っている。並進ステージによって、透過型フィルターと DCM との切替えを行ない、回転ステージによって入射エネルギーに対応した角度に結晶面を制御する。また、図 4.10 のように回転ステージの中心に第 1 結晶面が配置されており、固定式発生装置から入射してくる X 線が常に第 1 結晶面の同じ位置に当たるよう設計されている。回転ステージの最小ピッチは 7.2 秒角である。これは、図 4.11 に示したように $\text{Cu-K}\alpha_1, \alpha_2$ を区別することができる。

4.2 宇宙科学研究所 30mX 線ビームライン

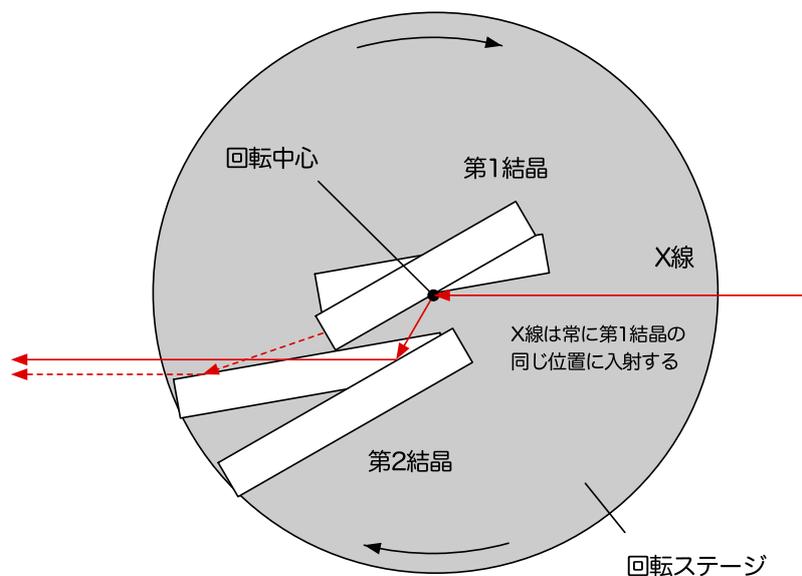


図 4.10: 30m ビームライン搭載 DCM の結晶配置図。- A_θ 軸ステージの中心に第 1 結晶面が置かれており、X 線は常に第 1 結晶の同じ位置に入射する。

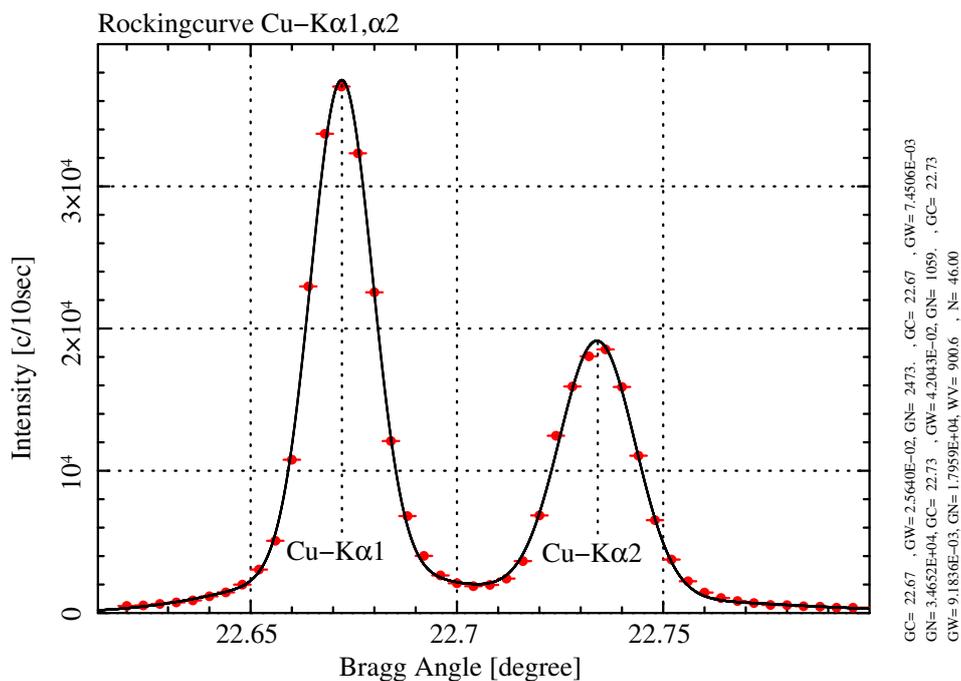


図 4.11: Cu-K α (8.04 keV) 付近のロッキングカーブ。- DCM を回転させ、入射角度を変えていったときの光量変化を表している。30m ビームライン搭載 DCM は Cu-K α_1, α_2 を区別することができる。

X 線の出射位置

DCM に入射した X 線は 2 回反射のため、図 4.12 のように、ある距離 Δx だけずれた位置に出射されることになる。この Δx は図 4.12 のように X 線と第 1 結晶との交点を A、第 2 結晶との交点を B とし、線分 AB の距離を a 、入射角度を θ 、第 1 結晶と第 2 結晶間の距離を b とすると次のように表される。

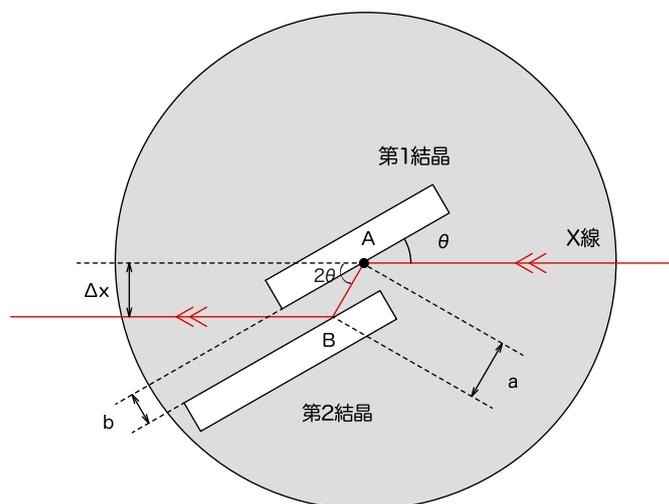


図 4.12: DCM での 2 回反射。- DCM に入射した X 線は DCM 前後でビームに垂直な方向に Δx ずれる。

$$\begin{aligned}\Delta x &= a \times \sin 2\theta \\ &= 2a \sin \theta \cos \theta\end{aligned}\quad (4.1)$$

また、

$$a = \frac{b}{\sin \theta}\quad (4.2)$$

より、

$$\begin{aligned}\Delta x &= 2 \frac{b}{\sin \theta} \sin \theta \cos \theta \\ &= 2b \cos \theta\end{aligned}\quad (4.3)$$

となり、DCM に入射した X 線は入射位置から $2b \cos \theta$ 離れた位置に出射される。

4.2.4 四極スリット

X線望遠鏡の性能測定においてはできるだけ高い平行度のX線を当てる必要がある。そのため、X線発生装置から約27 mの距離をとり、四極スリットでビームを細く絞って使うことで、12秒角(2 mmスリット使用時)という高い平行度を実現している。四枚のスリットはそれぞれ独立の可動ステージに載っており、ワークステーションから直接制御することができる。また、これら四枚のスリットプレートは x 座標が異なり、スリットを閉め切った状態であっても、ステージのワーク内でプレート同士が接触することは無い。4極スリットの構成図を図4.13に示す。

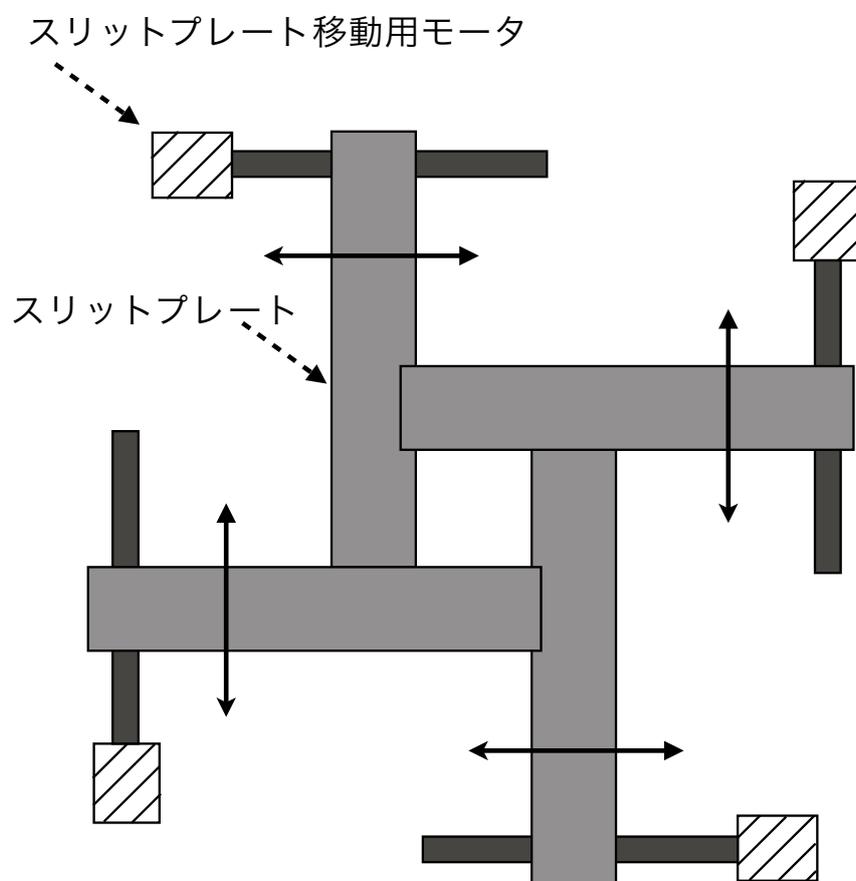


図 4.13: 四極スリットの構成図。

4.2.5 測定チャンバー

宇宙科学研究所 X 線ビームラインにおける測定チャンバーは全長 11.3 m、直径 1.8 m の円筒型である（図 4.14）。測定チャンバーは 2 台のスクロールポンプ、2 台のロータリーポンプ及び 1 台のメカニカルブースターポンプにより真空粗引きを行い、その後は 3 台のターボ分子ポンプにより 10^{-5} Pa 程度まで高真空にすることが可能である。チャンバーには内部へのアクセスがしやすいように、上流側と下流側にドアが設けられている。内部は十分に人が入れる空間があり、チャンバー内部での作業も容易である。図 4.15 に測定チャンバーの外観を示す。

測定可能な望遠鏡は最大口径 450 mm、焦点距離は 9 m と非常に長い。さらに測定チャンバーの内部は一つの大きな空洞になっており、検出器ステージと望遠鏡ステージが同一空間に設置されている。

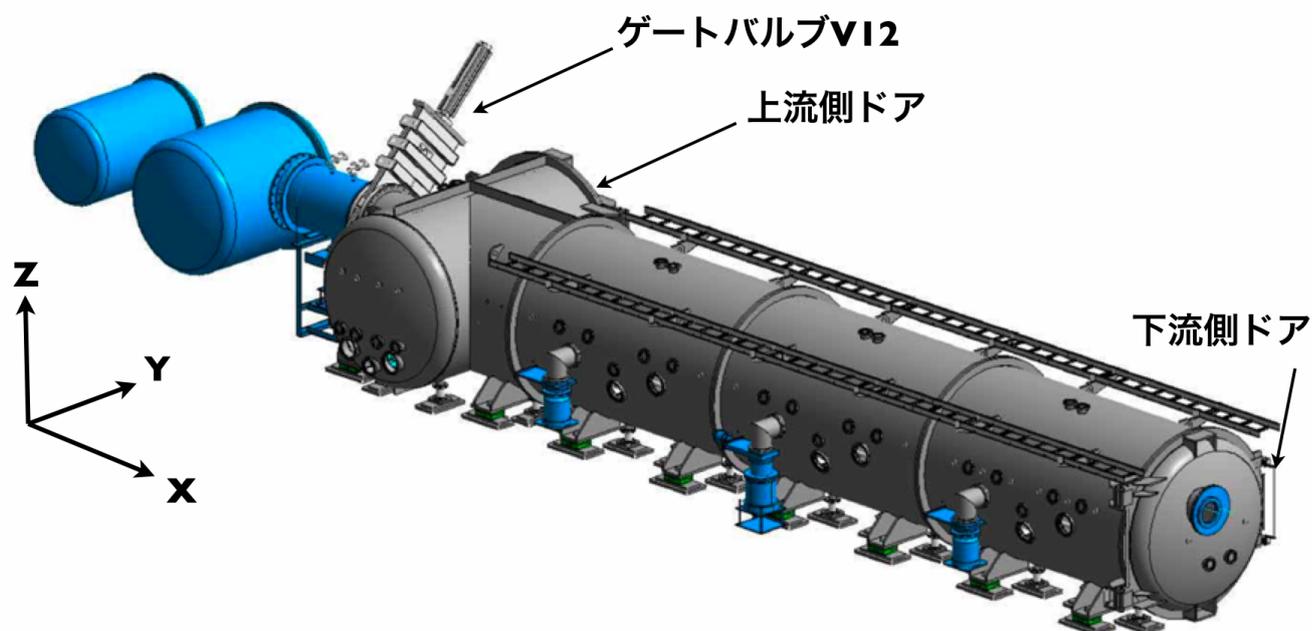


図 4.14: 測定チャンバーの 3D イメージ。



図 4.15: 左：ビームライン最下流から見た測定チャンバーの外観。右：チャンバー上流側のドアから下流側に見たチャンバー内部。

4.2.6 検出器ステージ・望遠鏡ステージ

検出器ステージ、望遠鏡ステージの基本情報を表 4.7 に示す。また、ステージの模式図を 4.16、移動ステージ軸を示したステージの外観を図 4.17、に示す。望遠鏡ステージには S_y 、 S_z 、 $S\theta_x$ 、 $S\theta_y$ 、 $S\theta_z$ の 5 軸が搭載されている。検出器ステージは D_y 、 D_z の 2 軸が搭載されており、さらに検出器ステージにはそれと独立した検出器微調整ステージ d_x 、 d_y 、 d_z の 3 軸が搭載されている。焦点距離の位置に検出器を置く調整は、主にこの d_x 軸が担っている。検出器微調整ステージ 3 軸は主に比例計数管と X 線 CCD カメラの切り替えに用いる。この微調整ステージにより、検出器ステージと望遠鏡ステージの相対位置を変えることなく検出器の切り替えが行える。また、図 4.17 に示すように、検出器ステージ自体がレールに載っており、 x 方向に大きく移動させることが可能である。これにより、焦点距離 0.7 m ~ 9.0 m の望遠鏡の測定が可能となる。

ステージ移動スピード

ステージの移動スピードは表 4.7 で示した通りである。これはステージ仕様上の推奨スピードである。しかしこのスピードでステージを移動させた時に検出器、望遠鏡ステージの両方の z 軸においてパルスモーターの空転が発生し、ステージが稼働しないという自体が発生した。ステージ移動スピードを $1/4$ にすることで稼働することを確認したが、ステージ加速レートへの依存性は見られなかった。これはステージドライバへ送られるステージ駆動パルス信号に混入したノイズの影響と考えられる。対処として、ステージドライバのコネクタ付近と、ステージコントローラのコネクタ付近で信号線にフェライトを着けることによりパルスモーターの空転は解消され、ステージは推奨スピードで稼働させられるようになった。フェライトを着けた箇所を図 4.18 に示す。

表 4.7: 望遠鏡ステージ、検出器ステージの基本情報。

望遠鏡ステージ			
軸	移動量 [mm,deg/pulse]	移動可能範囲 [mm,deg]	移動速度 [mm,deg/sec]
Sy	0.01	-270 ~ 370	4.0
Sz	0.00025	-250 ~ 250	1.0
S- θ_x	0.001	0 ~ 360	1
S- θ_y	0.00025	-5 ~ 5	0.25
S- θ_z	0.001	-5 ~ 5	1

検出器ステージ			
軸	移動量 [mm/pulse]	移動可能範囲 [mm/pulse]	移動速度 [mm/sec]
Dy	0.001	-250 ~ 650	4.0
Dz	0.00025	-250 ~ 250	1.0
dx	0.002	-50 ~ 50	2.0
dy	0.00025	-2.5 ~ 2.5	4.0
dz	0.004	-60 ~ 60	0.25

4.2 宇宙科学研究所 30mX 線ビームライン

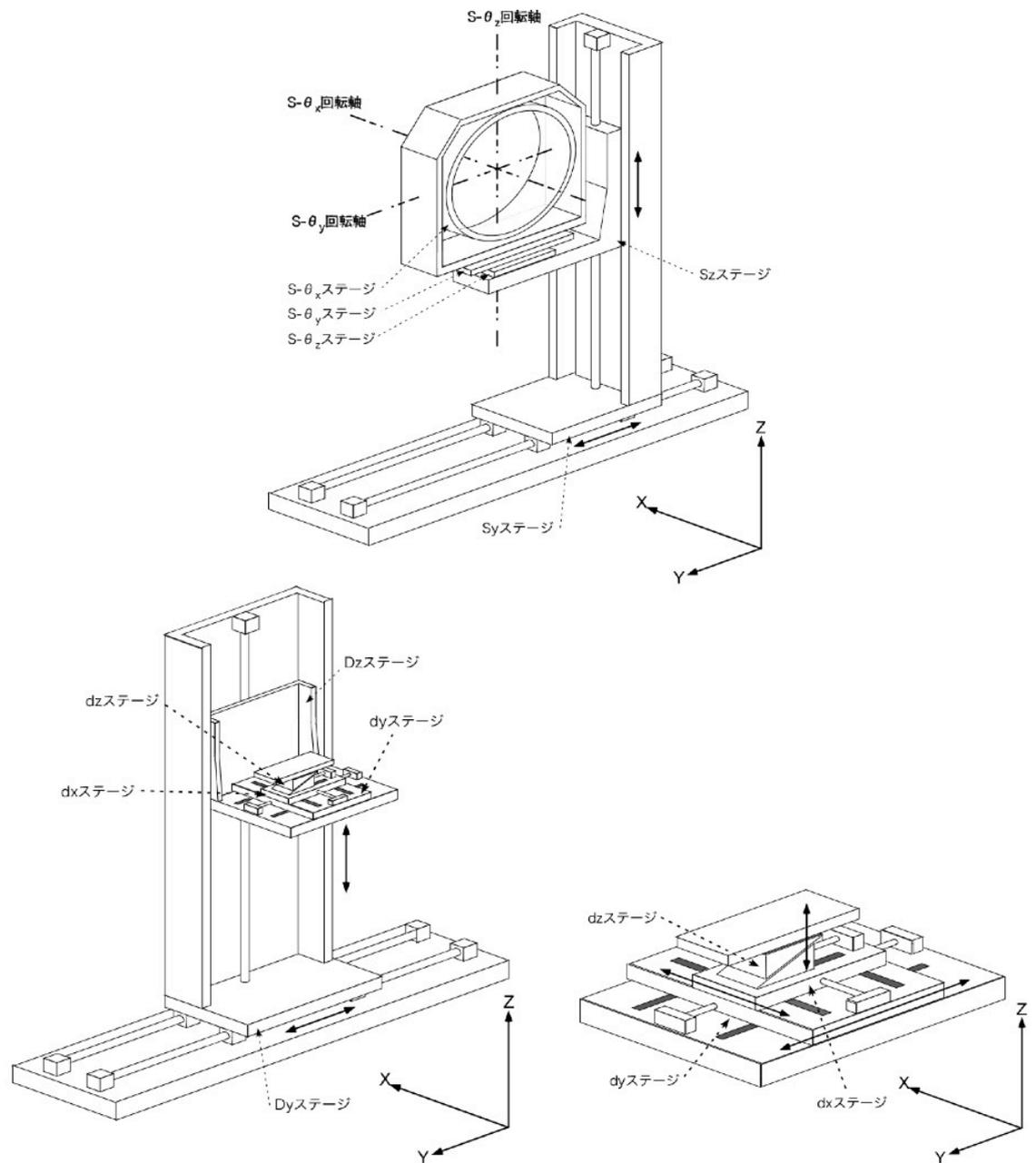


図 4.16: 上: 望遠鏡ステージ、下左: 検出器ステージ、下右: 検出器微調整ステージの概要図。

4.2 宇宙科学研究所 30mX 線ビームライン

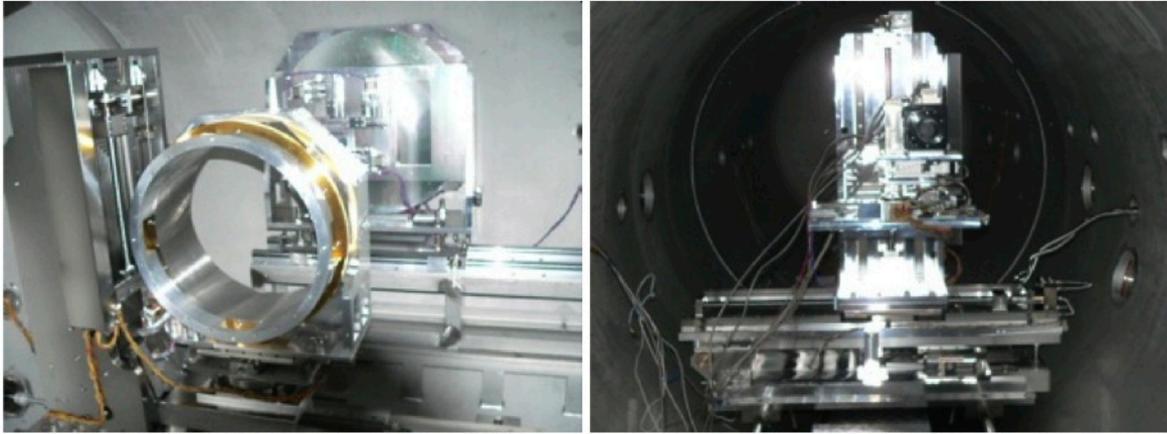


図 4.17: 左：ビームライン最下流から見た測定チャンバの外観。右：チャンバ上流側のドアから下流側に見たチャンバ内部。

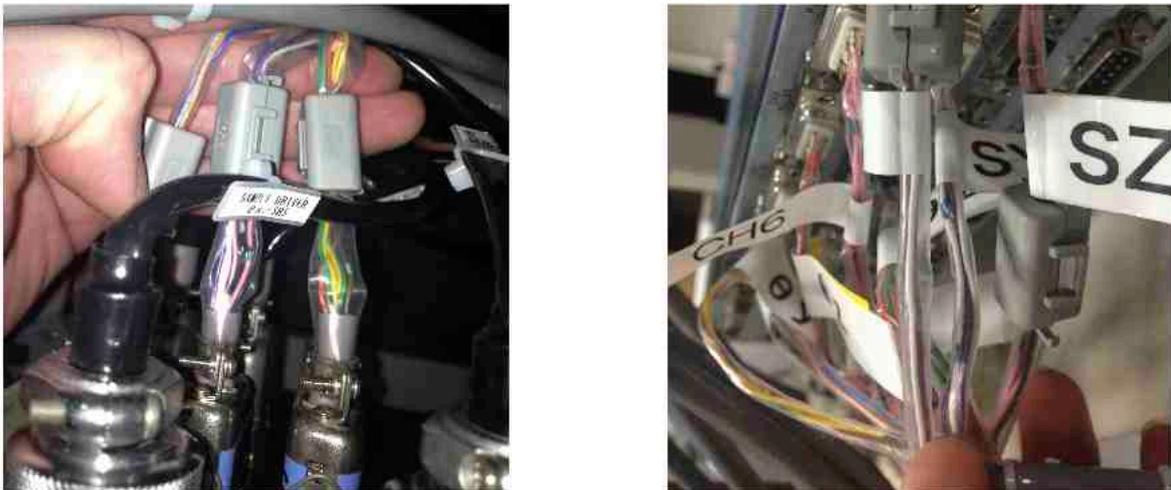


図 4.18: 左：ステージドライバ付近。右：ステージコントローラ付近。信号線にフェライトが装着されている。

4.2.7 検出器

検出器チェンバーのステージには、検出器として以下のものが搭載されている。

ガスフロー型比例計数管 (P.C.)

宇宙科学研究所 X 線ビームラインで使われている比例計数管はガスフロー型であり、P10 ガス (Ar:90%、CH₄:10%) を大気圧で使用する。比例計数管は位置撮像能力はないが、分光測定が可能である。表 4.8 に比例計数管の仕様をまとめる。

表 4.8: ガスフロー型比例計数管の仕様。

使用ガス	P10 ガス (Ar:90%、CH ₄ :10%) 大気圧で使用
ガス深さ	20 mm
X 線入射窓	厚さ 1 μ m ポリプロピレン + カーボンダグ 直径 12.0 mm
陽極芯線	直径 50 μ m タングステン
印化電圧	2100 V (C-K α の場合のみ 2200 V)
エネルギー範囲	~ 12.3 keV (検出効率 10%以上)
エネルギー分解能	~ 45% (Al:1.49keV) ~ 30% (Ti:4.51keV) ~ 20% (Cu:8.04keV)
線形増幅器の増幅率設定	Al : 100 \times 0.5, Ti : 50 \times 0.5, Cu : 50 \times 0.5

P.C. の出力信号はマルチチャンネルアナライザー (MCA) でエネルギースペクトルに変換される。宇宙科学研究所 X 線ビームラインでは PocketMCA MCA8000A を使用しており、ワークステーションが読み取るのはこの MCA の出力データである。表 4.9 に MCA8000A の仕様をまとめる。

表 4.9: マルチチャンネルアナライザー MCA8000A の仕様。

ADC	逐次比較型 ADC
Channel	16k,8k,4k,2k,1k,0.5k,0.25k
Conversion time	5 μ s
最大カウント	4.29 $\times 10^9$ counts/ch
動作温度	0 - 70 $^{\circ}$ C
微分非直線性	< $\pm 0.6\%$
積分非直線性	< $\pm 0.02\%$
ゲインスタビリティ	< ± 10 ppm/ $^{\circ}$ C

背面照射型 CCD カメラ

CCD とは Charge Coupled Device(電荷結合素子) の略であり、本来は電荷を移動させるためのデバイスを意味する。現在宇宙科学研究所 X 線ビームラインには、浜松ホトニクス製背面照射型 X 線 CCD カメラシステムが設置されている。一辺 $22.5 \mu\text{m}$ の正方形ピクセルが 1242×1152 個からなっており、位置分解能をもった撮像能力があるために、サンプルのアラインメントやサンプルからの反射 X 線の位置を確認するのに使われる。また暗電流を減らすために、ペルチェ素子を使って -60°C まで冷却して使用する。またペルチェ素子は、チラーで 20° に保った冷却水を循環させることにより冷却されている。

図 4.19 に前面照射型と背面照射型 CCD の断面図及び電荷転送方式の概念図を示す。また表 4.10 に X 線 CCD カメラの仕様をまとめる。

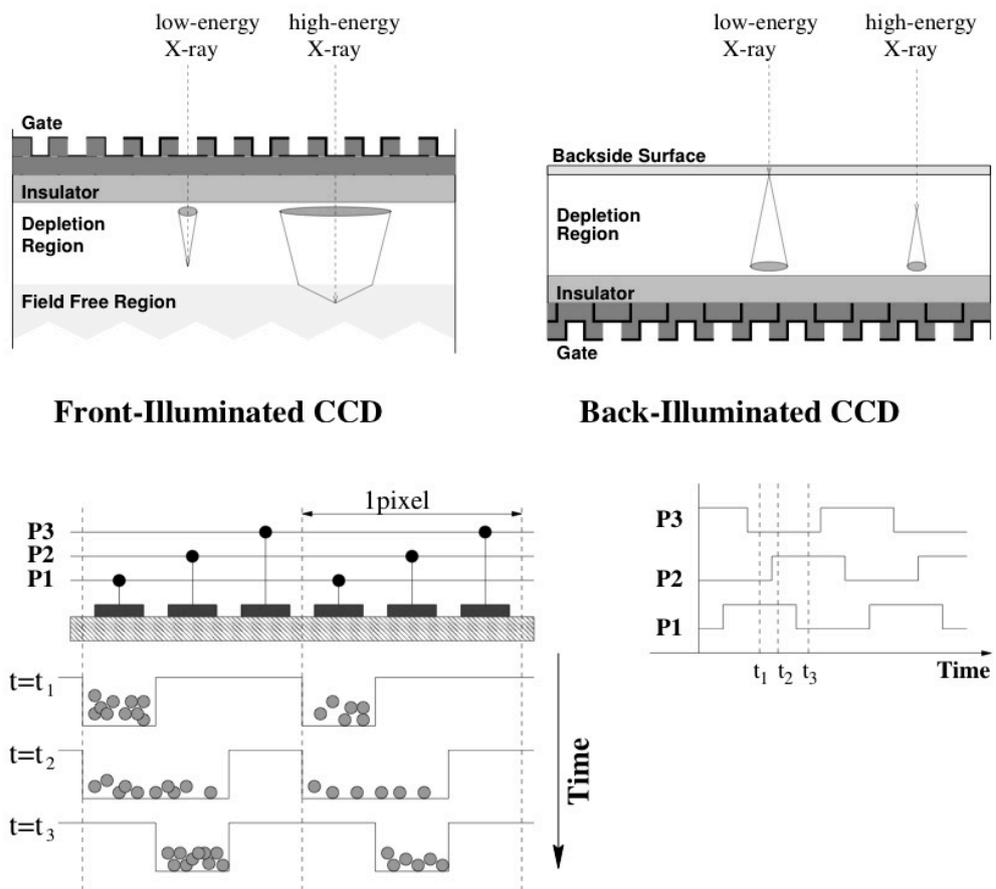


図 4.19: 背面照射型 CCD カメラの原理 – 上: 前面照射型と背面照射型の断面図、下: 電荷転送の概念図。

表 4.10: 背面照射型 CCD カメラの仕様。

撮像素子	背面照射型フルフレームトランスファ CCD
有効画素数	1242(H) × 1152(V)
画素サイズ	22.5 μ m × 22.5 μ m
有効面積	27.9 mm × 25.9mm
フレームレート	約 0.1 フレーム/秒 (高精度読み出しモード)
飽和電荷量	360,000 electrons (高精度読み出しモード)
読み出しノイズ	8 electron r.m.s.
平均暗電流	0.3 electron/pixel/s
冷却方式	ペルチェ冷却 + 水冷

ショートカットラスタースキャン

検出器を焦点距離よりも短い（あるいは長い）位置に置き、検出器ステージ、望遠鏡ステージの移動スピード、移動範囲を調整し、検出器が常に反射X線ビームを検出面の中心で受けるようにして同期移動させる測定をショートカットラスタースキャンと呼ぶ。測定の模式図を図4.20に示す。ただし、望遠鏡ステージ、検出器ステージのステージワークは望遠鏡中心に対して非対称で、 $+y$ 方向は $-y$ 方向に対して100 mm以上の余裕がある。よって、焦点距離よりも長い位置に検出器を置いた場合は、 $+y$ 方向に位置するQuadrantのみ測定を行うことができる。

このように焦点距離を変えて行う性能測定は、スポットスキャンや迷光、PSFのtail測定がある（詳細は題6章、7章で述べる。）。X線発生装置の光源は有限の距離にあるため、正確には点源ではなく、ある一定の大きさを持つ。よって実際に焦点を結ぶ点は5.6 mよりも長く、望遠鏡のよりローカルな領域の性能を測定するスポットスキャンは7.1 mの位置に検出器を置く。一方、5.6 mでは検出器上の画角が小さいため、5.6 mよりも短い位置に検出器を置くことで画角を大きくすることができ、迷光やPSFのtail測定の際にこの方法を用いる。ただしこの場合、反射X線ビームは焦点距離の場合よりも広がりを持つため、PSFのコアがなまってしまうという欠点がある。

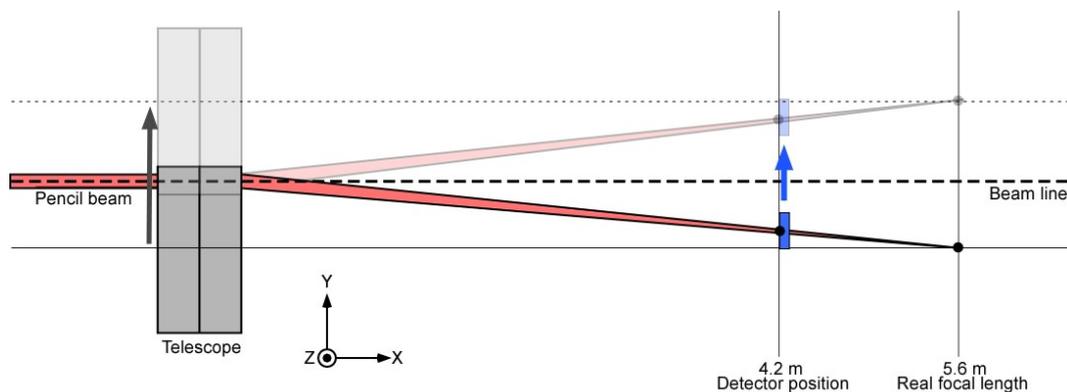


図 4.20: ショートカットラスタースキャンの模式図。

第5章 可視光測定 ~ 衛星アライメントに向けた光軸・結像位置の決定 ~

この章では衛星 z 軸と望遠鏡光軸との離角、望遠鏡の結像位置の結果についてまとめる。衛星 z 軸はあらゆる観測機器等を衛星に搭載するための基準となっており、SXT も例外ではない。例えば、衛星 z 軸と X 線望遠鏡の光軸がお互いにずれていると、焦点面検出器で X 線を測定することができなくなり、観測自体が破綻することになる。そのため、この望遠鏡の光軸がどこを向いているかをあらかじめ調べておく必要がある。また、望遠鏡光軸と衛星 z 軸が正対をしていても、その軸が検出器の中心を通らなければ意味を成さない。つまり望遠鏡の結像位置 (x, y 方向) の情報が必要となる。これは CCD カメラとレンズを組み合わせたカメラシステムにその位置をあらかじめ記録しておくことでその情報を得る。これを基に、衛星アライメントでは x, y 方向の基準となるアライメントマーカと、カメラシステムが記録した結像位置が一致するように望遠鏡を置く。

離角の測定は愛媛大の平行光源を用いて行った。望遠鏡はこのあと行う X 線測定の configuration と同じ横置き (X 線入射面が地面と垂直) の場合と、衛星アライメントと同じ configuration と同じ縦置き (X 線入射面と地面が平行) の 2 通りで測定を行った。前者で求めた光軸は X 線 30m ビームラインでのアライメント時に、後者で求めた光軸は衛星アライメント時に用いる。ただしセットアップ等の関係で平行光は望遠鏡全体に一度に当てることは出来ず、Quadrant 毎に当ててその平均光軸を望遠鏡光軸とするか、望遠鏡の内側の一部だけに当てたときの光軸を望遠鏡光軸とするかの 2 種類の求め方がある。

結像位置の再現性の確認については横置きで行うと重力の影響でカメラシステムが歪んでしまうため、望遠鏡を縦置きにして行った。測定条件と測定項目の関係を表 5.1 にまとめる。

表 5.1: 望遠鏡に平行光を当てる条件とそれに準じた測定項目。

	Quadrant 単体毎	R170 mm マスク	R150 mm マスク
横置き	焦点距離測定	光軸測定	
縦置き			光軸測定/結像位置測定

5.1 Vignetting

望遠鏡の光軸に対して傾いた角度（以下、off-axis 角と表現する。）から光子が入射すると、反射・集光される光子の数は減少する。この要因は主に以下の2つが挙げられる。

1. 望遠鏡の実効的な開口面積が小さくなる。
2. 反射鏡に対する光子の入射角が大きくなるために反射率が低下する¹。

この現象を利用して望遠鏡の光軸を求めることができ、望遠鏡を θ_y, θ_z 方向にそれぞれ適当なピッチで傾けることで反射された光子の数の増減を測定する。この測定方法を vignetting と呼ぶ。

5.2 望遠鏡を横置きにしたときの望遠鏡光軸

まず、X線測定 configuration と同じ横置きの場合の光軸の測定についてまとめる。望遠鏡は X 線入射面と地面が垂直になるようにセットし、これを「横置き」と定義する。この横置きのセットアップでは望遠鏡全体に平行光を当てることはできない。そのため、望遠鏡の中心から半径 170 mm の内側の領域だけに平行光が当たるマスクを取り付けて行う。

5.2.1 測定方法

望遠鏡の Top 上面には全面が鏡になっているキューブミラーが取り付けられている（図 5.1）。このキューブミラーの z 軸方向の法線を衛星 z 軸に見立てることによって望遠鏡光軸との離角を求める。この離角を求めておけば、衛星アライメントでキューブミラー法線と衛星 z 軸を正対させたあと、その離角分だけ望遠鏡を傾けて衛星 z 軸と光軸を正対させることができる。以下、詳しい測定方法について説明する。



図 5.1: Top 側に付けられているキューブミラー。写真上方向の面がキューブミラーの法線（衛星 z 軸）。

¹特に後者は X 線領域に対して大きく依存する。

5.2 望遠鏡を横置きにしたときの望遠鏡光軸

平行光源とキューブミラーの法線が正対する角度を原点に取り、横軸に off-axis 角、縦軸に Count をプロットする。これをガウシアンでフィットすることで、光量が最大となる θ_y, θ_z が求まる。つまりこの時の光源に対する望遠鏡の傾きが望遠鏡光軸となる。

測定は $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 方向に回ることができるドラムに望遠鏡を載せ、各 Quadrant を U-side に回して行く。なお、Quadrant はビームライン座標系に準じて図 5.2 のようにセットすることにする。このとき、 $+y$ 方向にある Quadrant の位置を W-side、 $-y$ 方向にある Quadrant の位置を C-side、 $+z$ 方向にある Quadrant の位置を U-side、 $-z$ 方向にある Quadrant の位置を D-side と定義する。さらに x 軸周りの回転を θ_x 、右ねじが $+x(-x)$ 方向に進む回転方向を $+\theta_x(-\theta_x)$ とする。 θ_y, θ_z についても同様に定義する。また、Q1 が U-side(C-side、D-side、W-side) にある configuration を Q1U(Q1C、Q1D、Q1W) と呼ぶことにする。Q2、Q3、Q4 についても同様に定義する。以下、具体的な測定方法を説明する。

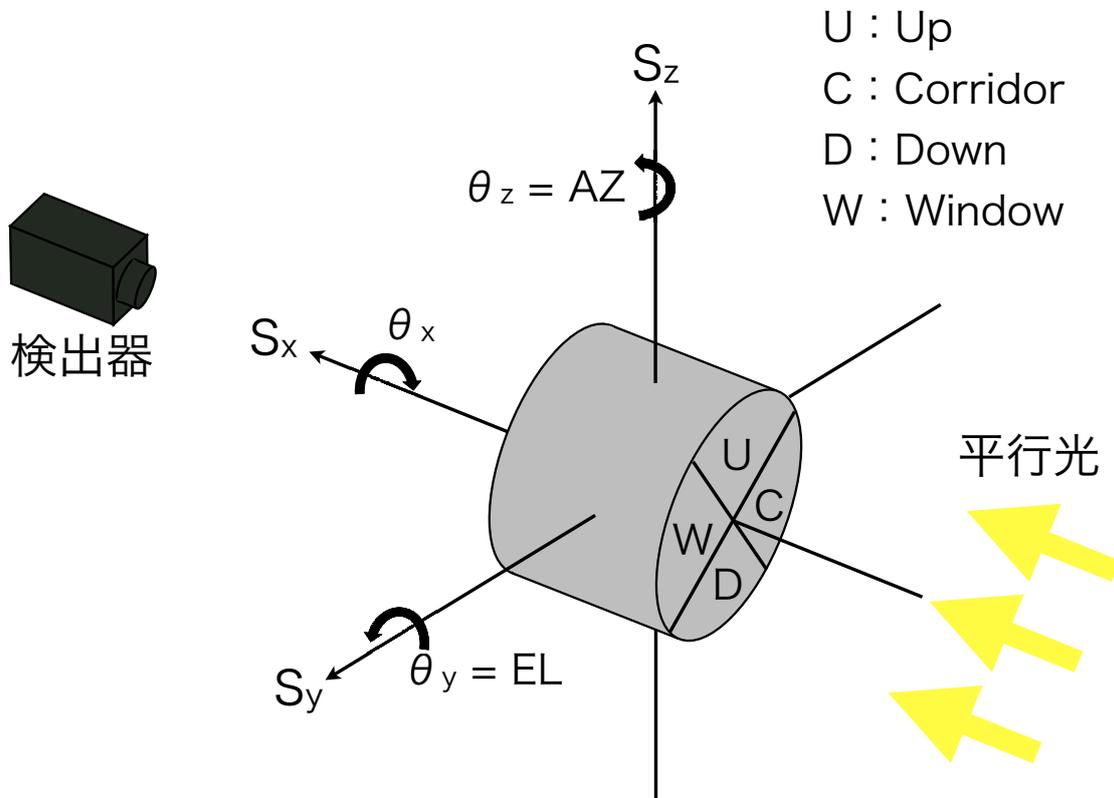


図 5.2: 横置き時のステージの座標と望遠鏡の向きの定義。

5.2 望遠鏡を横置きにしたときの望遠鏡光軸

1. θ_y, θ_z 軸方向に傾けることができるドラムに望遠鏡を載せる (図 5.3)。Configuration は Q1U とする。

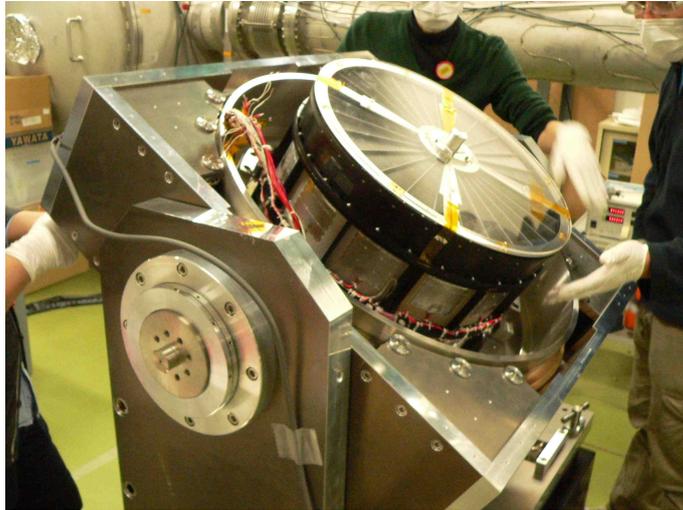


図 5.3: ドラムに望遠鏡を載せる。

2. 除振台に平行光源を置き、望遠鏡の中心に平行光が当たるように除振台の高さを調整する (図 5.4)。

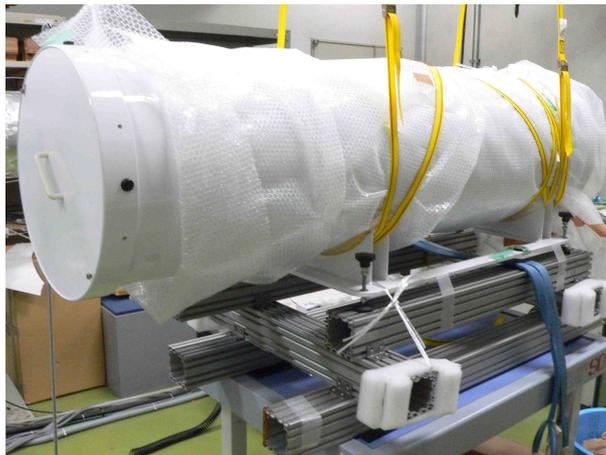


図 5.4: 折り返し光学系の高さを調整する。

5.2 望遠鏡を横置きにしたときの望遠鏡光軸

3. セオドライト、キューブミラー法線、平行光源を正対させる。まず、セオドライトで平行光源を見て、平行光源とセオドライトの中心を合わせる。この点を原点とする。次に、セオドライト自身が放った光がキューブミラーにはね返った光と、光源の中心が合うように望遠鏡の θ_y, θ_z を調整する (図 5.5)。

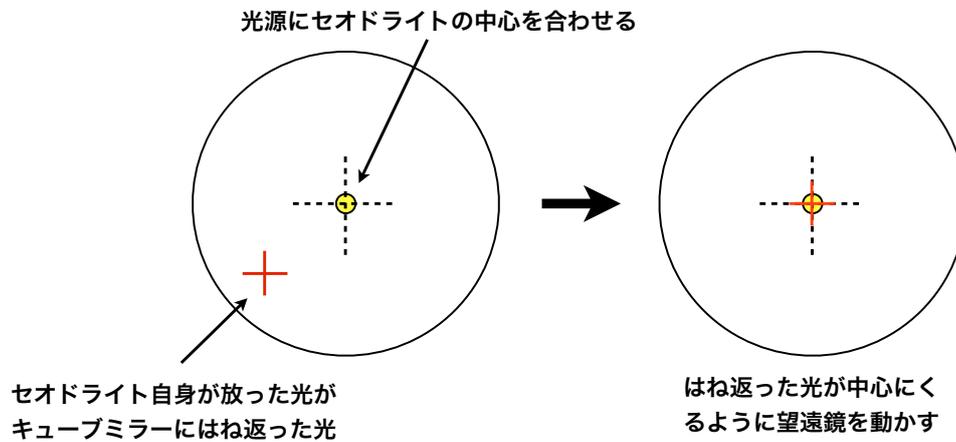


図 5.5: セオドライトで覗いたときの光の位置関係。

4. 検出器を焦点距離 (5600 mm) の位置に設置する。また、望遠鏡の内側の領域に平行光が当たるように、半径 170 mm の穴が空いたマスクを望遠鏡に取り付ける (図 5.6, 図 5.7)。

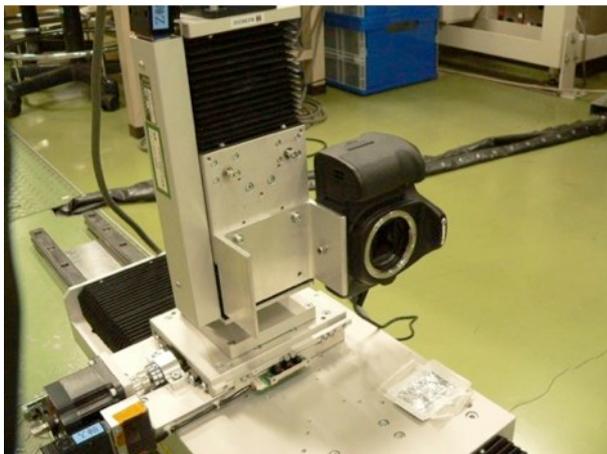


図 5.6: 検出器を焦点距離 (5600 mm) に設置する。

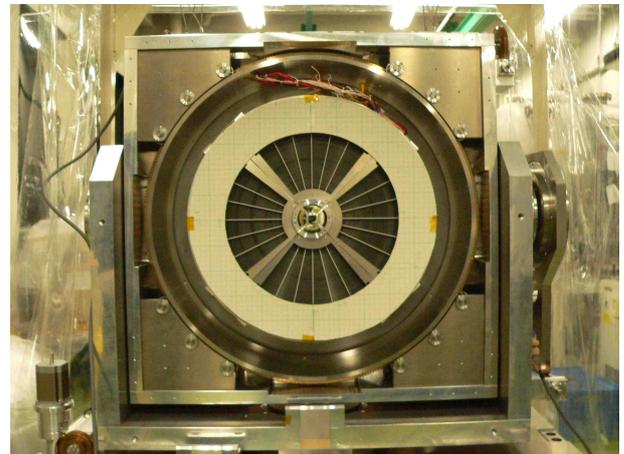


図 5.7: 望遠鏡の内側の領域に平行光が当たるように半径 170 mm の穴が空いたマスクを付ける。

5. 望遠鏡を傾けてその時の光量を測定する。 θ_y, θ_z を原点を中心にそれぞれ $-20' \sim +20'$ の範囲を $1'$ ピッチで計 41 点測定。

5.2 望遠鏡を横置きにしたときの望遠鏡光軸

6. 横軸に off-axis 角、縦軸に光量をプロットして、Lorentzian + Constant でフィットする。このときの Lorentzian の中心値が光量最大となる。

$$\text{Lorentzian} = \frac{N}{1 + \left(\frac{2(x-LC)}{LW}\right)^2}$$

N : Normalization, LC : Mode Center, LW : FWHM

7. 光量最大の位置に望遠鏡を傾け、セオドライトで光源（キューブミラー法線）に対するキューブにはね返った光の離角を測定する。このときの θ_y と θ_z の値を光軸として記録する。なお、セオドライトで見た時の θ_y を Elevation 方向、 θ_z を Azimuth 方向と定義する。
8. Q2U、Q3U、Q4U についても同様の測定を行い、望遠鏡光軸を測定する。

5.2.2 測定結果

R170 mm のマスクをつけた望遠鏡の vignetting と望遠鏡光軸についてまとめる。Vignetting の結果（図 5.8 ～ 図 5.15）から、光量が最大の位置に望遠鏡を傾け、平行光源（キューブ法線）との離角をセオドライトで測定する。その結果、Q1U における望遠鏡光軸は $\theta_y = -135''$ と $\theta_z = -181''$ となった（図 5.16, 5.17, 表 5.4, 5.5）。X 線測定における望遠鏡光軸の測定はこの軸を中心に Vignetting を行う。

表 5.2: 測定条件。

Config.	Q1U, Q2U, Q3U, Q4U
スキャン範囲	$-20' \sim +20'$
スキャンピッチ	1' ピッチ (1' = 1666 pulse)
Detector	CMOS カメラ
ISO	100
Exposure	1/200 sec
可視光光源の明るさ	6
半径 170 mm の穴が空いたマスクを装着	

5.2 望遠鏡を横置きにしたときの望遠鏡光軸

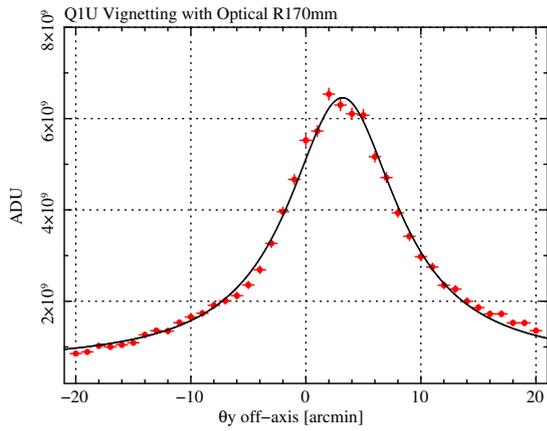


図 5.8: Q1 θ_y 方向の vignetting.

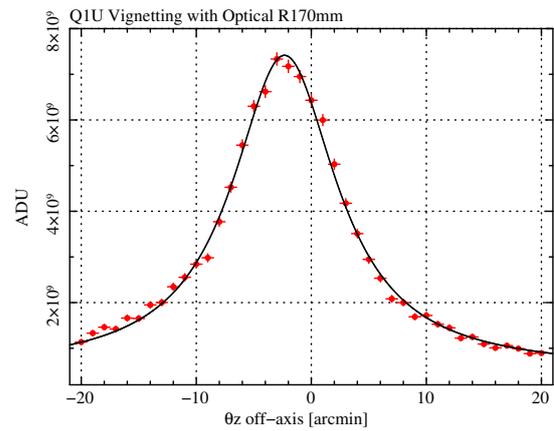


図 5.9: Q1 θ_z 方向の vignetting.

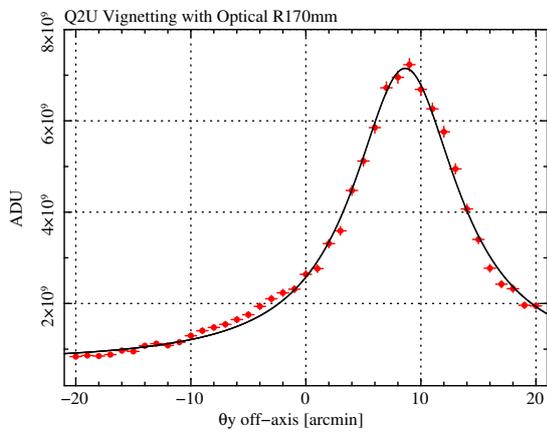


図 5.10: Q2 θ_y 方向の vignetting.

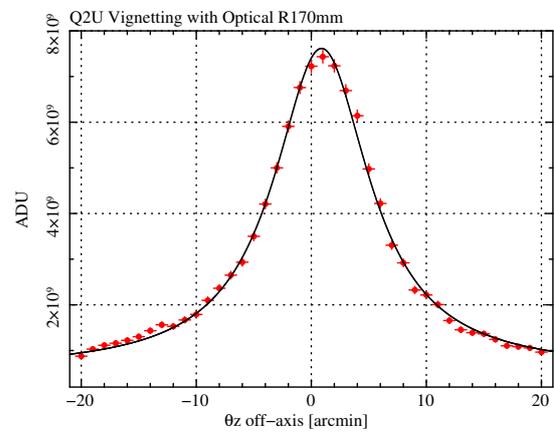


図 5.11: Q2 θ_z 方向の vignetting.

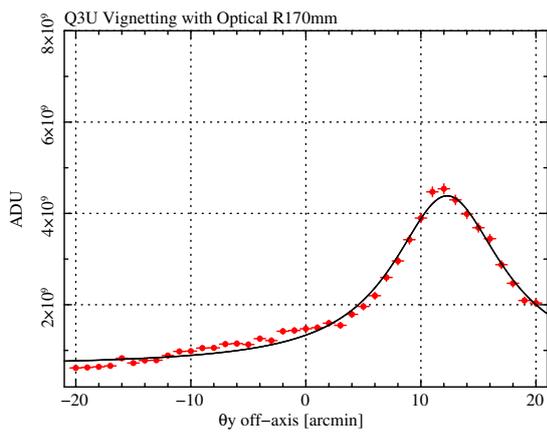


図 5.12: Q3 θ_y 方向の vignetting.

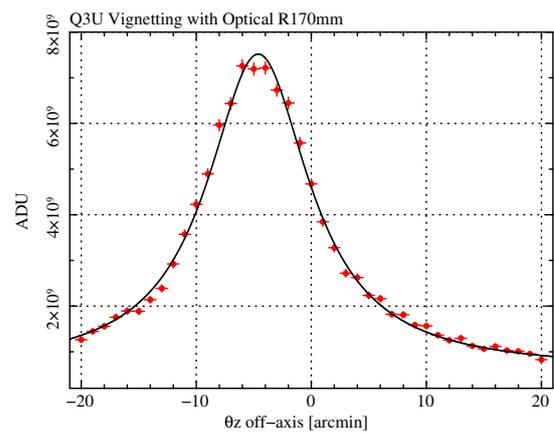


図 5.13: Q3 θ_z 方向の vignetting.

5.2 望遠鏡を横置きにしたときの望遠鏡光軸

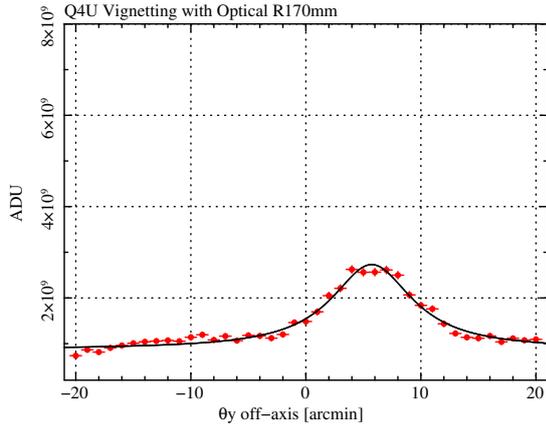


図 5.14: Q4 θ_y 方向の vignetting。

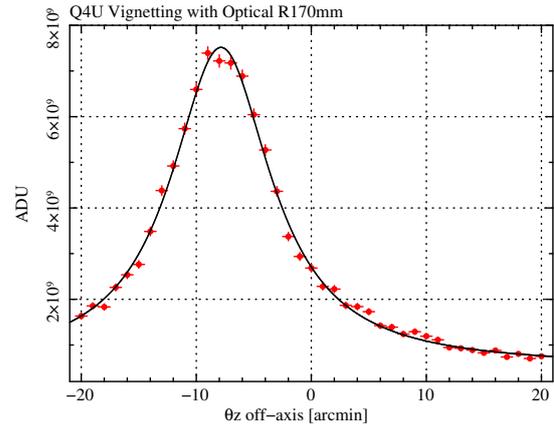


図 5.15: Q4 θ_z 方向の vignetting。

表 5.3: Vignetting のフィット結果。ローレンツ + 定数でフィット。誤差は 90% エラー。

Config	LC [arcmin]	LW [arcmin]	LN [Counts]	CO [Counts]
Q1U θ_y	$3.18^{+0.05}_{-0.05}$	$11.61^{+0.20}_{-0.20}$	$582.60^{+5.66}_{-5.63} E + 7$	$63.06^{+2.60}_{-2.64} E + 7$
θ_z	$-2.33^{+0.04}_{-0.04}$	$11.05^{+0.17}_{-0.16}$	$689.55^{+6.09}_{-6.09} E + 7$	$51.97^{+2.53}_{-2.57} E + 7$
Q2U θ_y	$8.64^{+0.04}_{-0.04}$	$11.12^{+0.17}_{-0.16}$	$646.81^{+6.10}_{-6.06} E + 7$	$68.17^{+2.00}_{-2.01} E + 7$
θ_z	$0.89^{+0.04}_{-0.04}$	$10.14^{+0.15}_{-0.15}$	$705.75^{+6.37}_{-6.37} E + 7$	$55.90^{+2.38}_{-2.40} E + 7$
Q3U θ_y	$12.28^{+0.06}_{-0.06}$	$11.60^{+0.27}_{-0.26}$	$373.02^{+4.91}_{-4.88} E + 7$	$65.55^{+1.60}_{-1.61} E + 7$
θ_z	$-4.61^{+0.04}_{-0.04}$	$10.80^{+0.16}_{-0.15}$	$691.69^{+6.16}_{-6.16} E + 7$	$60.24^{+2.32}_{-2.34} E + 7$
Q4U θ_y	$5.72^{+0.09}_{-0.09}$	$8.63^{+0.32}_{-0.31}$	$186.01^{+4.31}_{-4.28} E + 7$	$87.19^{+1.61}_{-1.63} E + 7$
θ_z	$-7.85^{+0.04}_{-0.04}$	$10.58^{+0.14}_{-0.14}$	$699.48^{+6.29}_{-6.29} E + 7$	$52.15^{+1.88}_{-1.88} E + 7$

5.2 望遠鏡を横置きにしたときの望遠鏡光軸

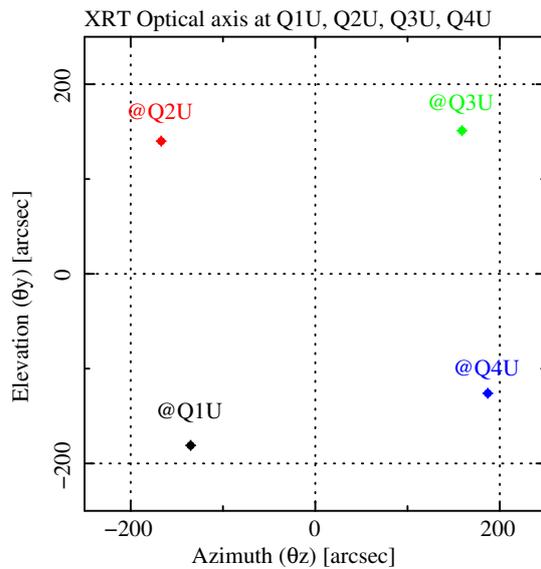


図 5.16: 各 Quadrant を U-side に置いたときの望遠鏡光軸。

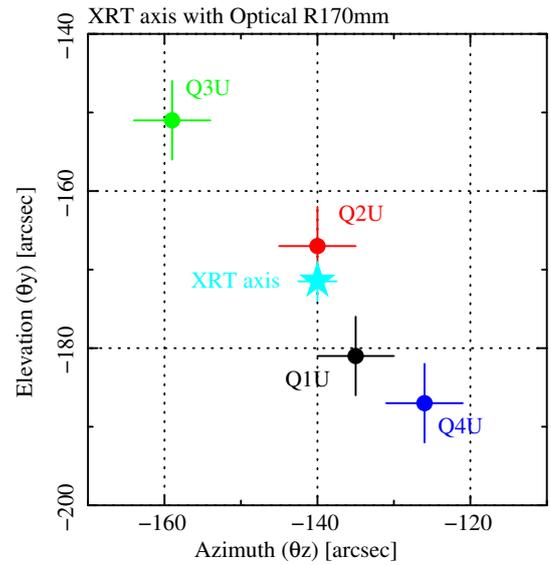


図 5.17: 各 configuration の望遠鏡光軸を Q1U 相当の望遠鏡光軸に変換したものの。印は平均光軸。

表 5.4: 各 Quadrant を U-side にしたときのキューブミラー法線と光軸の離角。

config.	Azimuth (θ_z)	Elevation (θ_y)
Q1U	-135''	-181''
Q2U	-167''	140''
Q3U	159''	151''
Q4U	187''	-126''

表 5.5: Q1U 相当の望遠鏡光軸に変換したときのキューブミラー法線と光軸の離角。Average は各光軸の算術平均。

config.	Azimuth (θ_z)	Elevation (θ_y)
Q1U	-135''	-181''
Q2C	-140''	-167''
Q3D	-159''	-151''
Q4W	-126''	-187''
Average	-140''	-172''

5.3 望遠鏡を縦置きにしたときの望遠鏡光軸

続いて、衛星アライメント時の configuration と同じ縦置きの場合の光軸の測定についてまとめる。望遠鏡は X 線入射面と地面が平行になるようにセットし、これを「縦置き」と定義する。縦置きにした場合、折り返し光学系を使って望遠鏡に平行光を当てるため、その領域は小さくなる。横置きの場合は半径 170 mm のマスクを取り付けたが、縦置きでは半径 150 mm マスクを取り付けて行う。縦置きの場合の座標系と Quadrant の configuration の定義を図 5.18 に示す。座標系は、横置き時の座標計を y 軸に関して $+90^\circ$ だけ回転させており、それに伴い U-side を S-side と定義する。表 5.6 に横置き時と縦置き時の side の相関を示す。

表 5.6: 横置き時と縦置き時の side の相関。

U-side	↔	S-side
C-side	↔	W-side
D-side	↔	N-side
W-side	↔	E-side

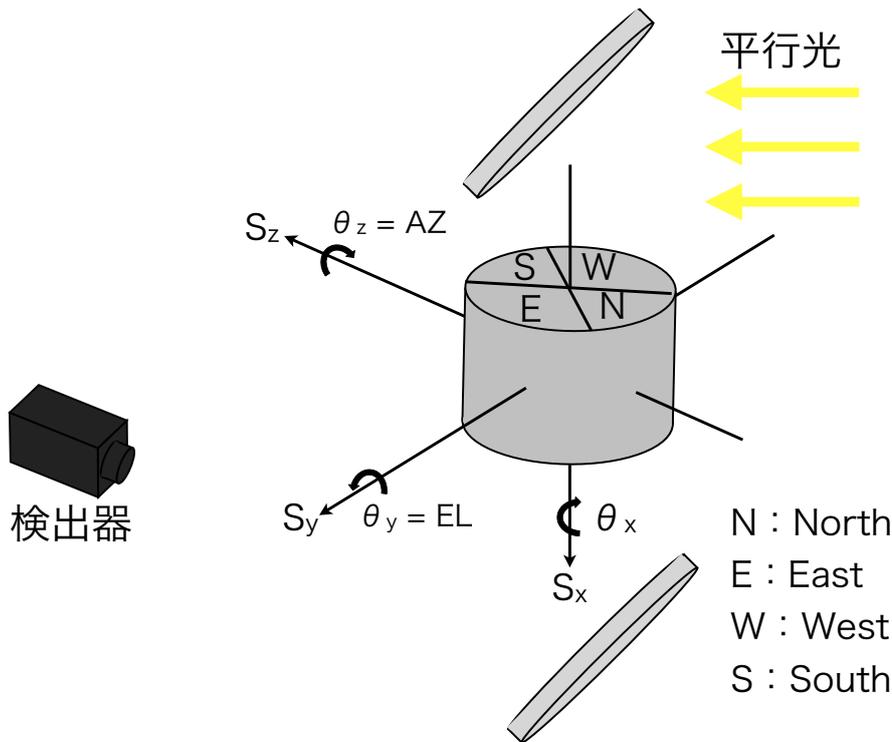


図 5.18: 縦置き時のステージの座標と望遠鏡の向き の定義。

5.3 望遠鏡を縦置きにしたときの望遠鏡光軸

5.3.1 測定方法

1. θ_y, θ_z 軸方向に傾けることができるやぐらに望遠鏡を載せ、折り返し光学系にやぐらを設置する（図 5.19, 5.20）。Configuration は Q1S とする。



図 5.19: 折り返し光学系の高さを調整する。地面から反射鏡中心までの高さは約 140 cm。

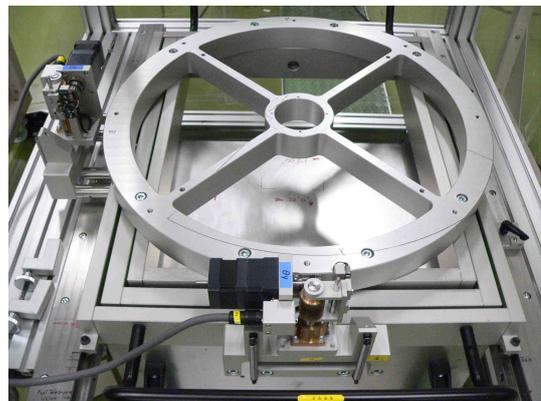


図 5.20: やぐらは θ_y, θ_z 軸の調整が可能。

2. 除振台上に平行光源を置き、折り返し光学系の上段にある平面鏡にあたるように高さを調整する。このときの平行光は、望遠鏡上では縦方向に 30cm、横方向に 40 cm の範囲にしか反射されないため、望遠鏡に半径 150 cm の穴が空いたマスクを取り付ける（図 5.21）。
3. Q2S、Q3S、Q4S についても同様の測定を行い、望遠鏡光軸を測定する。

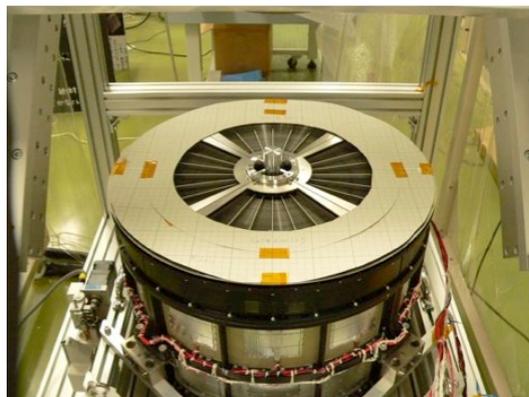


図 5.21: 望遠鏡に半径 150 mm の穴が空いたマスクを取り付ける。

5.3 望遠鏡を縦置きにしたときの望遠鏡光軸

5.3.2 測定結果

R150 mm のマスクをつけた望遠鏡の vignetting と望遠鏡光軸についてまとめる。横置きと同様に、vignetting の結果 (図 5.22 ~ 5.29) から光量が最大の位置に望遠鏡を傾け、平行光源 (キューブ法線) との離角をセオド ライトで測定する。Q1S、Q2S、Q3S、Q4S の configuration の望遠鏡光軸の結果から、その平均光軸を望遠鏡光軸とした (図 5.30, 5.31, 表 5.9, 5.10)。その結果、 $\theta_y = -151''$ 、 $\theta_z = -173''$ となった。衛星アライメント時はこの値を採用する。

表 5.7: 測定条件。

Config.	Q1S, Q2S, Q3S, Q4S
スキャン範囲	$-20' \sim +20'$
スキャンピッチ	1' ピッチ (1' = 51626 pulse)
Detector	CMOS カメラ
ISO	100
Exposure	1/125 sec
可視光光源の明るさ	6
半径 150 mm の穴が空いたマスクを装着	

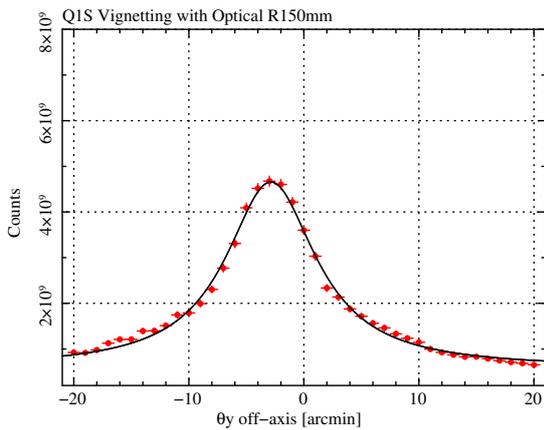


図 5.22: Q1 θ_y 方向の vignetting.

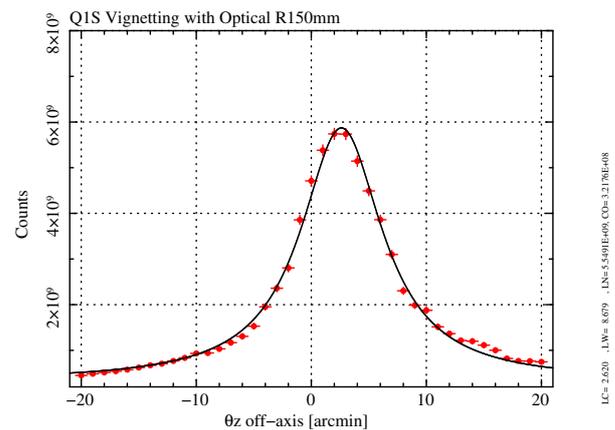


図 5.23: Q1 θ_z 方向の vignetting.

5.3 望遠鏡を縦置きにしたときの望遠鏡光軸

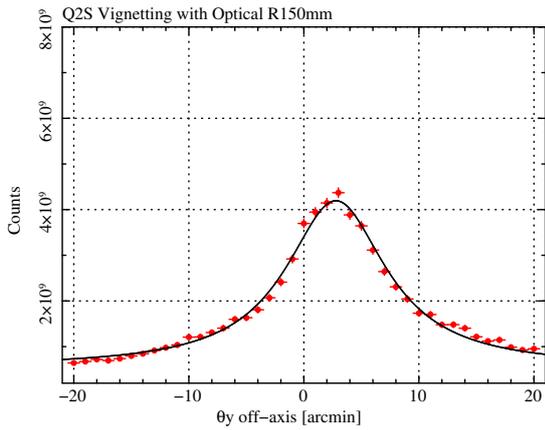


図 5.24: Q2 θ_y 方向の vignetting.

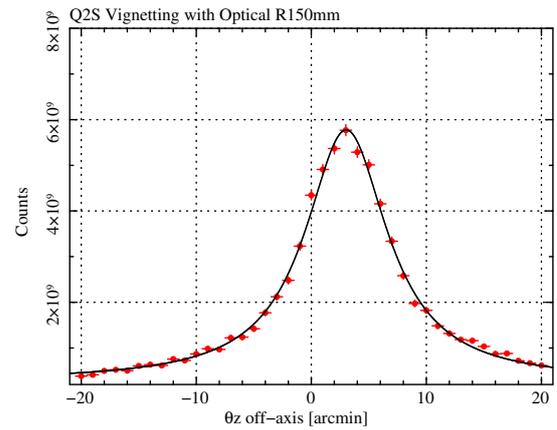


図 5.25: Q2 θ_z 方向の vignetting.

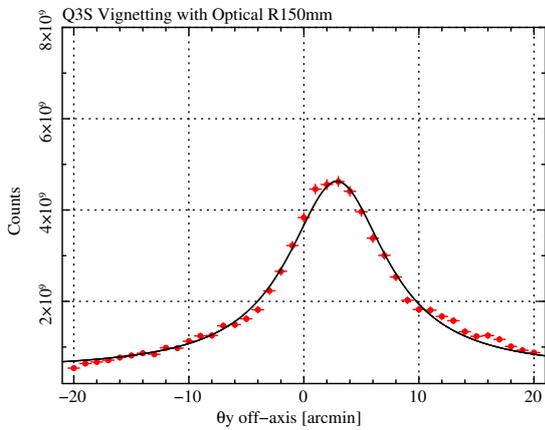


図 5.26: Q3 θ_y 方向の vignetting.

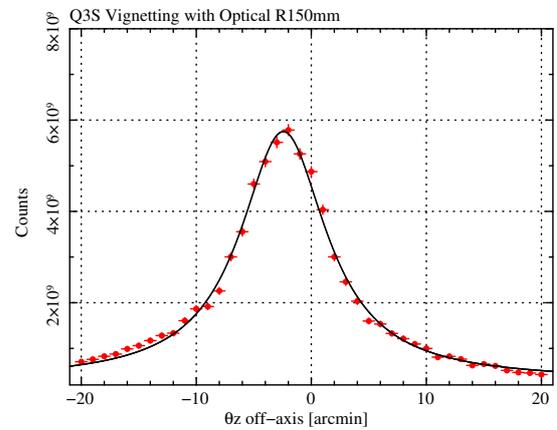


図 5.27: Q3 θ_z 方向の vignetting.

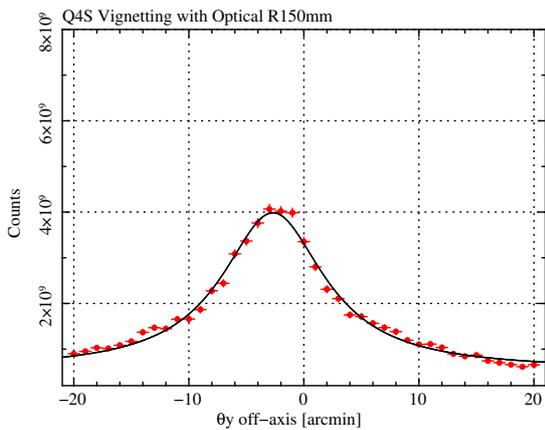


図 5.28: Q4 θ_y 方向の vignetting.

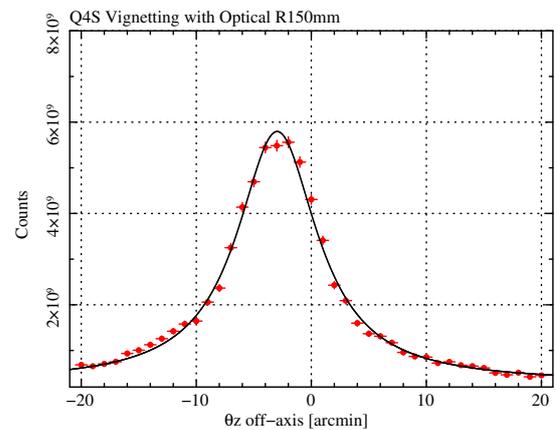


図 5.29: Q4 θ_z 方向の vignetting.

5.3 望遠鏡を縦置きにしたときの望遠鏡光軸

表 5.8: Vignetting のフィット結果。ローレンツ+定数でフィット。誤差は90%エラー。

Config	LC [arcmin]	LW [arcmin]	LN [Counts]	CO [Counts]	
Q1U	θ_y	$-2.87^{+0.05}_{-0.05}$	$9.56^{+0.21}_{-0.21}$	$407.81^{+5.35}_{-5.29} E + 7$	$57.97^{+2.60}_{-2.64} E + 7$
	θ_z	$2.62^{+0.04}_{-0.04}$	$8.68^{+0.14}_{-0.14}$	$554.91^{+6.03}_{-6.03} E + 7$	$32.18^{+1.54}_{-1.55} E + 7$
Q2U	θ_y	$2.79^{+0.06}_{-0.06}$	$10.63^{+0.26}_{-0.25}$	$365.00^{+4.82}_{-4.79} E + 7$	$54.51^{+2.03}_{-2.06} E + 7$
	θ_z	$3.03^{+0.04}_{-0.04}$	$8.73^{+0.14}_{-0.13}$	$550.58^{+5.95}_{-5.95} E + 7$	$26.92^{+1.47}_{-1.48} E + 7$
Q3U	θ_y	$2.88^{+0.05}_{-0.05}$	$10.48^{+0.22}_{-0.22}$	$413.96^{+5.05}_{-5.02} E + 7$	$48.77^{+1.97}_{-2.00} E + 7$
	θ_z	$-2.43^{+0.04}_{-0.04}$	$9.16^{+0.15}_{-0.15}$	$545.12^{+5.88}_{-5.83} E + 7$	$29.70^{+1.62}_{-1.63} E + 7$
Q4U	θ_y	$-2.68^{+0.06}_{-0.06}$	$10.87^{+0.28}_{-0.27}$	$344.30^{+4.68}_{-4.65} E + 7$	$54.29^{+2.08}_{-2.12} E + 7$
	θ_z	$-2.99^{+0.04}_{-0.04}$	$8.51^{+0.13}_{-0.13}$	$550.20^{+6.04}_{-6.01} E + 7$	$29.31^{+1.45}_{-1.47} E + 7$

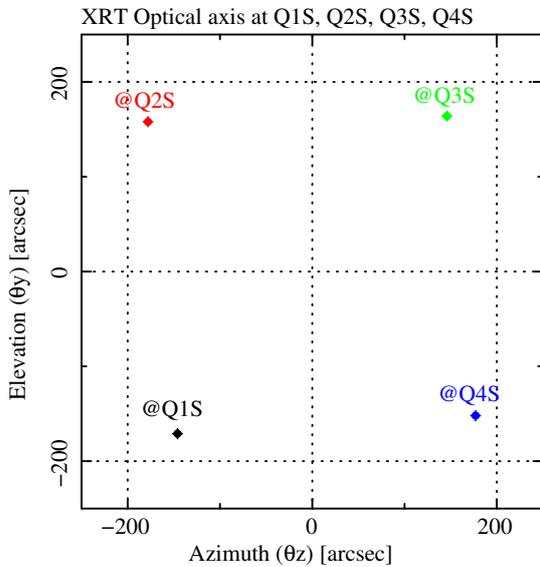


図 5.30: 各 Quadrant を S-side に置いたときの望遠鏡光軸。

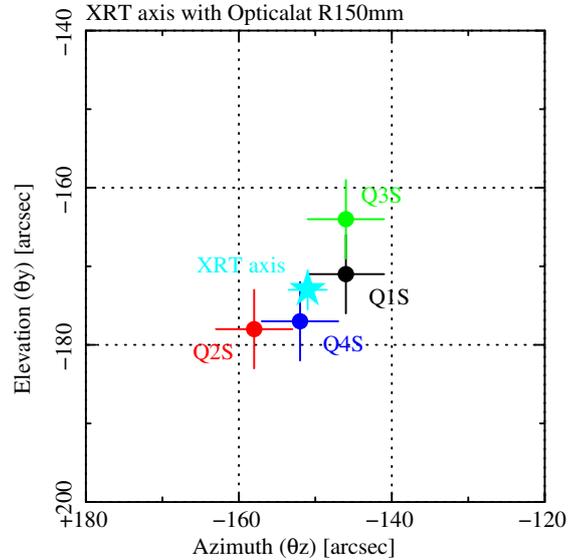


図 5.31: 各 configuration の望遠鏡光軸を Q1S 相当の望遠鏡光軸に変換したもの。印は平均光軸。

表 5.9: 各 Quadrant を S-side に置いたときのキューブミラー法線と光軸の離角。

config.	Azimuth (θ_z)	Elevation (θ_y)
Q1U	$-146''$	$-171''$
Q2U	$-178''$	$158''$
Q3U	$146''$	$164''$
Q4U	$177''$	$-152''$

表 5.10: Q1S 相当の望遠鏡光軸に変換したときのキューブミラー法線と光軸の離角。

config.	Azimuth (θ_z)	Elevation (θ_y)
Q1U	$-146''$	$-171''$
Q2C	$-158''$	$-178''$
Q3D	$-146''$	$-164''$
Q4W	$-152''$	$-177''$
Average	$-151''$	$-173''$

5.4 結像位置の測定とその再現性

望遠鏡光軸の他に、衛星アライメント時に必要となる情報が結像位置である。望遠鏡光軸と衛星 z 軸はキューブミラーを介することでアライメントを取ることができた。結像位置のアライメントも同様で、CCDカメラにその位置を記録することでアライメントマーカとの整合を図る。しかし結像位置の測定は単に焦点距離に CCD カメラを置き、その結像位置を記録するだけでは信憑性に欠ける。なぜなら、このように望遠鏡と CCD カメラがお互い独立した位置にいと、望遠鏡と CCD カメラの相対的な位置関係を何度も再現することは非常に困難であり、その位置関係は非常にずれやすくなるからである。これを回避するためには、CCD カメラを直接望遠鏡に固定すればよい。このように CCD カメラと望遠鏡をセットにすることで、結像位置の再現性を高めることができる。ただし CCD カメラと望遠鏡は取り外し可能なので、厳密にはずれはゼロにできない。そこで、ここでは望遠鏡光軸における結像位置を CCD カメラで何度か記録することで、同じ位置に結像するか（再現性）を確認することにする。

5.4.1 測定方法

結像位置の再現性を測定するカメラシステムは、望遠鏡中心に CCD カメラを取り付け、焦点距離にあるスクリーンに写った像のピークを撮影する²。望遠鏡は横置きにすると CCD カメラが重力により歪んでしまい精度の良い測定をすることはできない。よって結像位置の測定は縦置きにすることで CCD カメラを立たせるようにした。測定概念図を図 5.32 に示す。

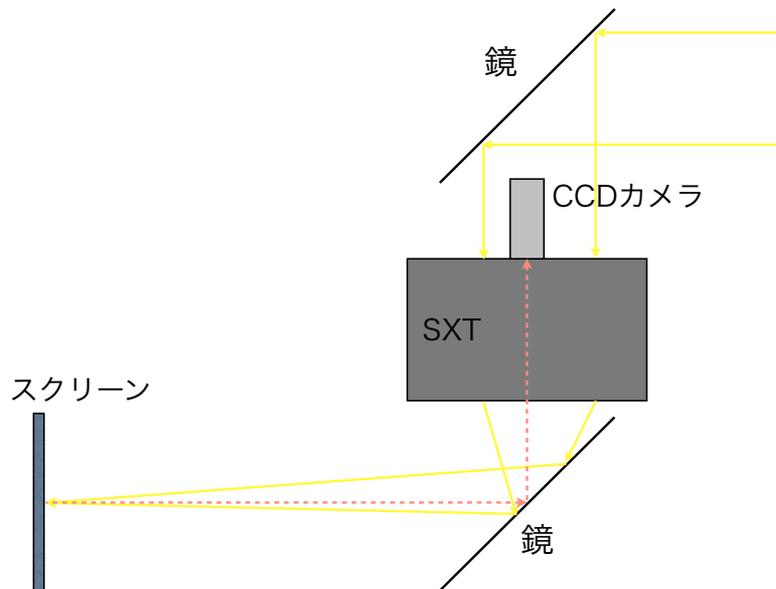


図 5.32: カメラシステムの概念図。実線矢印は平行光の道筋、点線矢印はスクリーンに写った像の道筋。

²図 5.1 のように、キューブミラー取付治具には通り穴があり、その穴から直接スクリーンの像を見ることができる。

5.4 結像位置の測定とその再現性

CCD カメラは二台 (CCD1、 CCD2 とする。) 使用して再現性を測定する。以下、詳しい測定方法について説明する。

1. CCD カメラを望遠鏡の中心に取り付ける (図 5.33)。取り付けは点と点による接触型にする。具体的には図 5.34 のように、袋ナットをとりつけ、3 点で傾きをだし、ショルダーボルトを使い、位置の精度を出すというものである。キューブ治具の、袋ナットがあたる部分には、ネジがうめきされており、ステンレス同士の接触となる。
2. 焦点距離にスクリーン (方眼紙) を置く。

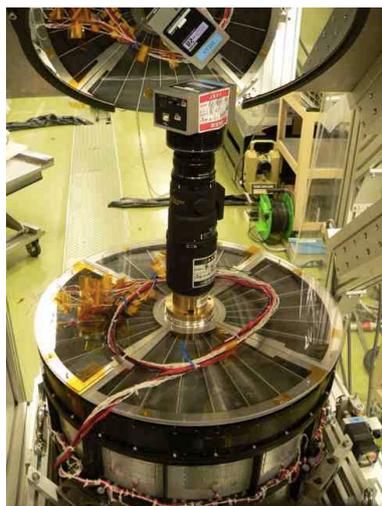


図 5.33: 望遠鏡の中心に CCD カメラを立てる。

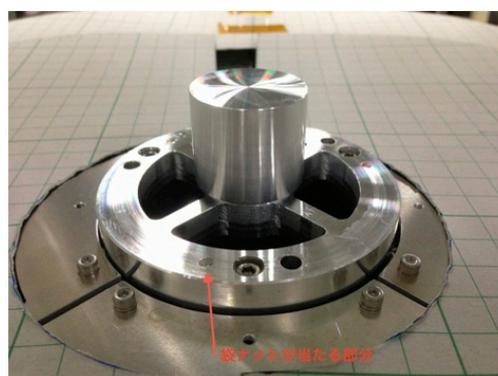
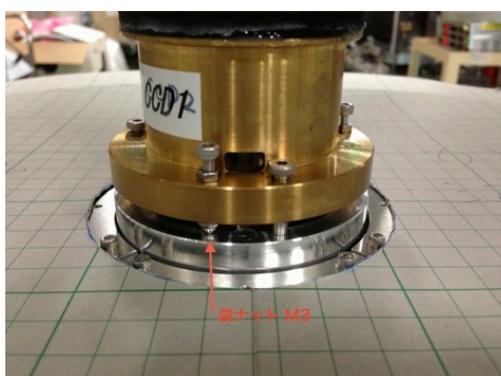


図 5.34: 袋ナットを用いた 3 点支持の様子。左：袋ナットでキューブ治具にカメラシステムをとりつけた様子。右：袋ナットがあたるキューブ治具部分。ネジでうめきがしてある。

5.4.2 測定結果

測定結果を表 5.12 に示す。configuration は Q2S の光量最大の場所に望遠鏡をセットした。R150mm のマスクをつけ、平行光源により焦点を結んだ 5.6m 先の焦点像をそのまま撮影して、

5.4 結像位置の測定とその再現性

ピークを結像位置として CCD の X, Y 座標を記録したものである。以上を図にすると、図 5.35、図 5.12 のようになる。CCD2 の動きが CCD1 に比べて大きい。CCD1 が今後 動かなければ、1 ピクセルぐらいでは精度がでると推測される。なお、求めている精度は 0.5 ピクセルとなっている (傾きで 5 秒角、6 m 先で 0.1 mm に対応)。

表 5.11: 測定条件。

Config.	Q2S
カメラシステム	CCD カメラ + レンズの組を 2 台で測定
可視光源の明るさ	6
半径 150 mm の穴が空いたマスクを装着	

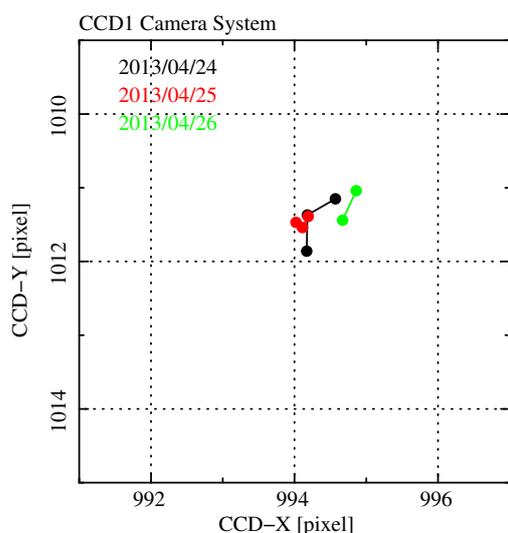


図 5.35: CCD1 による結像位置。

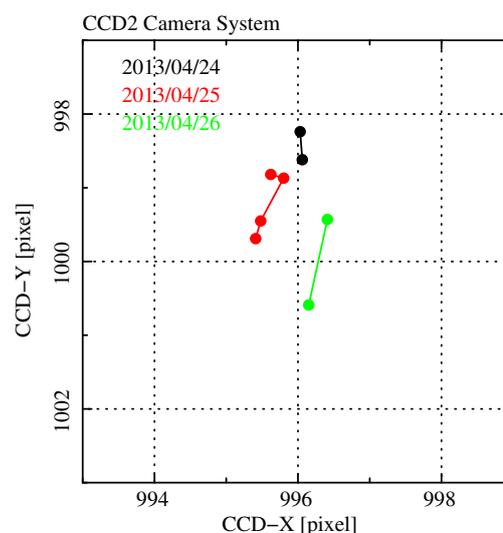


図 5.36: CCD2 による結像位置。

表 5.12: 3 点支持におけるカメラシステムの結像位置の履歴 (Q2S)。

日付	Config.	CCD1 (X, Y)	CCD2 (X, Y)
2013/4/24	Q2S	(994.17, 1011.86)	(996.06, 998.62)
		(994.18, 1011.37)	(996.03, 998.24)
		(994.57, 1011.15)	—
2013/4/25	Q2S	(994.19, 1011.39)	(995.41, 999.69)
		(994.11, 1011.54)	(995.48, 999.45)
		(994.02, 1011.47)	(995.80, 998.87)
		—	(995.62, 998.82)
2013/4/26	Q2S	(994.67, 1011.44)	(996.15, 1000.59)
		(994.86, 1011.04)	(996.41, 999.43)

5.5 Quadrant 毎の焦点距離

ASTRO-H の SXT は、鉄バンドなどのより臨界角の小さいエネルギーを十分に確保するため、外側の反射鏡の反射率を増やすことを目的としている。そのため、反射鏡の枚数を増やすことで口径が大きくなり、外側の反射鏡の焦点距離がより長くなる。その焦点距離は 5600 mm と設計されており、すざく衛星の SXT-I の焦点距離 4750 mm (SXT-S は 4500 mm) よりもおよそ 20%長くなっている。

今までの光軸出しは望遠鏡全体 (ただし内側のみ) に平行光を当てたが、ここでは Quadrant 毎の焦点距離を測定するため、Quadrant 全体に平行光を当てて vignetting を行った。焦点距離は各 Quadrant の光軸ごとに LR 法を使って求める。

5.5.1 測定方法

SXT の焦点距離の定義は、望遠鏡の primary と secondary の境界線からの距離となる。また、検出器側の方ではレンズから検出器面の距離も考慮してその設置位置を決定する。

測定方法は LR 法を用いて行った。

LR 法

望遠鏡の像は焦点距離からずれた時に左右 (または上下) に偏る。この性質を利用し、検出器の距離を変えながら得られた像を見て、各像の結像位置に対して、左側と右側 (または上側と下側) の光量の比を調べる。

例えば、W-side にある Quadrant の焦点距離について考える。もし検出器が望遠鏡の設計値よりも近いところにあると、結像する前に検出器に当たってしまうため、W-side の方向に像が偏る。反対に検出器が望遠鏡の設計値よりも遠いところにあると、結像位置を通り越して検出器に当たるので、C-side 方向に偏る。従って、左右の光量が等しくなる距離がその望遠鏡の実際の焦点距離であると言える。この焦点距離の測定方法を LR 法と呼ぶ。概念図を図 5.37 に示す。

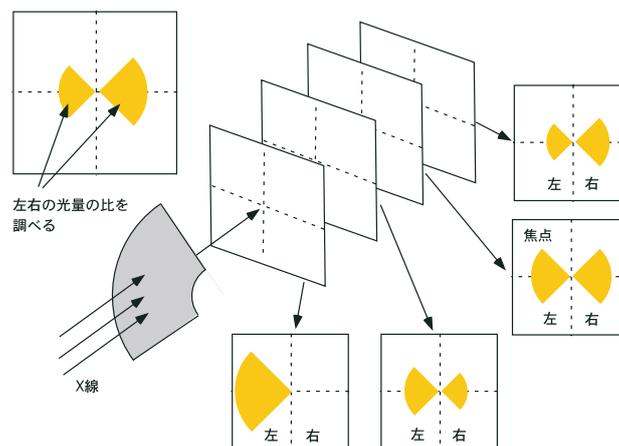


図 5.37: 焦点距離と像の形 (LR 法)

測定はQ1U、Q2U、Q3U、Q4Uの順番で行った。以下、詳しい測定方法について説明する。

1. SXTの焦点距離の設計値の位置である5600 mmに検出器を置き、この位置を原点とする。ただしその定義は望遠鏡のprimaryとsecondaryの境界線からの距離となり、検出器側の方ではレンズから検出器面の距離も考慮してその設置位置を決定しなければならない。距離は距離計を使って測定する(図5.38)。

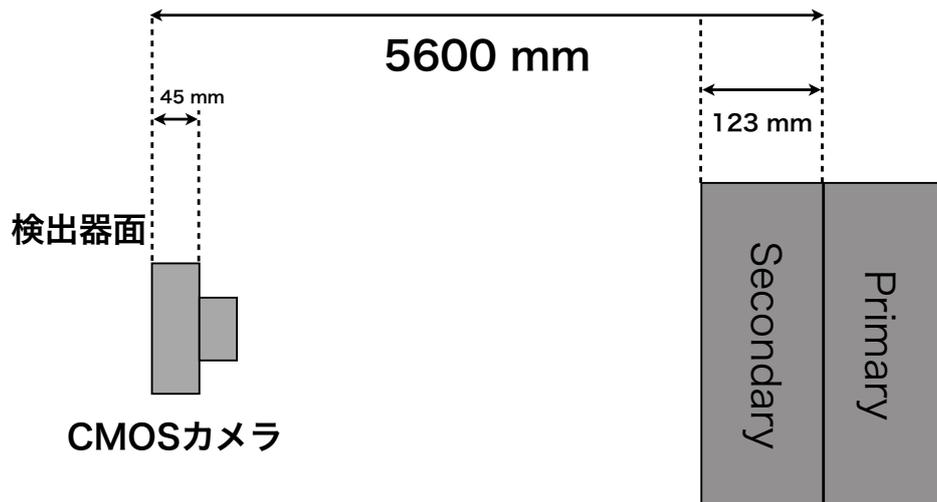


図 5.38: 検出器と SXT の焦点距離の関係。

2. Q1U、Q2U、Q3U、Q4Uの configuration で、各 Quadrant 毎に vignetting を行い、光量が最大となる θ_y, θ_z を測定する。ただし、Quadrant 全体に当てたときの検出器の感度が光軸測定するときよりも大きかったため、露光時間を2分の1に設定した。
3. 光量が最大となる位置に望遠鏡を傾け、検出器の距離を原点から ± 100 mm の範囲で動かし、10 mm ピッチで計 21 点を測定する。
4. 各測定毎に像の上下³の光量比を求め、横軸に焦点距離からのずれ ΔFL 、縦軸に光量の比をプロットする。
5. 上下で変化する光量の比をそれぞれ直線でフィットし、交わる点を焦点距離のずれとする。ただし、焦点距離から離れたところでは直線から外れてしまうため、原点から最も近い 11 点 (± 50 mm) でフィットする。
6. 最後に距離計を使って実際の焦点距離を測定する。距離計のエラーは 1 mm 程度。

³U-side にあるため、像の広がり方は上下になる。

5.5.2 測定結果

各 Quadrant の vignetting 結果 (図 5.39 ~ 5.46) についてまとめる。望遠鏡の vignetting が θ_y と θ_z 方向に振ったときで裾の広がりが違うのは、望遠鏡に入っている反射鏡の位置に依存している。Quadrant 内の反射鏡の面は平行光に対してほぼ平行なため、 θ_y 方向に少し傾けるだけで反射率は大きく下がる (Vignetting が効く方向と表現する)。逆に θ_z の場合は θ_y のときと比べて反射率の減少は大きくなる (Vignetting が効かない方向と表現する)。

表 5.13: 測定条件。

Config.	Q1U, Q2U, Q3U, Q4U
スキャン範囲	$-20' \sim +20'$
スキャンピッチ	1' ピッチ (1' = 833 pulse)
ISO	100
Exposure	1/100 sec
Detector	CMOS カメラ
可視光源の明るさ	6

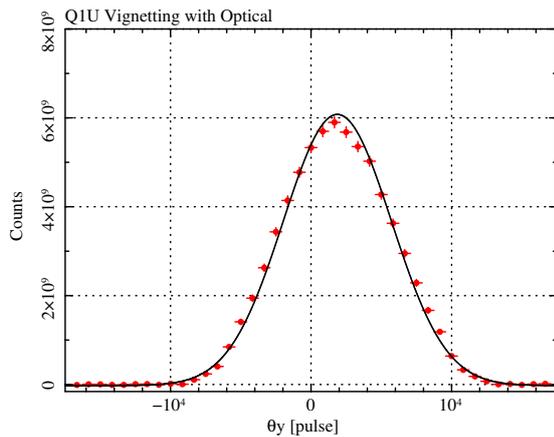


図 5.39: Q1 θ_y 方向の vignetting。

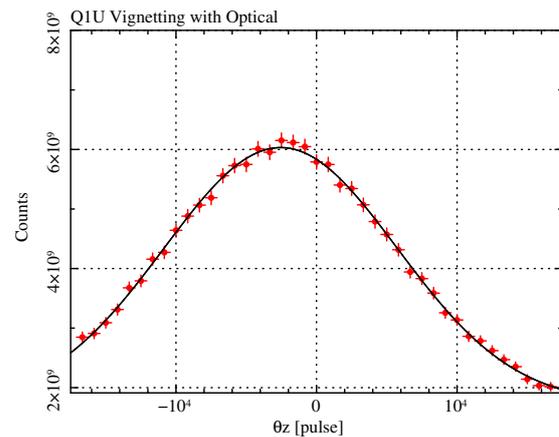
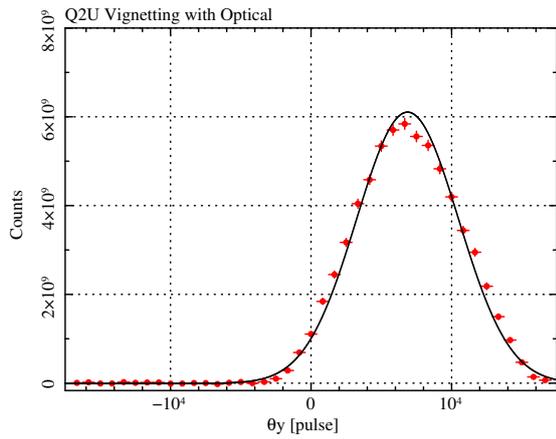


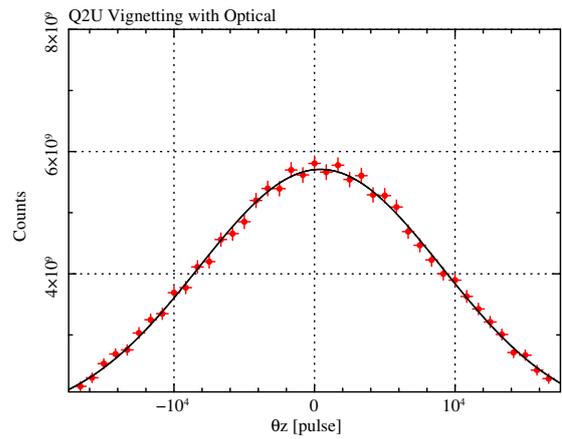
図 5.40: Q1 θ_z 方向の vignetting。

5.5 Quadrant 毎の焦点距離



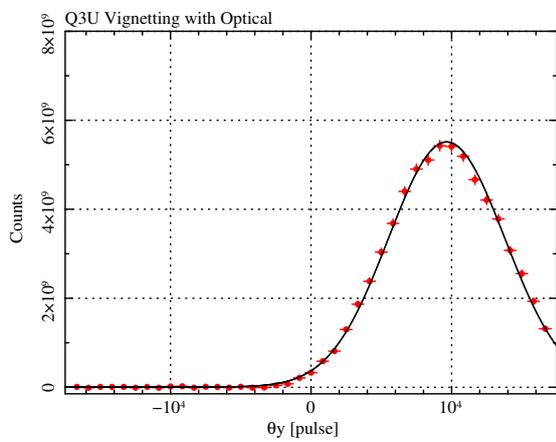
GC= 6869 , CW= 3624 , GN= 6.1133E+09 , CO= 7.962E+06

図 5.41: Q2 θ_y 方向の vignetting.



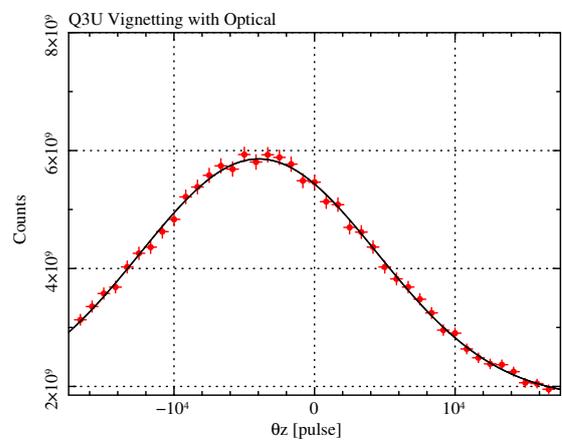
GC= 4194 , CW= 8668 , GN= 4.0831E+09 , CO= 1.6231E+09

図 5.42: Q2 θ_z 方向の vignetting.



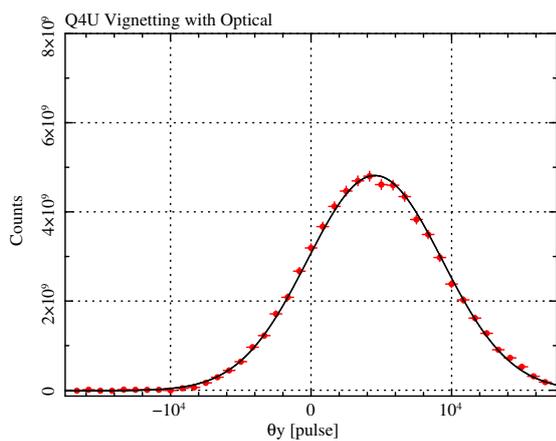
GC= 9648 , CW= 4144 , GN= 5.5981E+09 , CO= 5.1546E+06

図 5.43: Q3 θ_y 方向の vignetting.



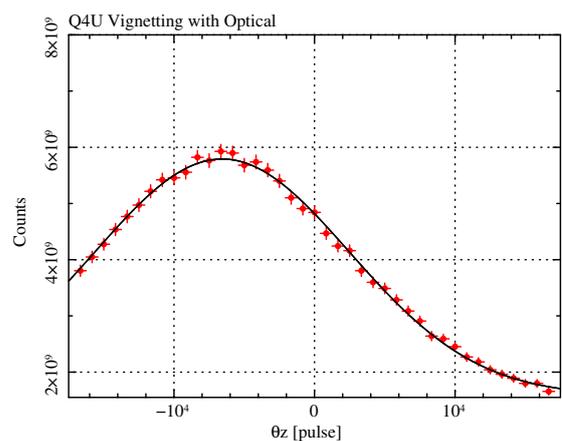
GC= 3070 , CW= 8444 , GN= 4.6578E+09 , CO= 1.7391E+09

図 5.44: Q3 θ_z 方向の vignetting.



GC= 4840 , CW= 4890 , GN= 4.3251E+09 , CO= 9.7372E+06

図 5.45: Q4 θ_y 方向の vignetting.



GC= 4573 , CW= 9662 , GN= 4.2381E+09 , CO= 1.5301E+09

図 5.46: Q4 θ_z 方向の vignetting.

表 5.14: vignetting のフィット結果。ガウシアン + 定数でフィット。誤差は 90% エラー。

Config	GC [pulse]	GW [pulse]	GN [pulse]	CO [pulse]
Q1U θ_y	$1871.2^{+23.7}_{-23.7}$	$3848.2^{+18.5}_{-18.5}$	$610.2^{+4.4}_{-4.4} E + 7$	$-24.0^{+4.2}_{-4.2} E + 6$
θ_z	$-2553.3^{+69.6}_{-69.6}$	$8299.2^{+182.0}_{-173.0}$	$429.7^{+7.0}_{-6.8} E + 7$	$173.4^{+7.2}_{-7.7} E + 7$
Q2U θ_y	$6868.6^{+30.8}_{-30.8}$	$3624.4^{+16.9}_{-16.9}$	$611.3^{+16.9}_{-16.9} E + 7$	$-8.0^{+3.9}_{-3.9} E + 6$
θ_z	$419.4^{+70.4}_{-70.4}$	$8657.8^{+281.0}_{-260.0}$	$40.8^{+1.1}_{-1.0} E + 8$	$16.3^{+1.1}_{-1.2} E + 8$
Q3U θ_y	$9648.4^{+107.0}_{-107.0}$	$4143.8^{+25.4}_{-25.4}$	$550.8^{+4.3}_{-4.3} E + 7$	$5.2^{+3.9}_{-3.9} E + 6$
θ_z	$-3970.0^{+77.2}_{-77.2}$	$8444.1^{+172.0}_{-165.0}$	$406.8^{+6.0}_{-5.8} E + 7$	$179.0^{+6.0}_{-6.3} E + 7$
Q4U θ_y	$4540.1^{+30.7}_{-30.7}$	$4800.3^{+27.5}_{-27.5}$	$482.6^{+3.7}_{-3.7} E + 7$	$-9.7^{+5.5}_{-5.5} E + 6$
θ_z	$-6573.1^{+91.9}_{-93.0}$	$9062.2^{+174.0}_{-167.0}$	$420.8^{+4.9}_{-4.9} E + 7$	$158.3^{+4.8}_{-5.0} E + 7$

続いて Quadrant 毎の焦点距離の結果についてまとめる。Vignetting により求めた光量最大の位置に望遠鏡を傾け、LR 法により焦点距離を算出する (図 5.47)。結果はどの Quadrant も ± 10 mm 以内に収まっており、ほぼ設計値通りとなった。また、LR 法によって求めた焦点距離に検出器を置き、レーザー距離計で検出器と望遠鏡間の距離を測定した (表 5.16)。

表 5.15: 測定条件。

Config.	Q1U, Q2U, Q3U, Q4U
スキャン範囲 ΔFL	-100 mm ~ +100 mm
スキャンピッチ	10 mm ピッチ
ISO	100
Exposure	1/100 sec
可視光光源の明るさ	6

表 5.16: LR 法による焦点距離の結果。

	Q1U	Q2U	Q3U	Q4U
ΔFL	-10.8 ± 1.2 mm	$+6.4 \pm 1.2$ mm	$+5.9 \pm 1.2$ mm	-9.5 ± 1.2 mm
距離計	5590 ± 1 mm	5607 ± 1 mm	5608 ± 1 mm	5592 ± 1 mm

5.5 Quadrant 毎の焦点距離

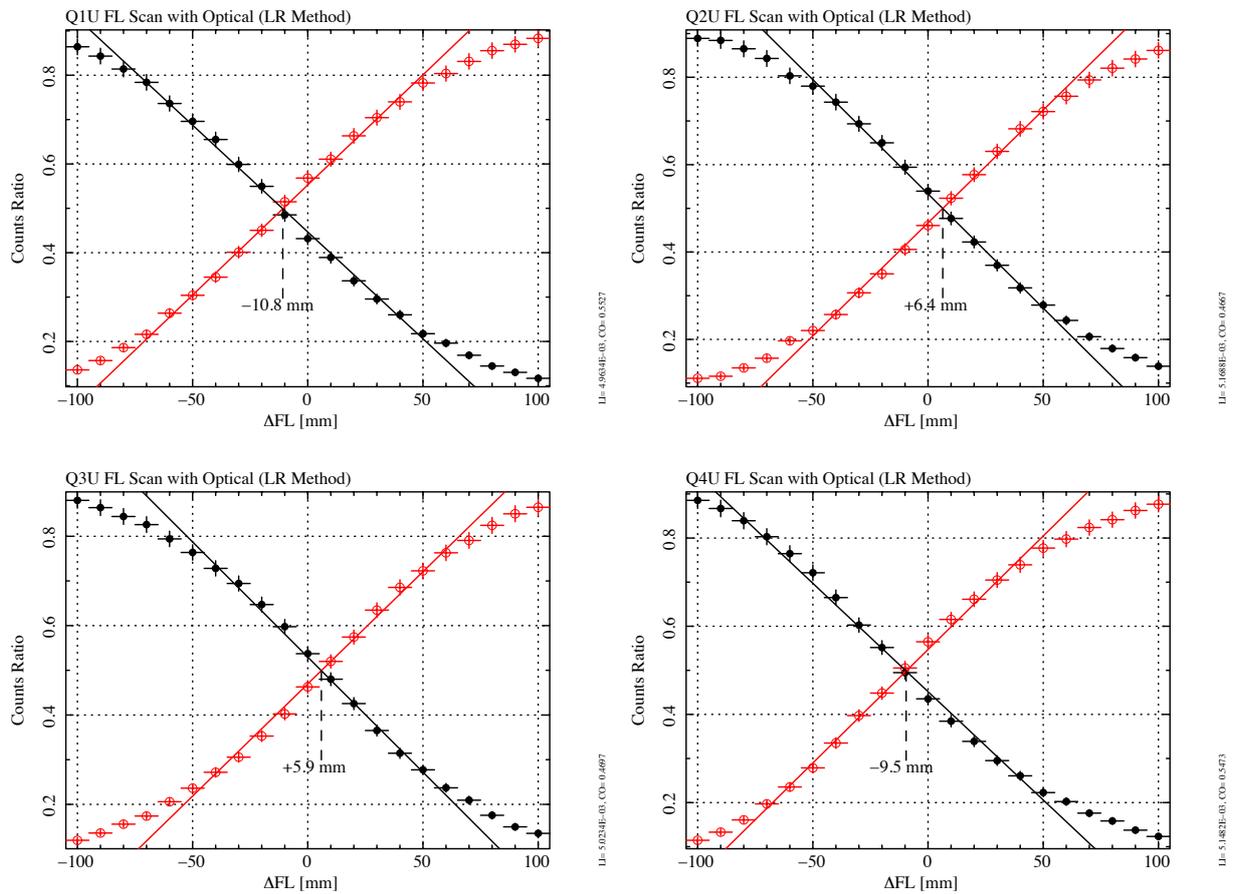


図 5.47: Quadrant 毎の焦点距離 (5600 mm) からのずれ。縦軸は光量の比、横軸は焦点距離からのずれ。イメージの半分の領域の光量の比を赤線と黒線で表している。データは Linear + Constant でフィット。左上: Q1U、右上: Q2U、左下: Q3U、右下: Q4U。

第6章 X線測定 ～望遠鏡の全体評価～

6.1 地上較正試験

6.1.1 地上較正試験の目的

地上較正試験は主に次のような目的がある。

1. 衛星搭載望遠鏡の光学的特性を地上で把握する。
2. 第一項での測定結果をもとに、軌道上での観測データを理解することを目的とした応答関数を構築する。
3. 望遠鏡の特性を理解し、今後の望遠鏡製作にフィードバックすることで、次世代に向けてより高性能な望遠鏡の製作を目指す。

の三つである。

打ち上げる前に望遠鏡の光学的特性を地上で把握しておくことは非常に重要である。光学的特性とは、望遠鏡の光軸の方向、X線の集光力（有効面積）、結像性能などである。ASTRO-Hには軟X線望遠鏡が2台搭載され、そのうちの1台は世界初となるマイクロカロリメータと組み合わされる。特にASTRO-Hの大きな目的の一つは、マイクロカロリメータによる軟X線の超高分解能により、高温ガスの運動や宇宙の進化をリアルタイムの映像として明らかにし、超広帯域の観測とも合わせることで、ダイナミックな宇宙の進化の真の姿が初めて明らかにすることである。

そのため、より有効面積の大きい方の望遠鏡と組み合わせることが望ましく、これらは地上での測定結果から選択・決定される。また、既知のエネルギーに単色化されたX線と特性のよくわかった検出器によってX線望遠鏡の特性を評価することができ、さらにQuadrant毎やセクター毎の局所的な測定が可能である。これら局所的な測定は望遠鏡全体での測定では得ることが難しい情報の多くを得ることができる。

地上で得られた光学的特性のデータは、X線望遠鏡の応答関数を構築に利用される。宇宙空間において、ASTRO-Hに搭載されるSXSやSXIには直接天体からのX線が届くことは基本的にはない。天体からのX線はX線望遠鏡で反射・集光され、検出器面に像を結ぶからである。したがって、我々はX線望遠鏡が集光したX線の情報を入手することになる。軌道上で得られた観測データをより深く正確に理解し、サイエンスに活かすためには、地上での較正試験を通じてX線望遠鏡の応答関数を構築しておくことが必要不可欠である。応答関数とは、入射したX線が検出器面でどのような出力を返すのかを関数で表したものであり、X線の入射角やエネルギーに依存する。一方で、地上較正試験では単色化したエネルギーで測定を行うことはできるが、実際の観測データの解析には全エネルギー、すべての入射角度に対応する応答関数がわ

6.1 地上較正試験

からなくてはならない。そのため、地上較正試験で得た測定結果を使い、応答関数を構築するための Ray Tracing を行う。Ray Tracing とは、コンピュータ上に仮想的な X 線望遠鏡を作り出し、X 線の軌跡を追跡して焦点面にどのような像を結ぶのかをシミュレーションする方法である。

さらに地上較正試験で得られた光学的特性から望遠鏡の構造を理解することも重要である。あすか衛星を始め、すざく衛星、ASTRO-H と、その特性を理解することで望遠鏡の性能を大幅に向上することに成功してきた。このように過去の望遠鏡の構造や特性を次の望遠鏡製作にフィードバックすることで、より高性能な望遠鏡の製作を目指す。また、打ち上げ後の軌道上でも較正試験は行われ、地上の測定結果と共に、最終的な X 線望遠鏡の応答関数を構築することが一番の目的である。

軌道上の較正試験では、地上では不可能な測定や不向きな測定に重点がおかれる。地上では十分な平行度を持つ、X 線望遠鏡の口径程度 ($\sim 10\text{--}100\text{ cm}$) の X 線ビームを作ることは難しく、一度に望遠鏡全体を照らすことは困難である。もちろん無重力状態での測定は地上ではまず無理である。

6.1.2 測定項目とその定義

X 線望遠鏡の応答関数とは、ある強度を持つ点源から放射される X 線が、焦点面上にどのような強度分布のイメージを作るのかを関数として表したもので、X 線のエネルギーと入射角 θ に依存する。天空座標 (α, δ) に分布する強度分布 F の天体を X 線望遠鏡を通して見ると、検出器の焦点面座標 (r, θ) とエネルギー E の関数として観測データ G を得る。応答関数を H_{Res} として式に表すと次のようになる。

$$F(E, \alpha, \delta) \times H_{Res} = G(E, r, \theta) \quad (6.1)$$

そして X 線望遠鏡に強度 1 の平行 X 線を入射させたとすると、そのときの観測データ G が応答関数と等しくなる。この G は強度を表す関数と焦点面のイメージの広がりを表す関数に分離することができ、

$$1 \times H_{Res} = G(E, r, \theta) \quad (6.2)$$

$$= S_{eff}(E, \theta) \cdot PSF(E, r, \theta) \quad (6.3)$$

となる。 S_{eff} が強度 (有効面積)、PSF がイメージの広がり (結像性能) に対応している。

この応答関数の作成のために必要な測定は主に以下の通りである。

1. 光軸

X 線望遠鏡の有効面積が最大となる軸。X 線望遠鏡を通した観測から絶対的な天体の X 線強度を求めるためには、X 線望遠鏡の光軸がどこを向いているのかを把握しておく必要がある。原理的には可視光による望遠鏡光軸と一致するが、測定環境や測定方法が全く異なるため、X 線でも望遠鏡光軸を再確認しておく。

2. 有効面積

X 線を集光する実効的な面積のことである。X 線望遠鏡を通した観測から絶対的な光源のフラックスを求めるために必要不可欠な量である。式 (6.3) では有効面積は S_{eff} と表され、 E と θ の関数となっている。地上較正試験においては、6 種類の既知の単色化 X 線を用いて有効面積のエネルギー依存性を調べる。また、X 線の入射角を変えることで有効面積の入射角依存性を調べる。

3. 有効面積の入射角依存性

X 線望遠鏡を X 線に対して傾けた時の有効面積の変化。X 線望遠鏡の光軸での有効面積と共に、off-axis 角での有効面積を角度の関数として定式化しておく。限られた検出器の視野内で複数の天体を 1 視野に収めて観測する時には off-axis 角での観測になる。このように常に on-axis で観測ができるわけではないので、有効面積の角度依存性を理解しておくことで off-axis 角での観測でも天体の明るさを見積もることができる。

4. 結像性能

X 線望遠鏡が平行光を集光したときに焦点面上にできる輝度分布のことで、理想的には焦点面のイメージは点となるが、Wolter I 型光学系の円錐近似、アライメントバーのずれ、鏡面形状の粗さなどの様々な要因のため、焦点位置を中心に広がりをもった分布になる。そのため、結像中心からの距離 r の関数として結像性能を評価することが多く、本論文でもその評価方法を採用している。

結像性能を調べておくと、天体の空間的な広がりを知るのに重要な手がかりとなる。結像性能は PSF で表され、 E, r, θ の関数となっている。

5. 焦点距離

焦点距離は、primary と secondary の継ぎ目から X 線望遠鏡によって反射された X 線が光軸と交わる点までの距離で定義される。ASTRO-H に搭載される X 線望遠鏡では、全ての半径にある反射鏡が同一の点で結像するように設計されている。従って、焦点面では最も小さい Half Power Diameter (HPD) が得られる。また、焦点距離では最も対称性の良いイメージが得られることになる。可視光測定においては LR 法を用いて焦点距離を見積もったが、X 線測定でも同様の手法を取っている。他にも X 線測定では HPD 法がある。これは、最も HPD の小さな値の得られる点を焦点として求める。

6. 迷光視野外から検出器面に洩れ込む X 線を迷光と呼ぶ。迷光はバックグラウンドとして観測精度の劣化を引き起こす。迷光については 3.3 章を参照されたい。

6.2 X 線測定に向けたアライメント

6.2.1 セオドライト、キューブミラー、X 線軸の正対

可視光測定の時と同様に、セオドライト、キューブミラー、X 線軸を正対させて原点を決めておく。理由は、可視光と X 線を出した光軸が比較するためである。ただし、セオドライトと X 線軸を精度よく正対させる必要がある。真空中でも確認作業ができることを前提として、下

6.2X 線測定に向けたアライメント

流側チャンバーの窓から測定出来るよう、セオドライトは X 線ビームライン下流側に設置し、以下の 2 つを使って正対させる。

1. 0.1 mm に絞った下流側の 4 極スリット。セオドライトからの距離は 12.710 m。
2. 中流側ピンホール (可動式 X 線発生装置のステージに設置。サイズは直径 0.1 mm)。このピンホールは、スリットをしぼった状態で X 線が通るところをあらかじめ確認した位置に設置する。セオドライトからの距離は 27.030 m。

セオドライトを X 線軸に正対させるために、4 極スリットの中心と中流ピンホールの中心の角度をそれぞれ測定し、Azimuth(AZ) 方向と Elevation(EL) 方向の差が 0 になるまで上下左右に台ごと平行移動させながら測定を繰り返す。3 回繰り返した結果を表 6.1 に示す。

表 6.1: X 線軸に正対させるセオドライトの値の履歴。括弧内はセオドライトの移動量。正負はビームライン座標に順している。

Number	中流ピンホール (AZ, EL)	下流スリット (AZ, AL)	差 (AZ, AL)
1	(108 °57'17", 270 °00'01")	(108 °59'51", 269 °59'28")	(-2'34" ($D_y +17.9$ mm), 0'33" [$D_z -3.8$ mm])
2	(108 °47'26", 270 °00'27")	(108 °47'43", 270 °00'32")	(-0'17" ($D_y +2.0$ mm), -0'05" [$D_z +0.6$ mm])
3	(108 °46'55", 270 °00'26")	(108 °46'59", 270 °00'31")	(-0'04", -0'05")

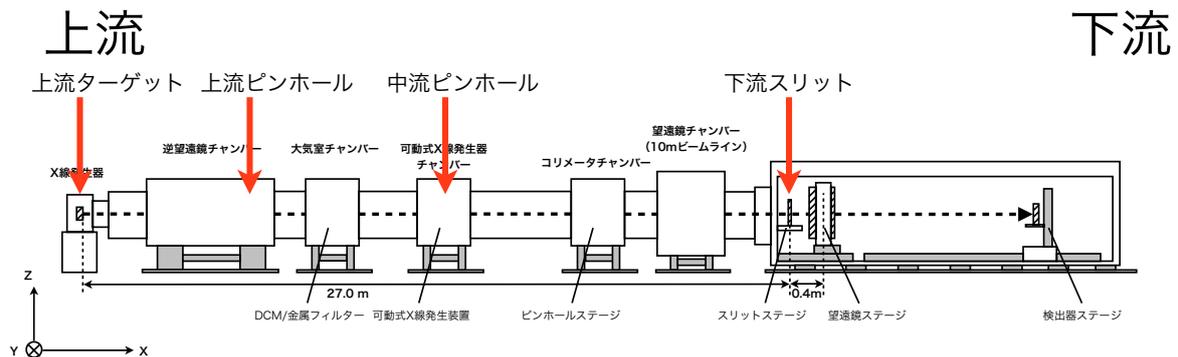


図 6.1: D1F ビームラインの概略図。矢印があるところのピンホールやスリットを用いてセオドライトを X 線軸に正対させた。3 回測定を繰り返し、5 秒角程度で正対できている。

セオドライト、スリット中心、中流ピンホールが正対している状態にて、さらに上流側ピンホール (逆望遠鏡チェンバー) と上流ターゲットの部分を見て、セオドライトと正対していることを確認した (図 6.1)。結果を表 6.2 に示す。これにより、セオドライトと X 線軸が約 5 秒角程度であることが分かる。ただし DCM を使う場合は X 線の軸が変わるため、この方法は使えないので注意が必要である。

6.2X 線測定に向けたアライメント

表 6.2: セオドライトを X 線軸に正対させたときの、各場所の位置。5 秒ぐらいでセオドライトと X 線軸正対していることが分かる。

場所	AZ	EL
下流スリット	108°46'58"	270°00'33"
中流ピンホール	108°46'58"	270°00'29"
上流ピンホール	108°46'56"	270°00'28"
上流ターゲット	108°46'57"	270°00'29"

セオドライトの移動量の計算

図 6.2 の y 方向 (AZ) の移動量について考える。

セオドライトの位置が X 線軸より y だけずれているとする。このとき、セオドライトと中流ピンホールの角度が α 、スリットの角度が β だったとき、移動量 y は、

$$y = L_2 \tan \alpha \quad (6.4)$$

$$y = L_1 \tan \beta \quad (6.5)$$

(ただし $\alpha < \beta$)

となる。ここで L_1 はセオドライトからスリットまでの距離、 L_2 はセオドライトから中流ピンホールまでの距離である。ただし α と β は分からないため、このままでは求まらない。そこで α と β の差 θ を考える。この θ はセオドライトで測定したスリットの角度と中流ピンホールの角度の差と等しい。

$$\theta = \beta - \alpha \text{ より、} \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} \tan \beta &= \tan(\alpha + \theta) \\ &= \frac{\tan \alpha + \tan \theta}{1 - \tan \alpha \tan \theta} \\ &\simeq \tan \alpha + \tan \theta \end{aligned} \quad (6.7)$$

となる。ここで α と θ は十分小さいので、 $\tan \alpha \tan \theta \simeq 0$ と近似した。よって (6.4), (6.5), (6.7) から、求めるべき移動量 y は、

6.2X 線測定に向けたアライメント

$$\begin{aligned}
 y &= L_1 \tan \beta \\
 &= L_1 (\tan \alpha + \tan \theta) \\
 &= L_1 \left(\frac{y}{L_2} + \tan \theta \right) \\
 &= \frac{L_1}{L_2} y + L_1 \tan \theta
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

y について解くと、

$$y = \frac{\tan \theta}{\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2}} \tag{6.9}$$

$$\tag{6.10}$$

と求まる。 z 方向 (EL) についても同様の計算で求めることができる。

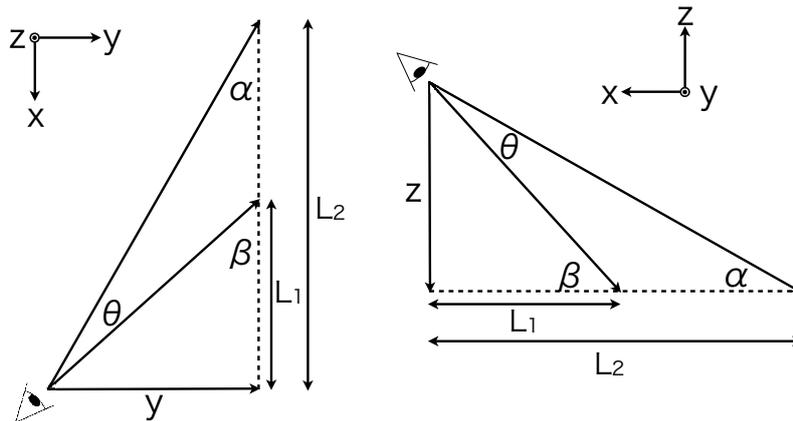


図 6.2: セオドライトから見た角度の関係。

続いてキューブミラーの法線をセオドライトと正対させる。セオドライトはすでに X 線軸と正対しているため、セオドライトとキューブミラーが正対すれば、必然的にキューブミラーと X 線軸も正対する。正対させる方法は可視光測定と同様 (図 5.5) で、セオドライト自身が放った光が中心にくるように望遠鏡の θ_y, θ_z を調整し、そこを $(\theta_y, \theta_z) = (0, 0)$ ¹ とする。

¹ただし真空引きを行うと望遠鏡が $20'' \sim 30''$ ほどずれるため、再度正対し直し、そこを $(\theta_y, \theta_z) = (0, 0)$ としている。

6.2.2 検出器中心、望遠鏡中心、X線軸の正対

検出器中心 (D_y, D_z) と望遠鏡中心 (S_y, S_z) を X 線軸に正対させる。実際に X 線を使って正対させるため、この時点からチャンバー内を真空引きして調整を行う。

まず、検出器中心の調整を行う。検出器中心の調整は位置撮像能力がある X 線 CCD カメラを使用して行う。X 線 CCD カメラの中心は (620, 576) pixel なので、スリットで切り出した X 線の中心がこの座標にくるように (D_y, D_z) を調整し、その位置を原点とする。

次に望遠鏡中心の調整を行う。X 線測定では、望遠鏡に反射された X 線イメージの結像位置が検出器の中心にくることが望ましいため、実際に望遠鏡のイメージを見て、そのイメージの中心（ピーク）が検出器の中心にくるように (S_y, S_z) を調整する。具体的な測定方法は以下の通り。

1. 各 Quadrant 毎に 1line だけスキャンし、イメージを取得する（口の字ラスタースキャン：図 6.3）。

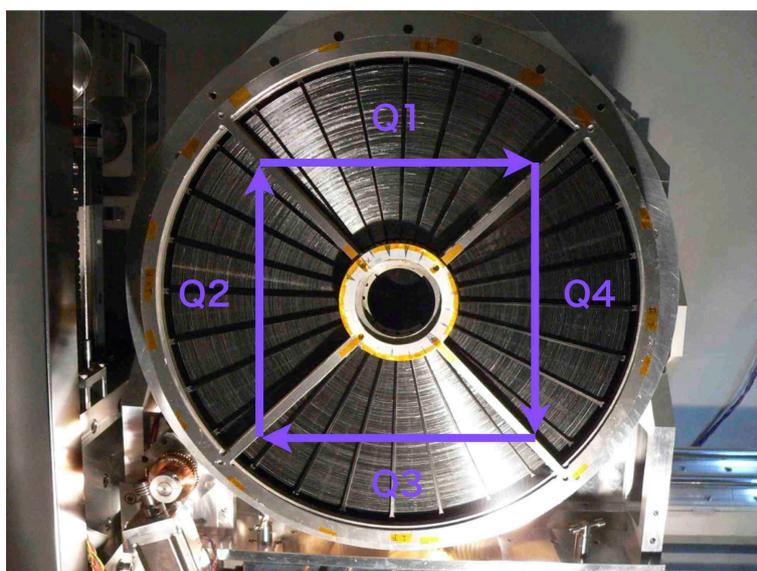


図 6.3: 口の字ラスタースキャン。

2. 各 Quadrant のイメージ中心を求めて平均を取る（図 6.4）。そこを望遠鏡中心とし、(S_y, S_z) の原点とする。

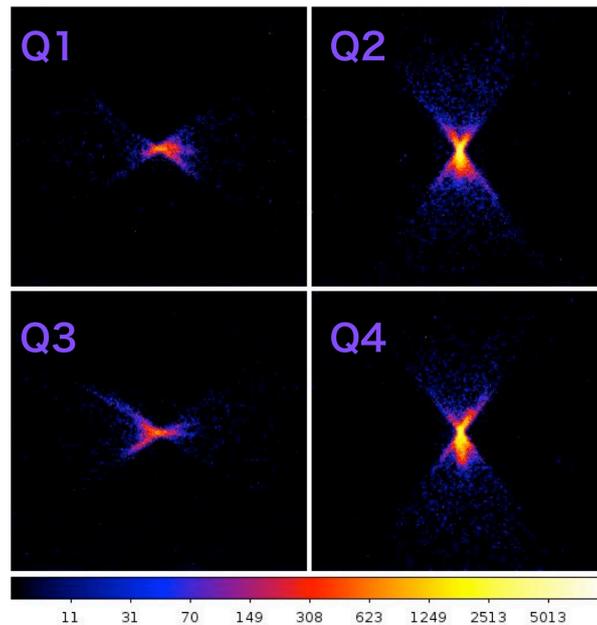


図 6.4: 口の字ラスタースキャンで得られたイメージ。

6.3 X 線による望遠鏡光軸

第 5 章では可視光による望遠鏡光軸を決めた。ここでは X 線による望遠鏡光軸を決めるための vignetting を行う。ただし X 線による vignetting は有効面積の角度依存性を利用して評価する。有効面積の測定方法は 6.4.1 を参照。

6.3.1 測定方法

可視光による望遠鏡光軸は横置きと縦置きの場合の二つの configuration で測定を行った。このうち、横置きのときの光軸を X 線測定、縦置きの際の光軸を衛星アライメントに採用した。よってここでは横置きの際の望遠鏡光軸を参考にして X 線測定を行う。横置きの場合、可視光によるキューブミラーからの望遠鏡光軸の離角は $(\theta_y, \theta_z) = (-181'', -135'')$ であった。X 線測定でも Q1U における望遠鏡光軸を出すため、X 線光軸 = 可視光光軸と仮定し、 $(\theta_y, \theta_z) = (-181'', -135'')$ $= (-3.02', -2.25')$ だけあらかじめ傾ける。そこを中心に望遠鏡を傾け、有効面積の変化から X 線による望遠鏡光軸を算出する。ただし可視光測定と違って望遠鏡全体に一気に X 線を照射することができないため、Quadrant 毎の光量最大の角度を測定し、その平均から望遠鏡光軸を見積もる。以下、詳しい測定方法について説明する。

1. Q1U の configuration にし、可視光測定による光軸 $(\theta_y, \theta_z) = (-181'', -135'')$ $= (-3.02', -2.25')$ に望遠鏡を傾ける。ただしキューブミラー法線と X 線軸が正対するところを原点とする。
2. 可視光光軸を中心に、 $(\Delta\theta_y, \Delta\theta_z) = (0', 0'), (\pm 2', 0'), (\pm 4', 0'), (\pm 8', 0'), (0', \pm 2'), (0', \pm 4'), (0', \pm 8')$ に傾けて有効面積の変化を測定する。

6.3X 線による望遠鏡光軸

3. 望遠鏡全体の vignetting と同等のものを得るために、各 off-axis 角毎に Quadrant の有効面積を足し合わせる。さらに横軸に off-axis 角、縦軸に有効面積をプロットし、Gaussian でフィットする。なお、 $(\Delta\theta_y, \Delta\theta_z) = (0', 0'), (\pm 4', 0'), (0', \pm 4')$ の3点でモデルフィットしても中心値は数秒しか変位しなかったため、Q2、Q3、Q4は $(\Delta\theta_y, \Delta\theta_z) = (0', 0'), (\pm 4', 0'), (0', \pm 4')$ の3点のみデータを取得した。

6.3.2 測定結果

X 線による望遠鏡光軸を求めるための vignetting の結果を図 6.5~6.14 にまとめる。モデルは Gaussian を使用。X 線測定では可視光のように一度に望遠鏡全体に X 線を当てることはできないため、望遠鏡光軸はそれぞれの角度に振ったときの有効面積を Quadrant 毎に足し合わせ、Gaussian でフィットすることで算出することができる。その結果、可視光光軸で求めた光軸とほぼ consistent であることがわかった。図 6.15、表 6.6 に X 線による望遠鏡光軸をまとめる。

表 6.3: 測定条件。

Config.	Q1U
Target	Ti-K α
Slit size	2 × 2 mm
Pitch	4 mm pitch
Measure Point $(\Delta\theta_y, \Delta\theta_z)$	$(0', 0'), (\pm 2', 0'), (\pm 4', 0'), (\pm 8', 0'),$ $(0', \pm 2'), (0', \pm 4'), (0', \pm 8')$
FL	5600 mm
Detector	P.C.

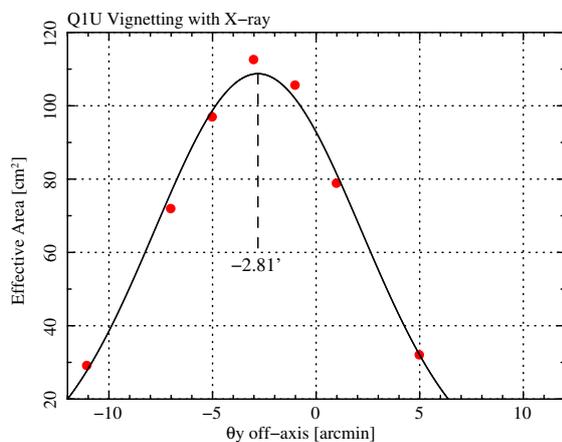


図 6.5: Q1 θ_y 方向の vignetting。

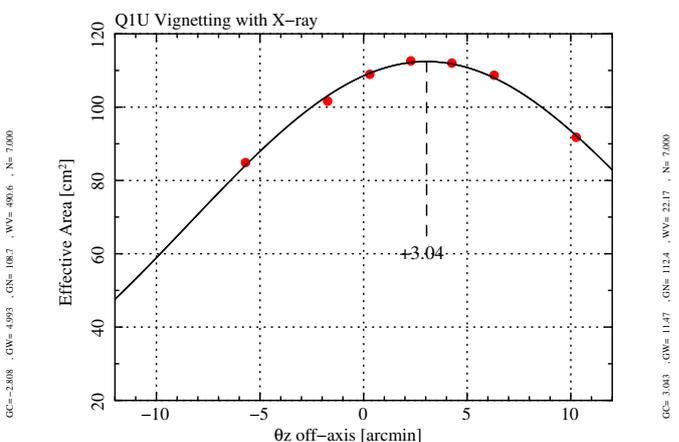


図 6.6: Q1 θ_z 方向の vignetting。

6.3X 線による望遠鏡光軸

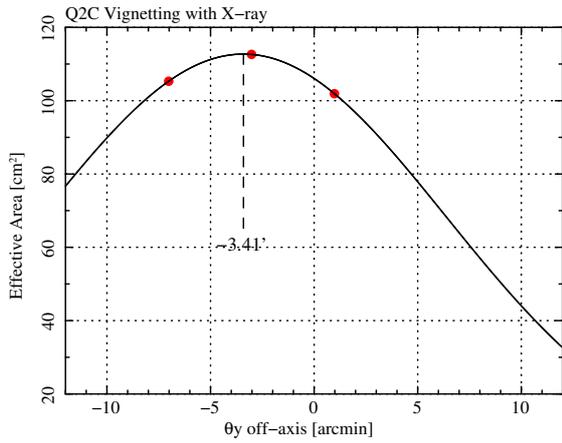


図 6.7: Q2 θ_y 方向の vignetting。

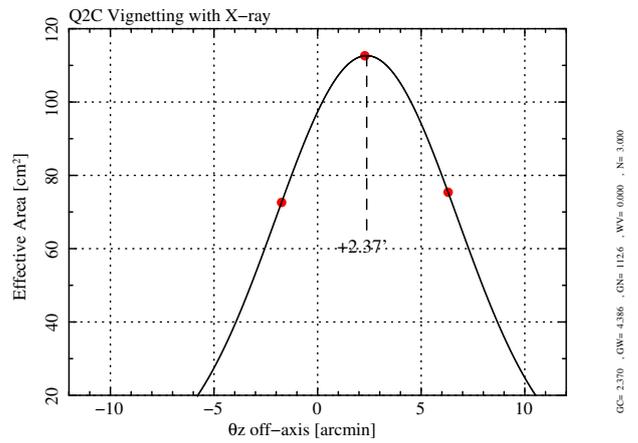


図 6.8: Q2 θ_z 方向の vignetting。

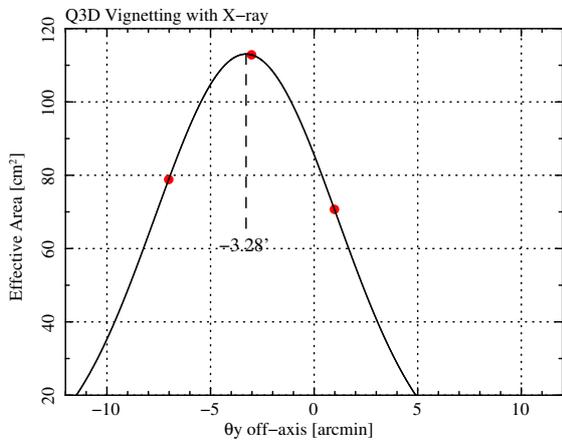


図 6.9: Q3 θ_y 方向の vignetting。

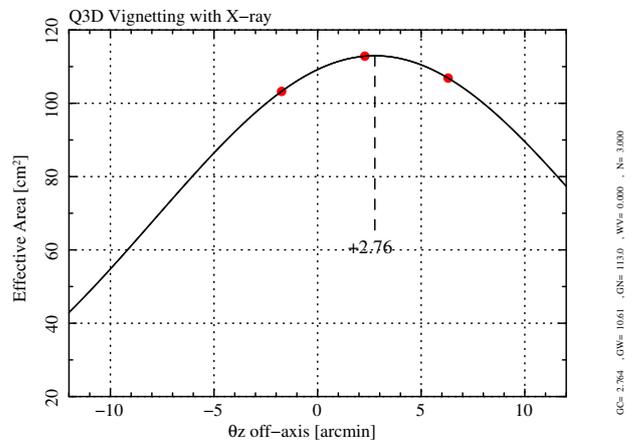


図 6.10: Q3 θ_z 方向の vignetting。

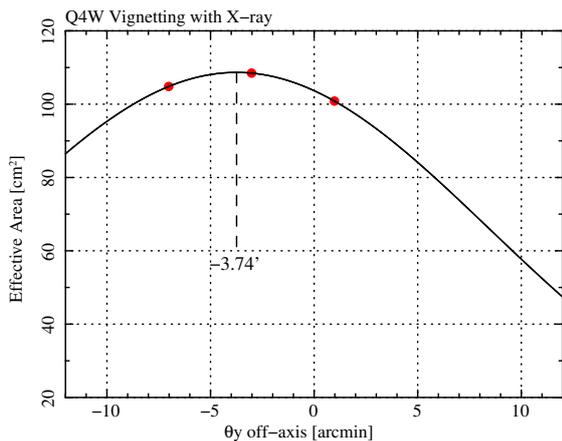


図 6.11: Q4 θ_y 方向の vignetting。

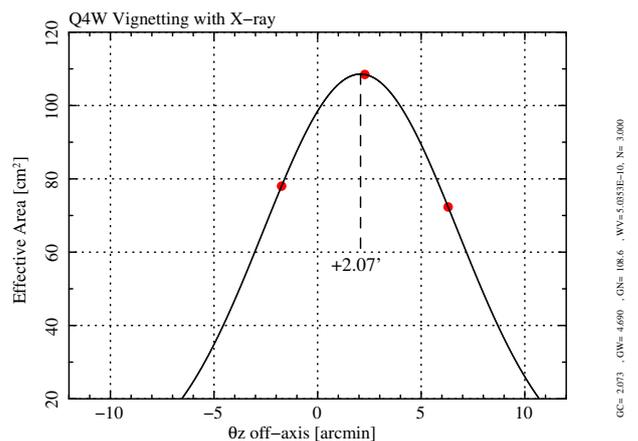


図 6.12: Q4 θ_z 方向の vignetting。

6.3X 線による望遠鏡光軸

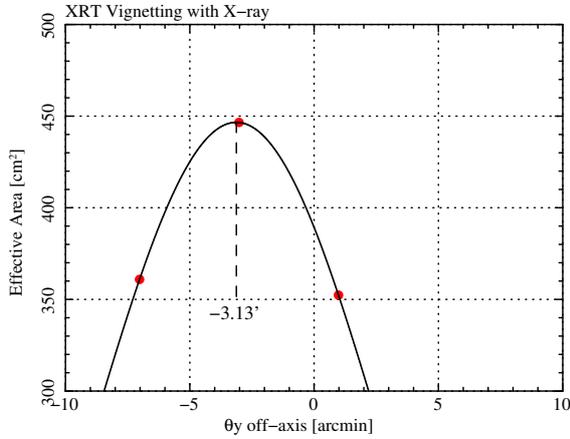


図 6.13: 望遠鏡光軸 θ_y 方向の vignetting.

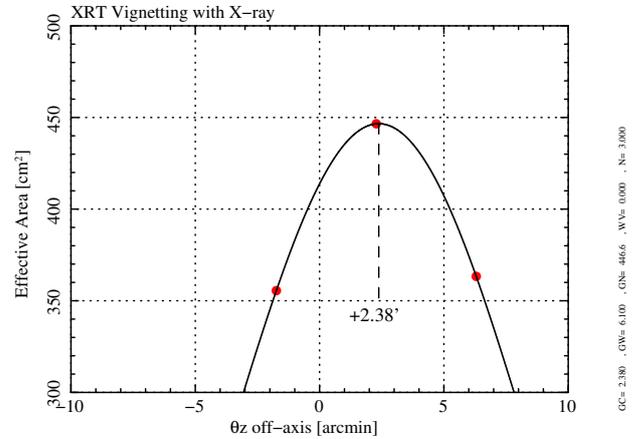


図 6.14: 望遠鏡光軸 θ_z 方向の vignetting.

表 6.4: 各 Quadrant の Vignetting における有効面積。

Pos.	-4'	0'	+4'
Q1U θ_y	71.96 ± 0.32 cm ²	112.61 ± 0.39 cm ²	78.89 ± 0.35 cm ²
θ_z	101.63 ± 0.41 cm ²	112.61 ± 0.39 cm ²	108.70 ± 0.43 cm ²
Q2C θ_y	105.30 ± 0.42 cm ²	112.62 ± 0.44 cm ²	101.91 ± 0.41 cm ²
θ_z	72.62 ± 0.32 cm ²	112.62 ± 0.44 cm ²	75.39 ± 0.33 cm ²
Q3D θ_y	78.84 ± 0.34 cm ²	112.85 ± 0.44 cm ²	70.71 ± 0.31 cm ²
θ_z	103.24 ± 0.41 cm ²	112.85 ± 0.44 cm ²	106.87 ± 0.42 cm ²
Q4W θ_y	104.82 ± 0.42 cm ²	108.47 ± 0.43 cm ²	100.84 ± 0.41 cm ²
θ_z	78.02 ± 0.34 cm ²	108.47 ± 0.43 cm ²	72.34 ± 0.32 cm ²
Average θ_y	87.91 ± 0.18 cm ²	111.64 ± 0.21 cm ²	88.09 ± 0.19 cm ²
θ_z	88.88 ± 0.19 cm ²	111.64 ± 0.21 cm ²	90.83 ± 0.19 cm ²
Total θ_y	360.92 ± 0.76 cm ²	446.55 ± 0.85 cm ²	352.35 ± 0.74 cm ²
θ_z	355.51 ± 0.74 cm ²	446.55 ± 0.85 cm ²	363.30 ± 0.76 cm ²

表 6.5: Vignetting のフィット結果。Gaussian でフィット。誤差は 90% エラー。

Config	GC [arcmin]	GW [arcmin]	GN [arcmin]
Q1U θ_y	-2.81 ± 0.01	4.99 ± 0.01	108.75 ± 0.23
θ_z	3.04 ± 0.04	11.47 ± 0.01	112.43 ± 0.23
Q2C θ_y	-3.41 ± 0.07	9.78 ± 0.28	112.71 ± 0.44
θ_z	2.37 ± 0.01	4.39 ± 0.03	112.64 ± 0.44
Q3D θ_y	-3.28 ± 0.02	4.40 ± 0.02	113.05 ± 0.39
θ_z	2.76 ± 0.09	10.61 ± 0.59	112.97 ± 0.39
Q4W θ_y	-3.74 ± 0.13	12.22 ± 0.02	108.66 ± 0.42
θ_z	2.07 ± 0.02	4.69 ± 0.03	108.58 ± 0.43
XRT θ_y	-3.13 ± 0.01	5.96 ± 0.03	446.62 ± 0.85
θ_z	2.38 ± 0.01	6.10 ± 0.03	446.61 ± 0.85

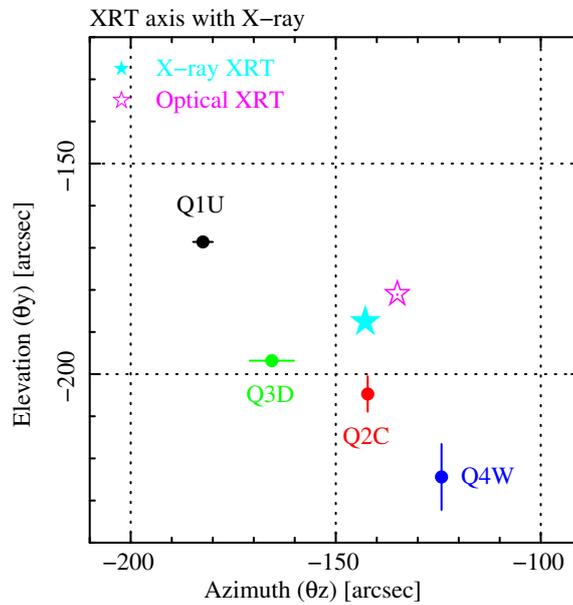


図 6.15: Q1U における各 Quadrant の X 線光軸と、望遠鏡全体の X 線光軸。

表 6.6: Q1U における各 Quadrant の X 線光軸と望遠鏡光軸の値。

	Azimuth (θ_z) [arcsec]	Elevation (θ_y) [arcsec]
Q1	$-182''$	$-167''$
Q2	$-142''$	$-205''$
Q3	$-166''$	$-197''$
Q4	$-124''$	$-224''$
X-ray XRT axis	$-143''$	$-188''$
Optical XRT axis	$-135''$	$-181''$

6.4 有効面積

有効面積の測定は6種類で行った。Al-K α (1.49 keV)、Ti-K α (4.51 keV)、Cu-K α (8.04 keV)、Pt-L α (9.44 keV)、Pt-L β (11.07 keV)、Pt-L γ (12.94 keV)である。図 6.16 は ASTRO-H に搭載される SXT の理想的な有効面積のエネルギー依存性を表している。ただし、反射鏡の表面粗さを 4Å として計算している。

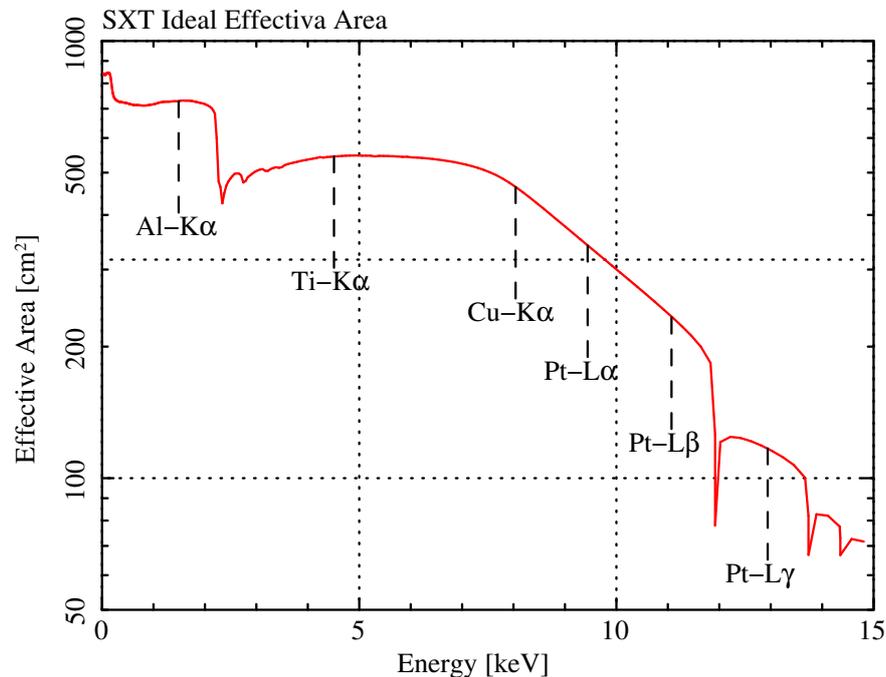


図 6.16: SXT の理想的な有効面積のエネルギー依存性。

物質に対する X 線の臨界角 θ とエネルギーには、以下の関係がある。

$$\theta \propto \frac{\sqrt{\rho}}{E} \quad (6.11)$$

SXT の反射鏡の一段目の入射角は 0.152 ~ 0.573 と設計されており、外側に行く程大きくなる。つまり X 線のエネルギーが大きくなるほど臨界角は小さくなるため、外側の反射鏡では反射されなくなる。ここでは望遠鏡を X 線で求めた光軸に置いたとき (on-axis) の有効面積をエネルギー毎にまとめる。

6.4.1 測定方法

有効面積はラスタースキャンという方法で測定を行う。X線 30m ビームラインはX線発生装置が固定されているため、望遠鏡ステージと検出器ステージを同期させて動かすことにより、望遠鏡入射面上の任意の位置にペンシルビームを照射する(図 6.17)。望遠鏡入射面をペンシルビームでくまなく走査することにより、擬似的に望遠鏡全体に平行X線が入射している状況を作り出すことができる。通常は検出器を露光させながら、 y 方向に検出器ステージと望遠鏡ステージを同期移動させ1ラインをスキャンし、 z 方向に1ラインの幅分移動させ、次のラインをスキャンする。この方法をラスタースキャンと呼ぶ。ペンシルビームの高い平行度を確保するために、スリットの z 方向の大きさは最大で結像性能測定時には2 mm、有効面積測定時には4 mm 程度にする必要があり、Quadrant 単位の測定でも最大~100ライン以上スキャンする必要がある。この測定方法から、望遠鏡の有効面積は次のように求められる。

有効面積 S_{eff} は望遠鏡の幾何学的面積 (X線が反射される実効的な面積) S_{geo} を用いて以下のよう書ける。

$$S_{eff} = S_{geo} \frac{C_{out}}{C_{in}} \quad (6.12)$$

ここで C_{in} は望遠鏡に入射されたトータルのX線光子の数、 C_{out} は焦点面に集光したX線光子の数である。 C_{in} はダイレクトX線ビームの強度 I counts/s、露光時間を t として、

$$C_{in} = It \quad (6.13)$$

と書ける。さらにX線ビームの縦幅を h mm、X線ビームの移動速度(ステージY方向の移動速度)を v_y mm/s とすると、

$$t = \frac{S_{geo}}{v_y h} \quad (6.14)$$

と表せる。よって有効面積は、

$$\begin{aligned} S_{eff} &= S_{geo} \frac{C_{out}}{C_{in}} \\ &= S_{geo} \frac{C_{out}}{It} \\ &= S_{geo} \frac{C_{out}}{I \frac{S_{geo}}{v_y h}} \\ &= \frac{C_{out} v_y h}{I} \end{aligned} \quad (6.15)$$

と求まり、有効面積は幾何学的面積に依存しない。結局、上の式において v_y と h は定数なので、ダイレクトX線ビームの強度 I と焦点面に集光した光子の数 C_{out} のみを測定することにより、有効面積を測定することができる。

6.4 有効面積

有効面積の測定は vignetting で求めた望遠鏡光軸 $(\theta_y, \theta_z) = (-188'', -143'')$ に傾けて行う。しかし、vignetting で計算した有効面積が一部²間違えており、Q1U における望遠鏡光軸を $(\theta_y, \theta_z) = (-181'', -143'')$ として本実験では測定してしまっていることをここで断っておく。ただしその差は7秒程度であり、測定の結果に critical な影響はない。なお、6.3 章にある全ての図・表については、正しいものを載せている。また、Quadrant 光軸における有効面積³についても測定を行う。これは直接応答関数等に関わる測定項目ではないが、今後の X 線望遠鏡の開発に向けた新たな情報となる。光軸の位置は表 6.6 を参考にする。ただし、Cu-K α 、Pt-L α 、Pt-L β 、Pt-L γ は DCM を挿入して測定をするため、X 線の軸が傾く。本来、DCM を挿入すると X 線軸は y 方向に水平にずれるため、望遠鏡もこの水平距離だけずらせば X 線軸と光軸は正対する。しかし本測定では X 線ビームの位置は z 方向にもある角度だけ傾いた状態であることが実験的に分かった。よってこれらのずれを補正して、X 線軸と光軸が正対するように望遠鏡を傾けなければならない。上記 4 色のエネルギーでは、望遠鏡光軸、Quadrant 光軸からこのずれる量を補正して測定を行った。補正の計算は 6.4 章の最後で説明する。

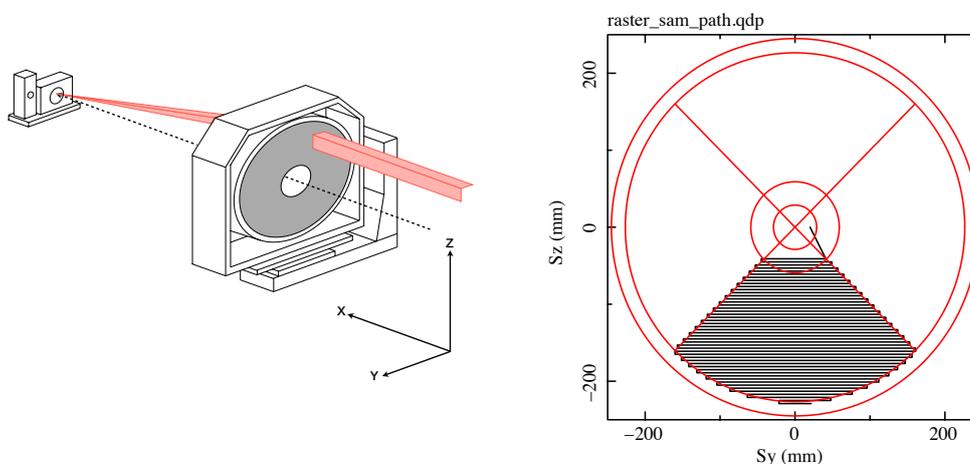


図 6.17: 左：ペンシルビームを用いた望遠鏡測定の模式図。望遠鏡の光軸と検出器を同期して動かし、望遠鏡入射面全面をペンシルビームで走査する。右：Q1U をラスタースキャンするステージの経路の例。

6.4.2 測定結果

各 Quadrant 光軸における有効面積と望遠鏡光軸における有効面積をまとめる。測定は Quadrant 毎に行った。全体的に Q4W の有効面積が他の Quadrant に比べて小さい結果となった。図 6.18 を見ると、すざくと比べて低エネルギー側では 1.3 倍、高エネルギー側では 1.5 倍大きくなり、望遠鏡としての性能が向上しているのがわかる。また、測定値から予想される有効面積が

²Q2 θ_y の $-4'$ の vignetting において、有効面積の計算を間違えていた。

³Q2 の光軸は本来は $(\theta_y, \theta_z) = (-142'', -205'')$ だが、実際は $(\theta_y, \theta_z) = (-142'', -154'')$ としているため、ここでの Q2 の有効面積は本来の値より小さいと推測される。

6.4 有効面積

ら、SXT に課せられている要求値を十分満たしていることもわかる。表 6.8、6.9 に有効面積の結果をまとめる。

表 6.7: 測定条件。

Config.	Q1U
Target	Al-K α , Ti-K α , Cu-K α , Pt-L α , Pt-L β , Pt-L γ
Slit size	2 × 2 mm
Pitch	4 mm pitch
FL	5600 mm
Detector	P.C.

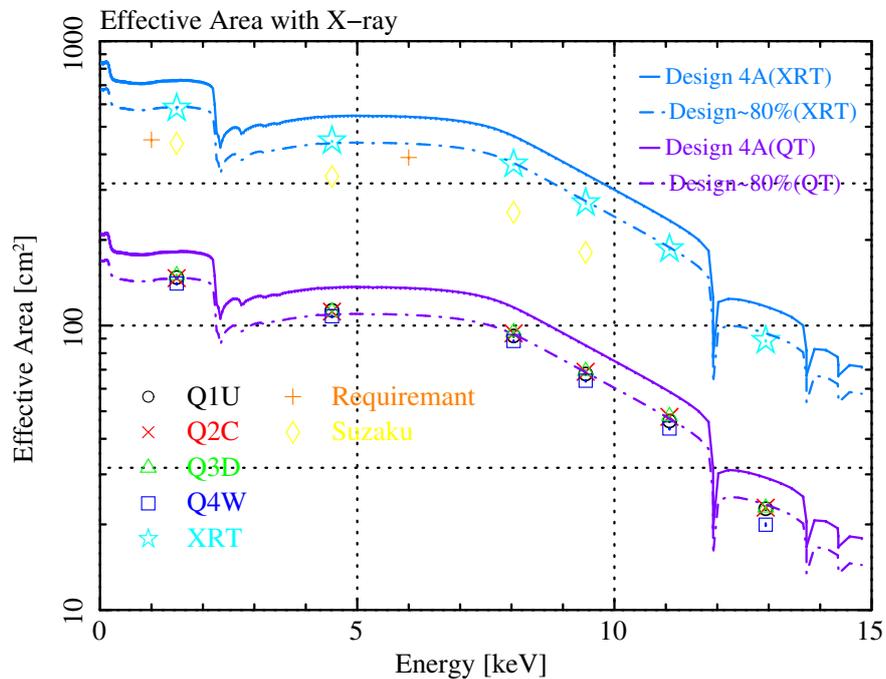


図 6.18: 望遠鏡光軸における有効面積のエネルギー依存性。○はQ1U、×はQ2C、△はQ3D、□はQ4W、☆はQuadrant4つを合計した有効面積を表し、◇はすざく衛星、+は要求値の有効面積を表す。青色の曲線と点線はそれぞれ反射鏡の表面粗さを4Åとしたときの望遠鏡1台の有効面積の理想値と予想値(理想値の80%)、紫の曲線と点線はそれぞれ表面粗さを4ÅとしたときのQuadrant1つの有効面積の理想値と予想値(理想値の80%)を表す。

6.4 有効面積

表 6.8: 望遠鏡光軸における各 Quadrant の有効面積。

	Q1U [cm ²]	Q2C [cm ²]	Q3D [cm ²]	Q4W [cm ²]	Average [cm ²]	Total [cm ²]
Al-K α	147.65 \pm 0.53	146.82 \pm 0.52	150.30 \pm 0.53	140.57 \pm 0.50	146.3 \pm 0.26	580.36 \pm 1.06
Ti-K α	113.14 \pm 0.46	111.96 \pm 0.45	112.18 \pm 0.45	107.88 \pm 0.43	111.29 \pm 0.22	445.16 \pm 0.88
Cu-K α	91.97 \pm 0.34	93.97 \pm 0.34	94.91 \pm 0.34	88.28 \pm 0.34	92.28 \pm 0.17	369.12 \pm 0.68
Pt-L α	67.60 \pm 0.28	68.80 \pm 0.28	69.29 \pm 0.28	63.99 \pm 0.23	67.42 \pm 0.13	269.68 \pm 0.52
Pt-L β	46.18 \pm 0.20	47.77 \pm 0.21	48.07 \pm 0.21	43.48 \pm 0.20	46.38 \pm 0.10	185.80 \pm 0.41
Pt-L γ	22.70 \pm 0.20	22.91 \pm 0.24	22.91 \pm 0.24	19.96 \pm 0.22	22.12 \pm 0.11	88.48 \pm 0.45

表 6.9: Quadrant 光軸における各 Quadrant の有効面積。

	Q1U [cm ²]	Q2C [cm ²]	Q3D [cm ²]	Q4W [cm ²]	Average [cm ²]	Total [cm ²]
Al-K α	148.27 \pm 0.53	146.01 \pm 0.52	150.98 \pm 0.53	143.19 \pm 0.51	147.11 \pm 0.26	588.45 \pm 1.05
Ti-K α	113.86 \pm 0.40	111.32 \pm 0.39	112.31 \pm 0.41	108.06 \pm 0.38	111.39 \pm 0.20	445.55 \pm 0.79
Cu-K α	94.64 \pm 0.34	93.86 \pm 0.34	95.58 \pm 0.34	88.66 \pm 0.29	93.19 \pm 0.16	372.74 \pm 0.66
Pt-L α	68.63 \pm 0.28	68.65 \pm 0.28	69.67 \pm 0.25	64.24 \pm 0.24	67.80 \pm 0.13	271.19 \pm 0.53
Pt-L β	47.19 \pm 0.21	47.23 \pm 0.21	48.05 \pm 0.21	43.50 \pm 0.19	46.49 \pm 0.10	185.97 \pm 0.41
Pt-L γ	23.42 \pm 0.20	22.15 \pm 0.23	22.71 \pm 0.24	20.55 \pm 0.29	22.21 \pm 0.12	88.83 \pm 0.48

DCM による X 線軸のずれに伴う光軸補正の計算方法

高エネルギーのターゲットを使用する場合、DCM を挿入して単色化をすることがある。DCM を挿入すると X 線は表面で 2 回反射するため y 方向にのみ水平にずれる。このずれる量はエネルギーによって異なり、ブラッグ角からおおよそそのずれを計算することができる。このずれを Δl とする。もし水平に Δl だけ X 線がずれた場合、スリットと検出器をそれぞれ Δl だけずらせばよい。しかし実際はスリットの移動量 Δd_y と検出器の移動量 ΔD_y は一致しないこと、さらには z 方向にもずれがあることが実験的に分かった。このことから、X 線軸は $\Delta\theta$ だけ傾いてスリットに入射されていると考えられる。つまり、X 線軸と望遠鏡光軸 (あるいは Quadrant 光軸) を正対させるためには、望遠鏡を $\Delta\theta$ だけ補正する必要がある。ここでは y 方向にずれる場合を例に挙げた補正量の計算方法について説明する。

DCM によって本来の軸から傾いた X 線軸を $\Delta\theta$ とする。まず、軸から傾いた X 線をスリットで区切り、そのときのスリットの中心の y 方向の移動量を Δd_y とする。次に、スリットの中心が検出器の中心にくるように検出器ステージを調整し、そのときの y 方向の移動量を ΔD_y とする。(ただし、 $\Delta D_y > \Delta d_y$ とする。) このときのスリットと検出器の位置関係は図 6.19 のようになる。よって、スリットと検出器の距離を L とすると、

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta D_y - \Delta d_y}{L} \quad (6.16)$$

となる。

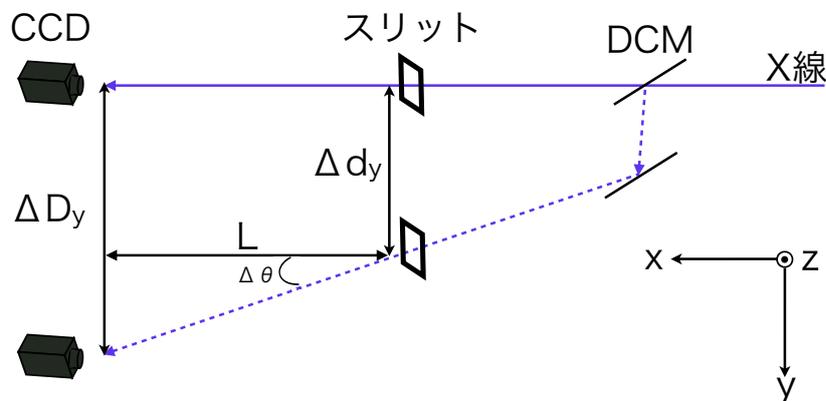


図 6.19: DCM による X 線軸のずれに伴う光軸補正の概念図。紫の直線が本来の X 線軸で、紫の点線が DCM 挿入時の X 線軸である。X 線軸と光軸を正対させるため、軸が傾いた分だけ望遠鏡も傾ける必要がある。

6.5 SXS の視野を想定した有効面積の測定

ASTRO-H には SXT と対を成す SXS(軟 X 線分光器) が搭載される。SXS は従来よりも一桁以上も良いエネルギー分解能を備えており、その視野は 5×5 mm 角 (焦点距離で 3 分角) と非常に狭い。SXT には望遠鏡光軸における有効面積の 90%以上が SXS に入るようアライメントが要求されている。ここでは望遠鏡光軸を中心により小さい範囲で vignetting を行い、有効面積の 90%となる off-axis 角を調査しておく。

6.5.1 測定方法

望遠鏡光軸 $(\theta_y, \theta_z) = (-181'', -143'')$ を中心に、 $(\theta_y, \theta_z) = (0', 0'), (\pm 1', 0'), (0', \pm 1'), (\pm 2', 0'), (0', \pm 2'), (\pm 4', 0'), (0', \pm 4')$ の計 13 点について vignetting を行う。これらの測定点を Gaussian でフィットし、望遠鏡光軸における有効面積の 90%のラインとなる off-axis 角を見積もる。

6.5.2 測定結果

図 6.20 ~ 6.24 に vignetting の結果、表 6.10 に望遠鏡光軸における有効面積の 90%が確保される望遠鏡の off-axis 角についてまとめる。結果として、最大・最小の off-axis 角は望遠鏡光軸を中心に θ_y が $-2.6' \sim +2.6'$ 、 θ_z が $-2.8' \sim +2.8'$ となり、SXS の視野である 3 分角を十分満たしていることがわかった。

表 6.10: 測定条件。

Config.	Q1U
Target	Ti-K α
Slit size	2×2 mm
Pitch	4 mm pitch
Measure Point ($\Delta\theta_y, \Delta\theta_z$)	$(0', 0'), (\pm 1', 0'), (\pm 2', 0'), (\pm 4', 0'), (0', \pm 1'), (0', \pm 2'), (0', \pm 4')$
FL	5600 mm
Detector	P.C.

表 6.11: 有効面積の 90%が入る最大・最小の off-axis 角。

Config.	Q1U	Q2C	Q3D	Q4W	XRT
off-axis 角 θ_y Min	-1.65'	-3.30'	-2.22'	-6.74'	-2.61'
Max	+2.10'	+3.96'	+1.76'	+5.00'	+2.62'
off-axis 角 θ_z Min	-4.06'	-1.82'	-4.50'	-2.39'	-2.77'
Max	+5.64'	+1.86'	+5.15'	+1.79'	+2.75'

6.5SXS の視野を想定した有効面積の測定

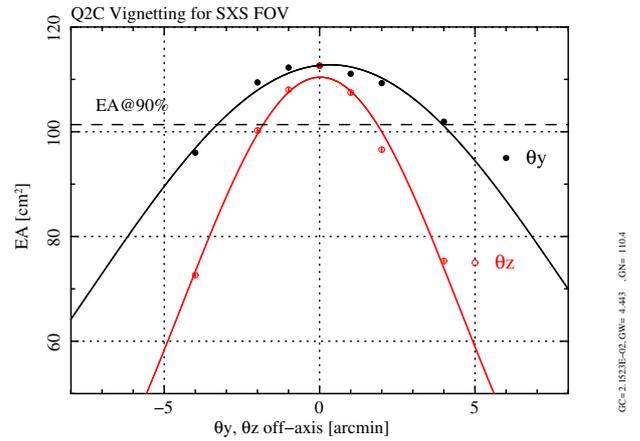
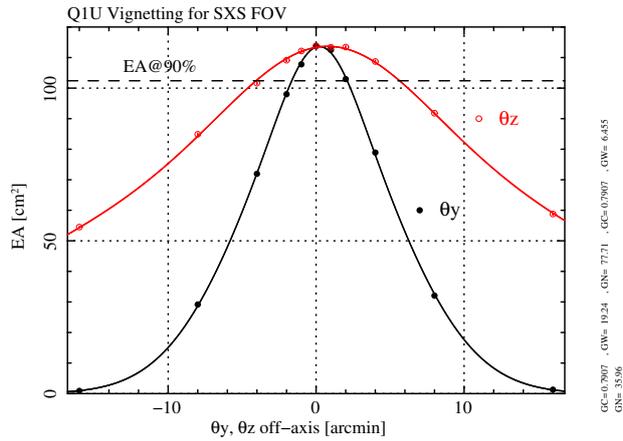


図 6.20: 望遠鏡光軸における Q1 の vignetting。 図 6.21: 望遠鏡光軸における Q2 の vignetting。

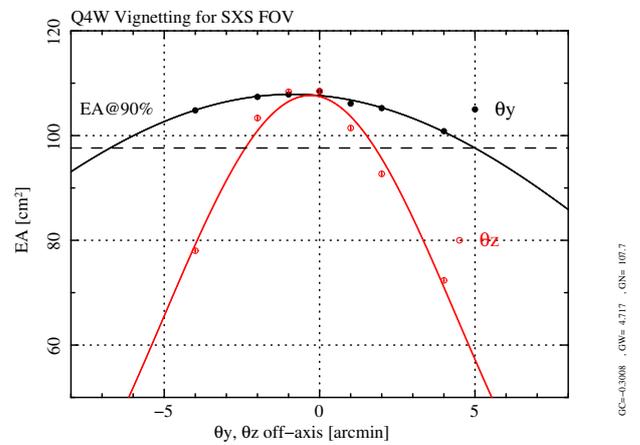
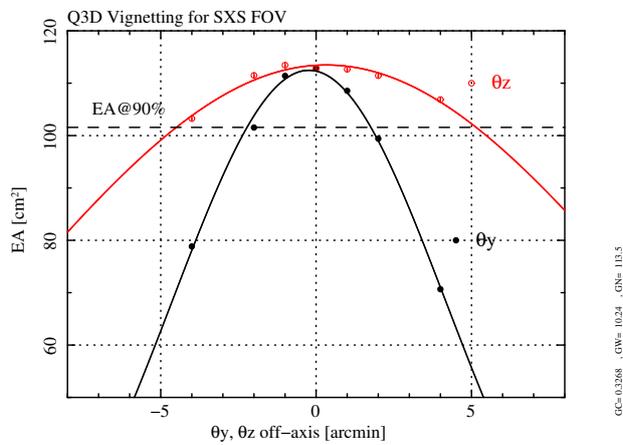


図 6.22: 望遠鏡光軸における Q3 の vignetting。 図 6.23: 望遠鏡光軸における Q4 の vignetting。

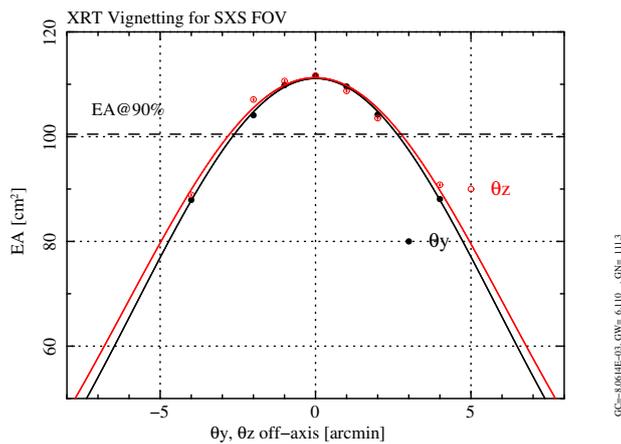


図 6.24: 望遠鏡光軸における望遠鏡全体の vignetting。

6.6 エネルギーの違いによる vignetting の変化

軌道上で複数の天体を同時に観測する場合、天体が放つ X 線は off-axis 角からの入射になる。この場合、本来の天体の flux を見積もるために off-axis 角に対する有効面積の変化をモデル化しておく必要がある。

ここまでは主に Ti-K α での vignetting を行ってきた。これは光軸を探し出すとともに、X 線の入射角度によって有効面積がどのように変化するかを知るためであった。有効面積は入射角のほかにも X 線のエネルギーにも依存しているため、ここでは Al-K α 、Ti-K α 、Cu-K α 、Pt-L α 、Pt-L β 、Pt-L γ の 6 色についての vignetting を行い、エネルギー依存性を見るときともに、off-axis 角に対する有効面積のモデル化を試みる。

6.6.1 測定方法

これまでの vignetting は θ_y, θ_z を独立に振り、 $(\theta_y, \theta_z) = (\pm 2', 0')$ や、 $(0', \pm 4')$ などの測定を行ってきた。しかしこれでは測定点が多くなってしまい、測定時間も考えるとあまり現実的ではない。さらに望遠鏡光軸はすでにわかっているので、斜め 45° 方向に $-1', +1', +2', +4', +8', +16', +24', +32'$ に傾けることで、 θ_y, θ_z の二つのパラメータを一つのパラメータとして vignetting の変化を見ることができる。このとき、測定点は斜め 45° に振るため、 $(\Delta\theta_y, \Delta\theta_z) = (-0.71', -0.71'), (0', 0'), (+0.71', +0.71'), (+1.41', +1.41'), (+2.83', +2.83'), (+5.66', +5.66'), (+11.31', +11.31'), (+16.97', +16.97'), (+22.63', +22.63')$ となることに注意する。図 6.25 斜め 45° vignetting の測定点マップ、図 6.26 に座標軸の定義を示す。これらの vignetting は定量的に評価するため、Lorentzian や Gaussian+Lorentzian でフィットした。しかし Gaussian を入れてもフィット結果に変化はなかったため、Lorentzian でフィットすることにした。また、そのときの FWHM を望遠鏡の視野として定義をすることにする。

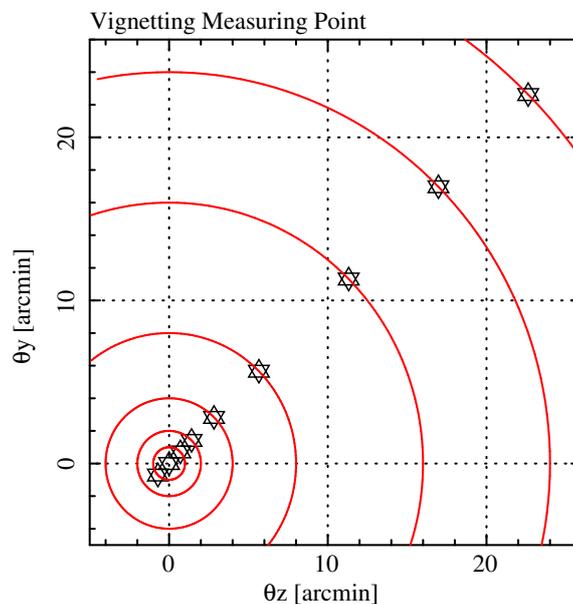


図 6.25: 斜め 45° vignetting の測定点マップ。

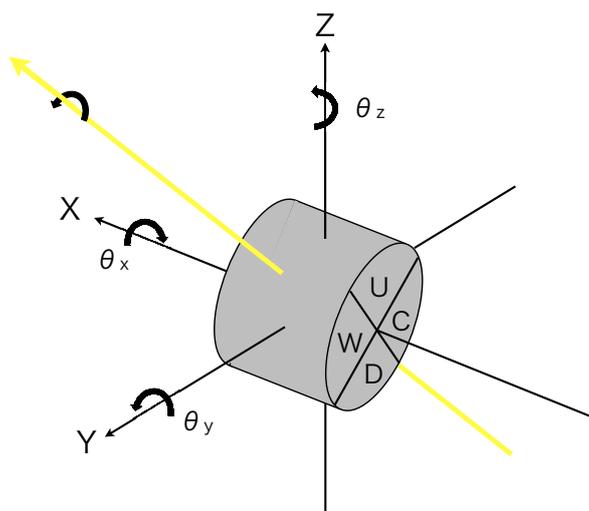


図 6.26: 斜め 45° vignetting の軸の関係。黄色い軸に関して傾ける。

6.6.2 測定結果

図 6.27 ~ 6.32 にエネルギー毎の斜め 45° vignetting の結果を示す。Ti-K α や Cu-K α などのモデルとデータの比は全体的に $\pm 3\%$ 程度に収まっている。しかし Pt-L α や Pt-L β は、大きな off-axis 角においてデータがモデルよりも小さくなる傾向が見られ、Pt-L β などの高エネルギーの off-axis 角 = 32' では、データとモデルの比は 50% ほどになっている。より再現性良くモデルを作るためには、大きな off-axis 角で cut-off を持たせることなどが必要である。

斜め 45 度方向の vignetting 結果について、エネルギー毎 (Al-K α , Ti-K α , Cu-K α , Pt-L α , Pt-L β , Pt-L γ) に比較した。図 6.33 を見ると、エネルギーが高くなるにしたがって有効面積が小さくなっているのがわかる。一方、図 6.34 を見ると、エネルギーが高くなるにしたがって視野 (FWHM) が狭くなっているのがわかる。これは高エネルギーほど望遠鏡の内側でしか反射されず、実質的な口径が小さくなったためと考えられる。表 6.13 に望遠鏡の視野を示す。

表 6.12: 測定条件。

Config.	Q1U
Target	Al-K α , Ti-K α , Cu-K α , Pt-L α , Pt-L β , Pt-L γ
Slit size	2 × 2 mm
Pitch	4 mm pitch
Measure Point ($\Delta\theta_y, \Delta\theta_z$)	(-0.71', -0.71'), (0', 0'), (+0.71', +0.71'), (+1.41', +1.41'), (+2.83', +2.83'), (+5.66', +5.66'), (+11.31', +11.31'), (+16.97', +16.97'), (+22.63', +22.63')
FL	5600 mm
Detector	P.C.

6.6 エネルギーの違いによる vignetting の変化

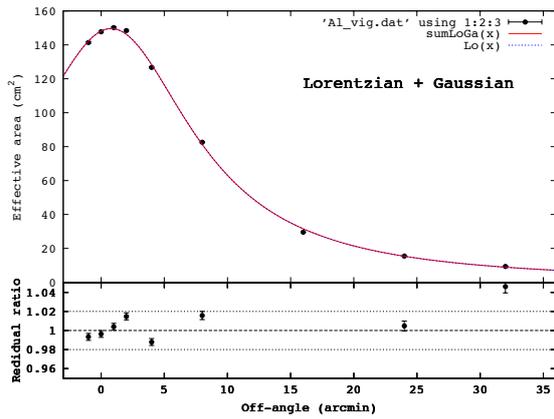


図 6.27: Al-K α の有効面積角度依存性。

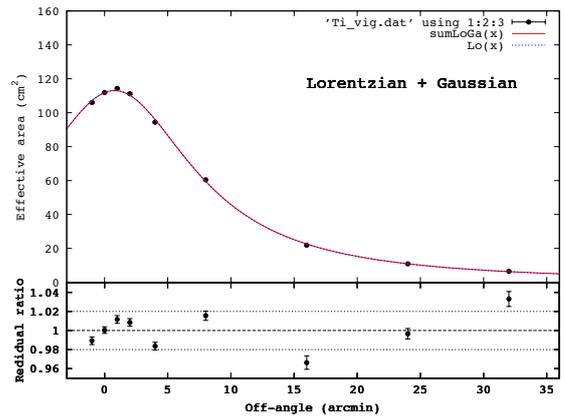


図 6.28: Ti-K α の有効面積角度依存性。

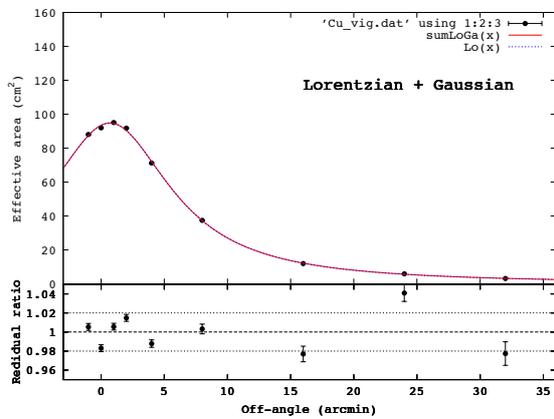


図 6.29: Cu-K α の有効面積角度依存性。

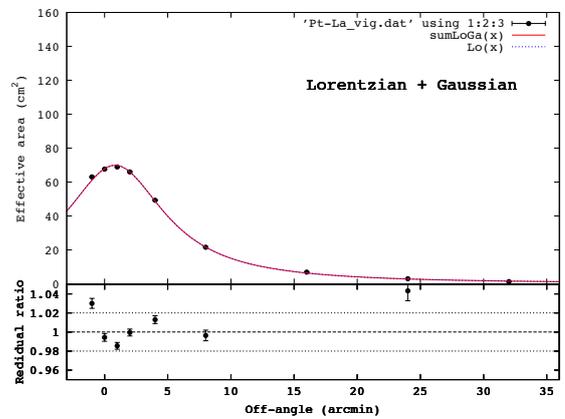


図 6.30: Pt-L α の有効面積角度依存性。

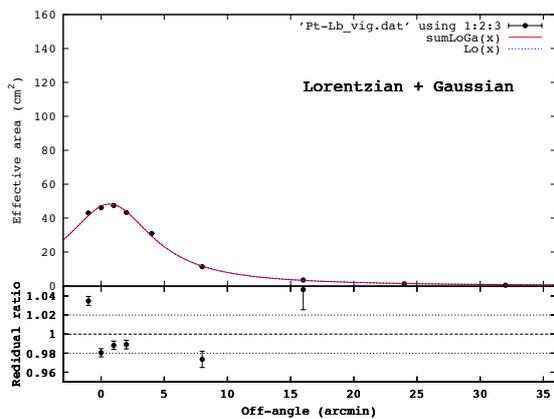


図 6.31: Pt-L β の有効面積角度依存性。

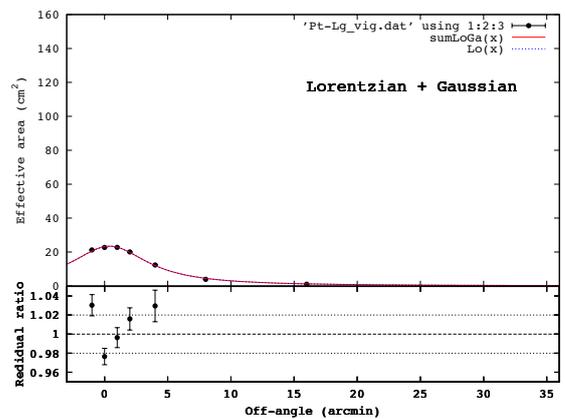


図 6.32: Pt-L γ の有効面積角度依存性。

6.6 エネルギーの違いによる vignetting の変化

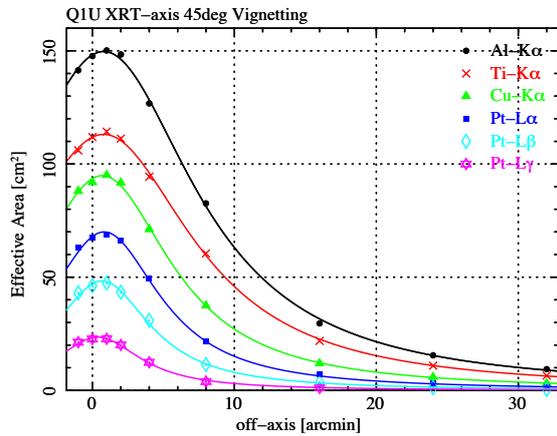


図 6.33: 多色での比較。スケールは liner。

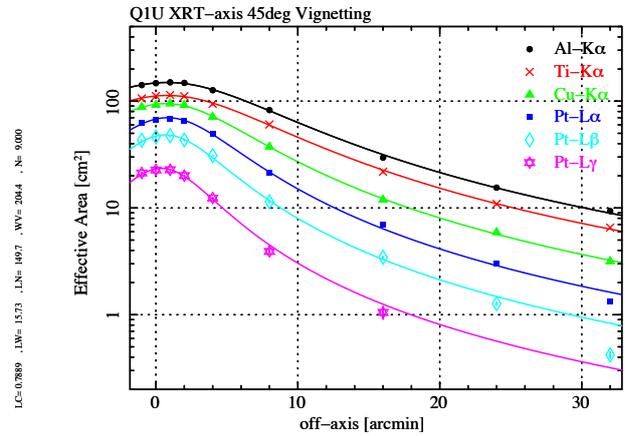


図 6.34: 多色での比較。スケールは log。

表 6.13: エネルギー毎の望遠鏡光軸と視野。

Taget	望遠鏡光軸	視野 (LW=FWHM)
Al-K α	0.78' \pm 0.03'	15.73' \pm 0.04'
Ti-K α	0.80' \pm 0.03'	15.21' \pm 0.05'
Cu-K α	0.69' \pm 0.02'	11.76' \pm 0.04'
Pt-L α	0.82' \pm 0.02'	9.61' \pm 0.03'
Pt-L β	0.67' \pm 0.02'	8.29' \pm 0.04'
Pt-L γ	0.38' \pm 0.04'	7.42' \pm 0.12'

表 6.14: 斜め vignetting の Lorentzian によるフィット結果。

Taget	望遠鏡光軸	視野 (LW=FWHM)
Al-K α	0.78' \pm 0.03'	15.73' \pm 0.04'
Ti-K α	0.80' \pm 0.03'	15.21' \pm 0.05'
Cu-K α	0.69' \pm 0.02'	11.76' \pm 0.04'
Pt-L α	0.82' \pm 0.02'	9.61' \pm 0.03'
Pt-L β	0.67' \pm 0.02'	8.29' \pm 0.04'
Pt-L γ	0.38' \pm 0.04'	7.42' \pm 0.12'

6.7 焦点距離

可視光による焦点距離測定では、どの Quadrant も設計値から ± 10 mm 以内に収まっている結果を得た。ここでは X 線による焦点距離を LR 法と HPD 法の二つの観点から求めた。

HPD 法

X 線望遠鏡の性能評価である結像性能は、HPD(Half Power Diameter) というパラメータを使って評価する。HPD は X 線望遠鏡が集光するイメージの広がりの中で、焦点距離より短い(長い)位置で HPD を求めると、イメージのコアは広がり、HPD はより大きくなる。これを利用した解析方法が HPD 法というもので、横軸に焦点距離からのずれ、縦軸に HPD をプロットする。HPD はベストな焦点距離において最も小さくなるため、その点を境にして増加する。この性質を利用して、二次関数でモデルフィットすることで最小の HPD が分かる。

6.7.1 測定方法

SXT の焦点距離の設計値は 5600 mm となっており、チャンバーに入れる際は検出器と SXT 間の距離が 5600 mm になるように設置してある。この位置を原点として、検出器ステージを $\Delta FL = 0$ mm, ± 20 mm, ± 40 mm の計 5 カ所でイメージを取得し、LR 法(図 5.37)と HPD 法によって焦点距離を算出した。

6.7.2 測定結果

図 6.35 ~ 6.38 に焦点距離を変えたときのイメージ、図 6.39 ~ 6.42 に LR 法による解析結果、図 6.43 ~ 6.46 に HPD 法による解析結果をまとめる。LR 法と HPD 法での焦点距離の比較ではおよそ ± 2 mm で一致したが、Q3 は他と比べて大きくずれていた。また、可視光測定時の焦点距離と比べて 10 mm 程短くなる結果となったが、Q4 は逆に数ミリ長くなる結果となった。図 6.47 表 6.16 に焦点距離の結果を示す。

表 6.15: 測定条件。

Config.	Q1U, $(\theta_y, \theta_z) = (-181'', -143'')$
Target	Ti-K α
Slit size	2 \times 2 mm
Pitch	4 mm pitch
ΔFL	± 40 mm, ± 20 mm, 0 mm
Detector	X 線 CCD カメラ

6.7 焦点距離

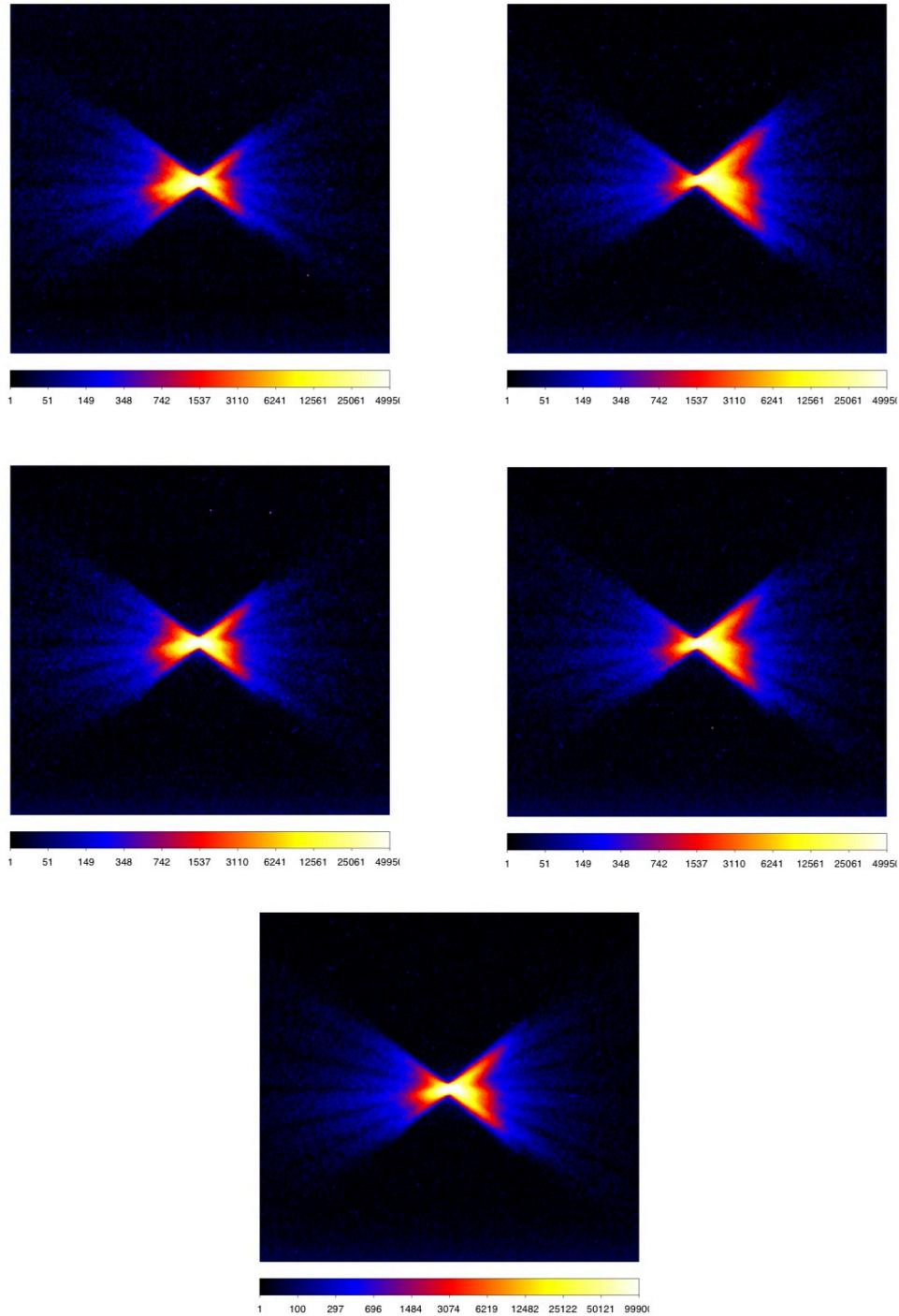


図 6.35: Q1U の焦点距離イメージ。左上 : $\Delta FL - 40$ mm、真ん中左 : $\Delta FL - 20$ mm、下 : $\Delta FL 0$ mm、真ん中右 : $\Delta FL + 20$ mm、右上 : $\Delta FL + 40$ mm

6.7 焦点距離

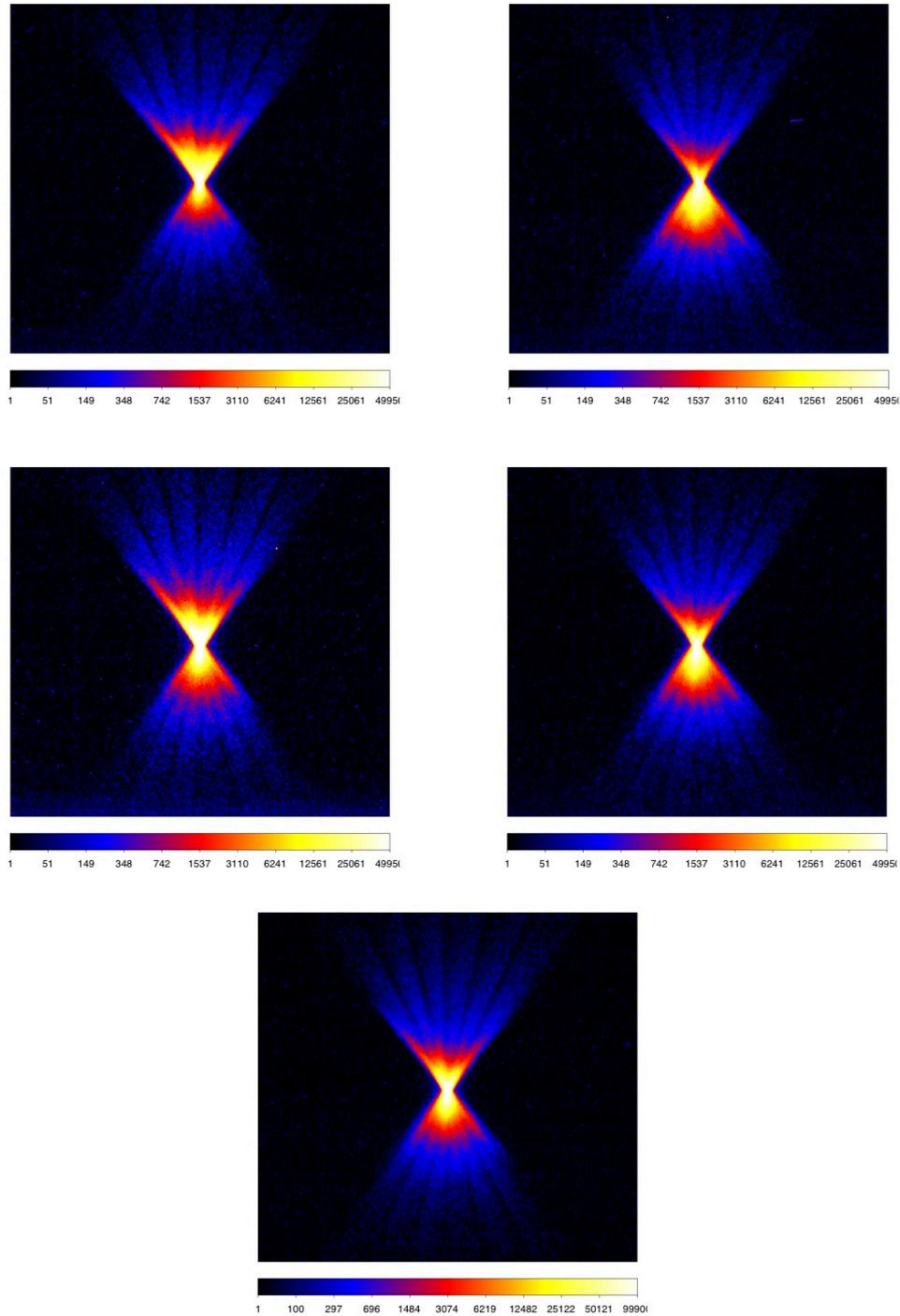


図 6.36: Q2C の焦点距離イメージ。左上 : $\Delta FL - 40$ mm、真ん中左 : $\Delta FL - 20$ mm、下 : $\Delta FL 0$ mm、真ん中右 : $\Delta FL + 20$ mm、右上 : $\Delta FL + 40$ mm

6.7 焦点距離

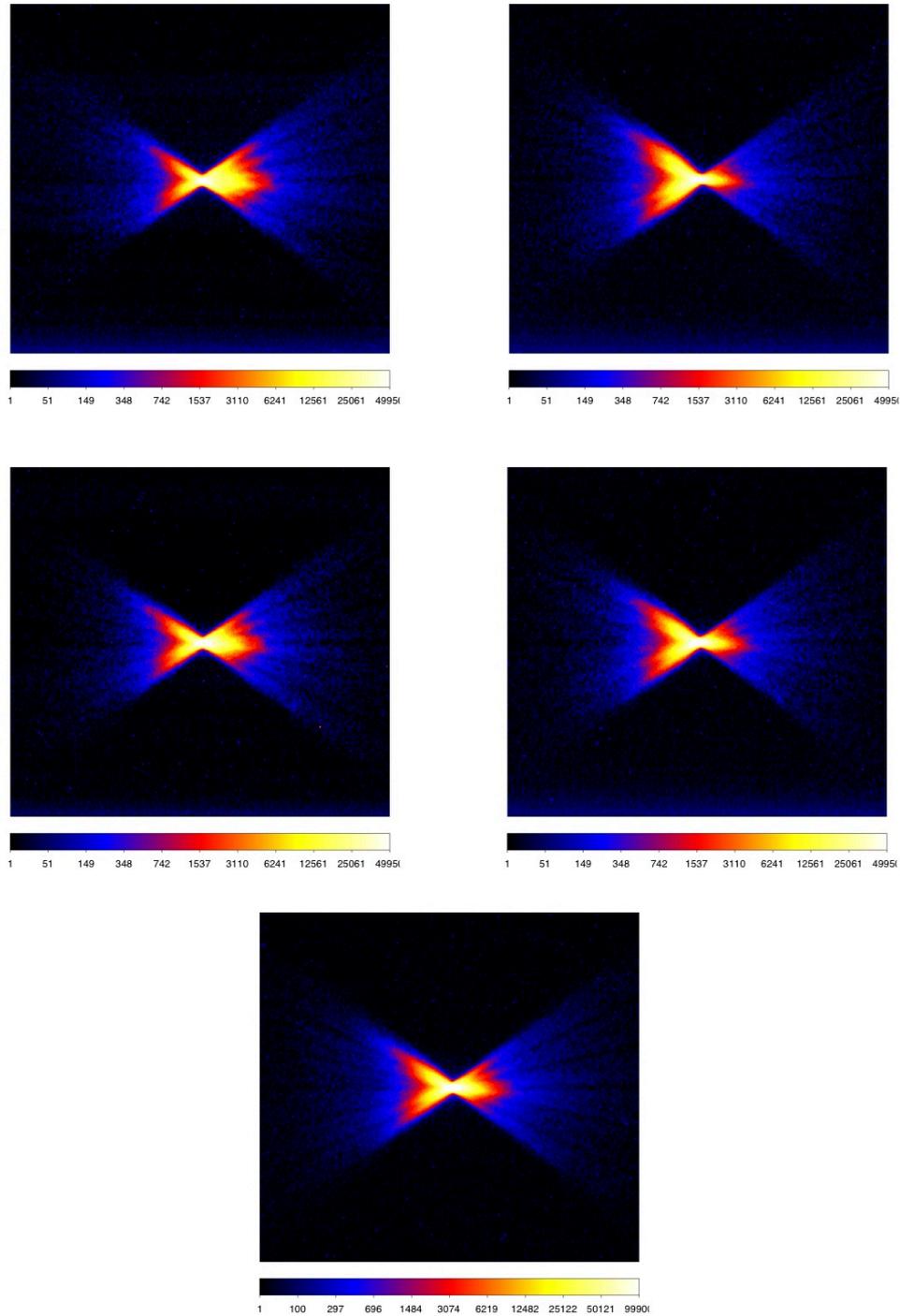


図 6.37: Q3D の焦点距離イメージ。左上: $\Delta FL - 40$ mm、真ん中左: $\Delta FL - 20$ mm、下: $\Delta FL 0$ mm、真ん中右: $\Delta FL + 20$ mm、右上: $\Delta FL + 40$ mm

6.7 焦点距離

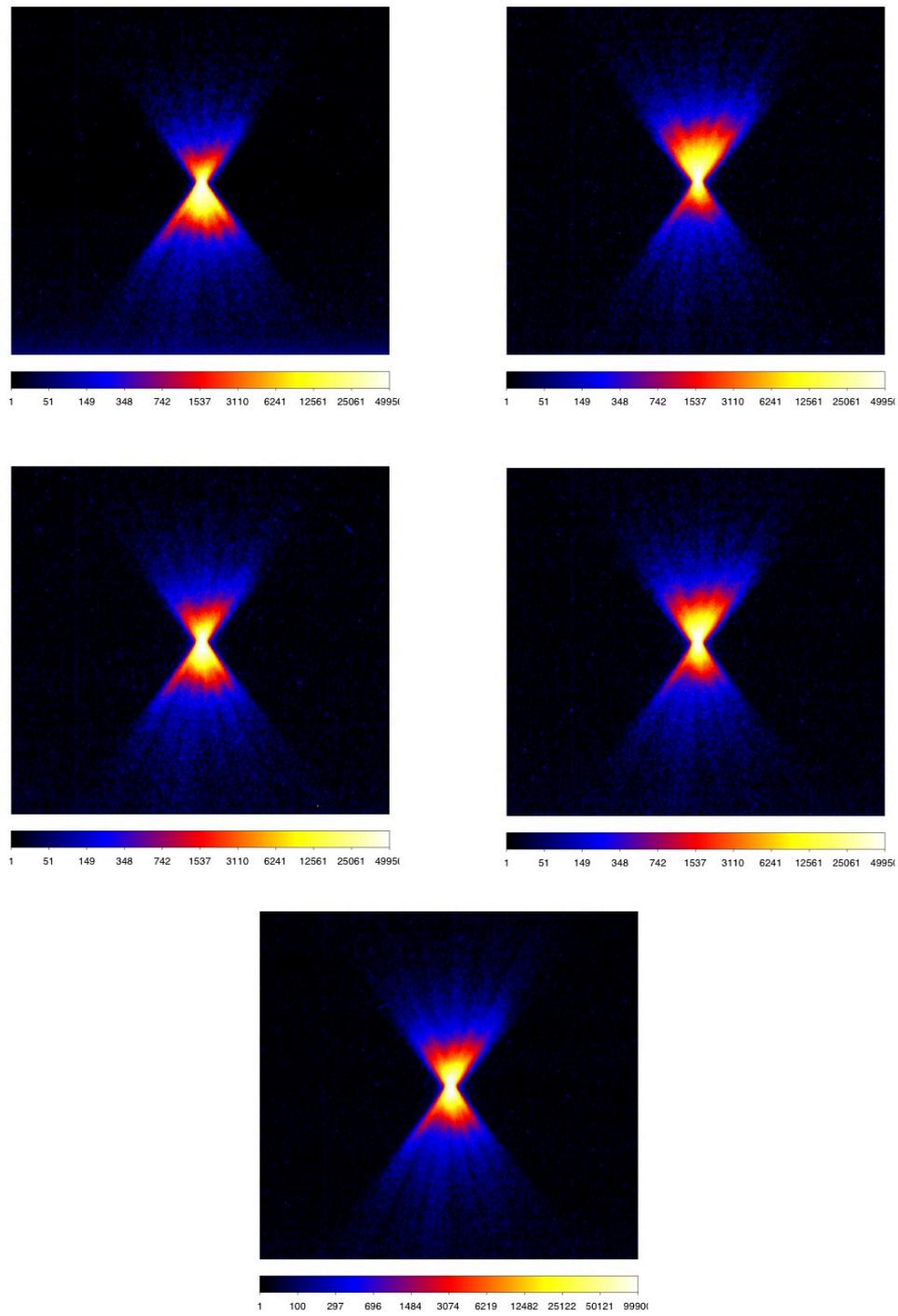


図 6.38: Q4W の焦点距離イメージ。左上 : $\Delta FL - 40$ mm、真ん中左 : $\Delta FL - 20$ mm、下 : $\Delta FL 0$ mm、真ん中右 : $\Delta FL + 20$ mm、右上 : $\Delta FL + 40$ mm

6.7 焦点距離

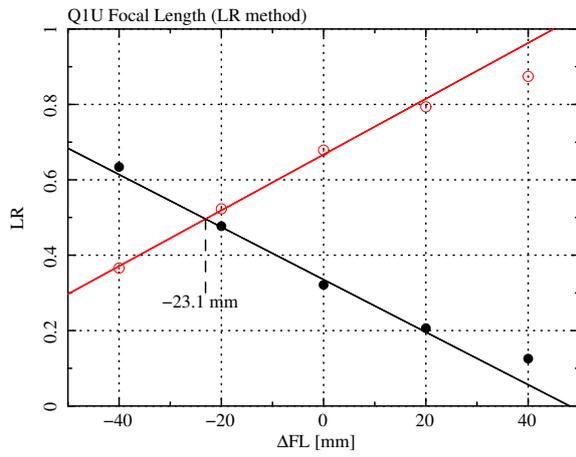


図 6.39: Q1 における LR 法。

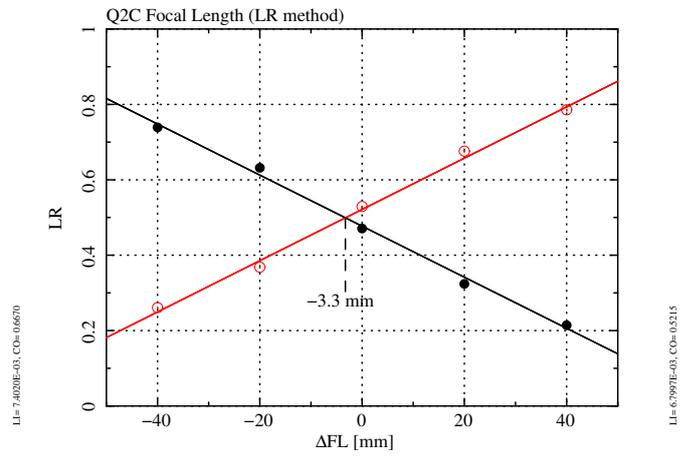


図 6.40: Q2 における LR 法。

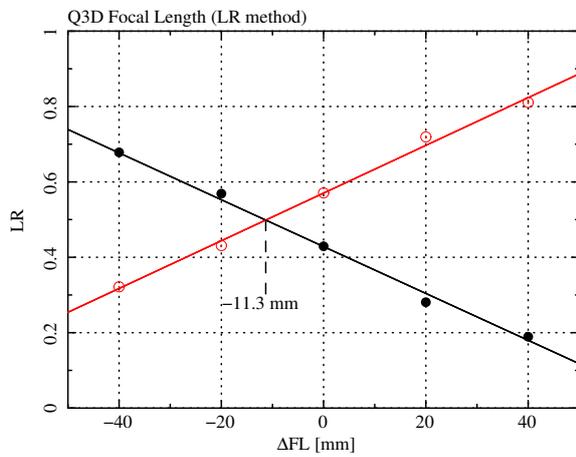


図 6.41: Q3 における LR 法。

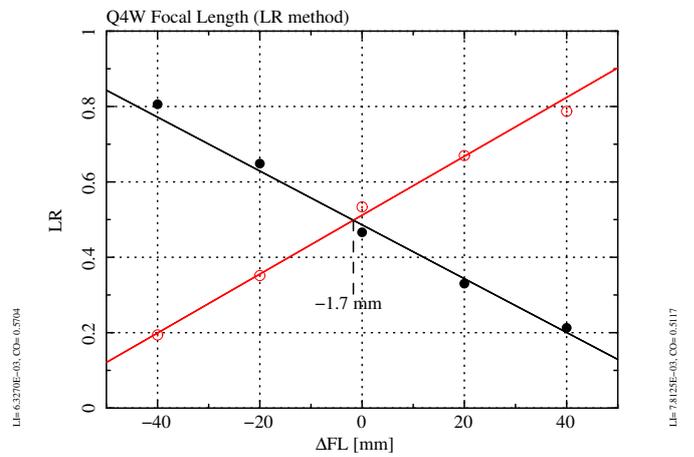


図 6.42: Q4 における LR 法。

6.7 焦点距離

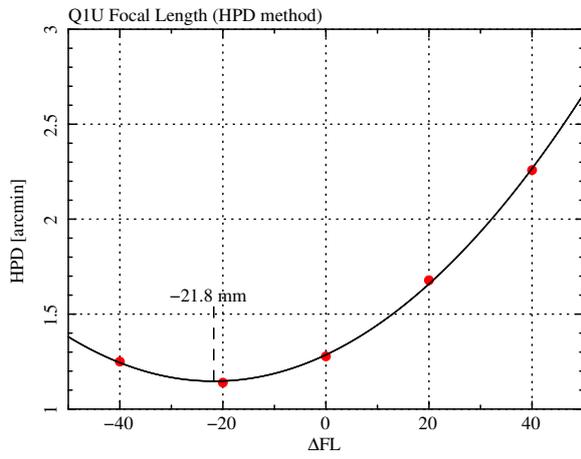


図 6.43: Q1 における HPD 法。

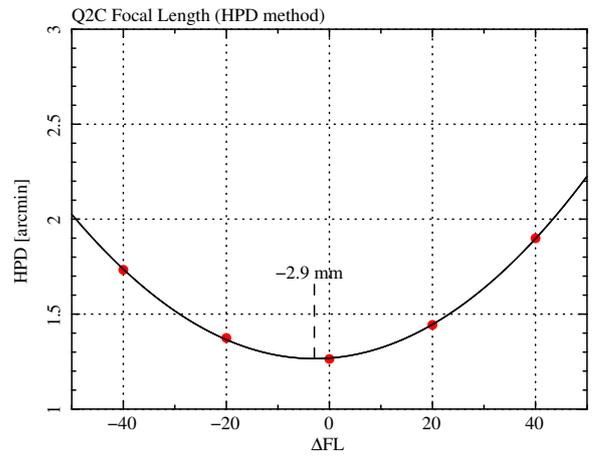


図 6.44: Q2 における HPD 法。

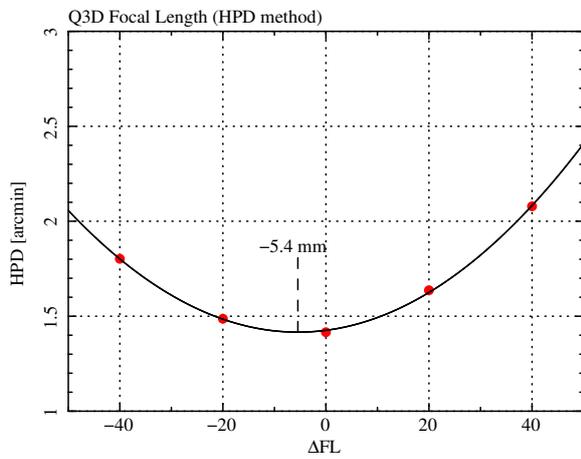


図 6.45: Q3 における HPD 法。

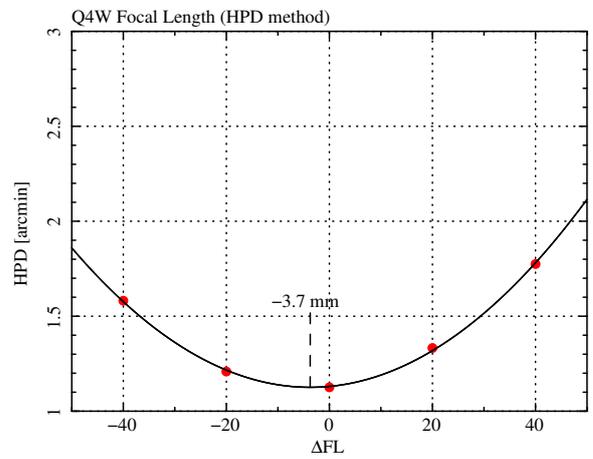


図 6.46: Q4 における HPD 法。

6.7 焦点距離

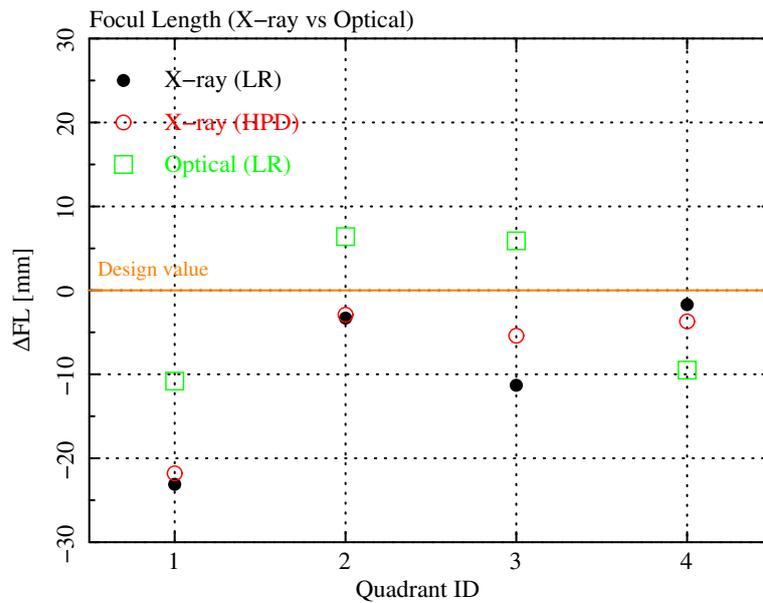


図 6.47: X 線 (LR 法&HPD 法) と可視光による焦点距離の比較。縦軸は設計値からのずれを表す。

	Q1U	Q2C	Q3D	Q4W
LR 法	-23.1 mm	-3.3 mm	-11.3 mm	-1.7 mm
HPD 法	-21.8 mm	-2.9 mm	-5.4 mm	-3.7 mm
可視光 (LR 法)	-10.8 mm	+6.4 mm	+5.9 mm	-9.5 mm

表 6.16: LR 法と HPD 法による焦点距離の結果。

6.8 結像性能

X線望遠鏡の結像性能の評価方法では、HPD (Half Power Diameter) という指標がしばしば用いられる。HPD はイメージの広がりを角度で表しており、この値が小さい程結像性能が良いと言える。イメージの広がりの要因は X 線望遠鏡の構造に起因しており、主に円錐近似、反射鏡面の形状誤差、反射鏡の位置決め誤差が支配的になっている。また、X 線のエネルギーが大きくなるほど反射率は下がり臨界角も小さくなるため、望遠鏡の内側の反射鏡でのみ反射する。この章では実際に望遠鏡のイメージを取得することによって HPD を算出し、6 種類のエネルギーを使って結像性能を評価する。

6.8.1 測定方法

第 6.3 章では X 線による望遠鏡光軸を求めた。この光軸に望遠鏡を置き、各 Quadrant 毎にラスタースキャンを行ってイメージを取得した。Configuration は Q1U で、スリットサイズは 2×2 mm、ピッチは 4 mm pitch である。エネルギーは Al-K α (1.49 keV)、Ti-K α (4.51 keV)、Cu-K α (8.04 keV)、Pt-L α (9.44 keV)、Pt-L β (11.07 keV)、Pt-L γ (12.94 keV) の 6 種類にてイメージを取得した。測定パターンは Quadrant4 つ \times エネルギー 6 種類 = 24 通りとなっている。

6.8.2 測定結果

図 6.48 ~ 6.77 に結像性能の測定結果をまとめる。Quadrant4 つのイメージを合成した望遠鏡全体の HPD は平均で 1.3 分角程度となり、要求値である 1.7 分角を十分満たしていることがわかった。しかし Quadrant 毎にみると、Q3 が高エネルギーになるにしたがって HPD が悪化していくのがわかった。これは望遠鏡の内側の反射鏡の形状や位置決め、Quadrant を組み上げるときの位置決めが悪化の原因であることを示唆している。望遠鏡全体の HPD も高エネルギーになるに従って悪化しており、Q3 に起因するものと推測される。図 6.78、表 6.18 に Quadrant 毎の HPD の変化を示す。

表 6.17: 測定条件。

Config.	Q1U, $(\theta_y, \theta_z) = (-181'', -143'')$
Energy	Al-K α , Ti-K α , Cu-K α , Pt-L α , Pt-L β , Pt-L γ
Slit size	2×2 mm
Pitch	4 mm pitch
FL	5600 mm
Detector	X 線 CCD カメラ

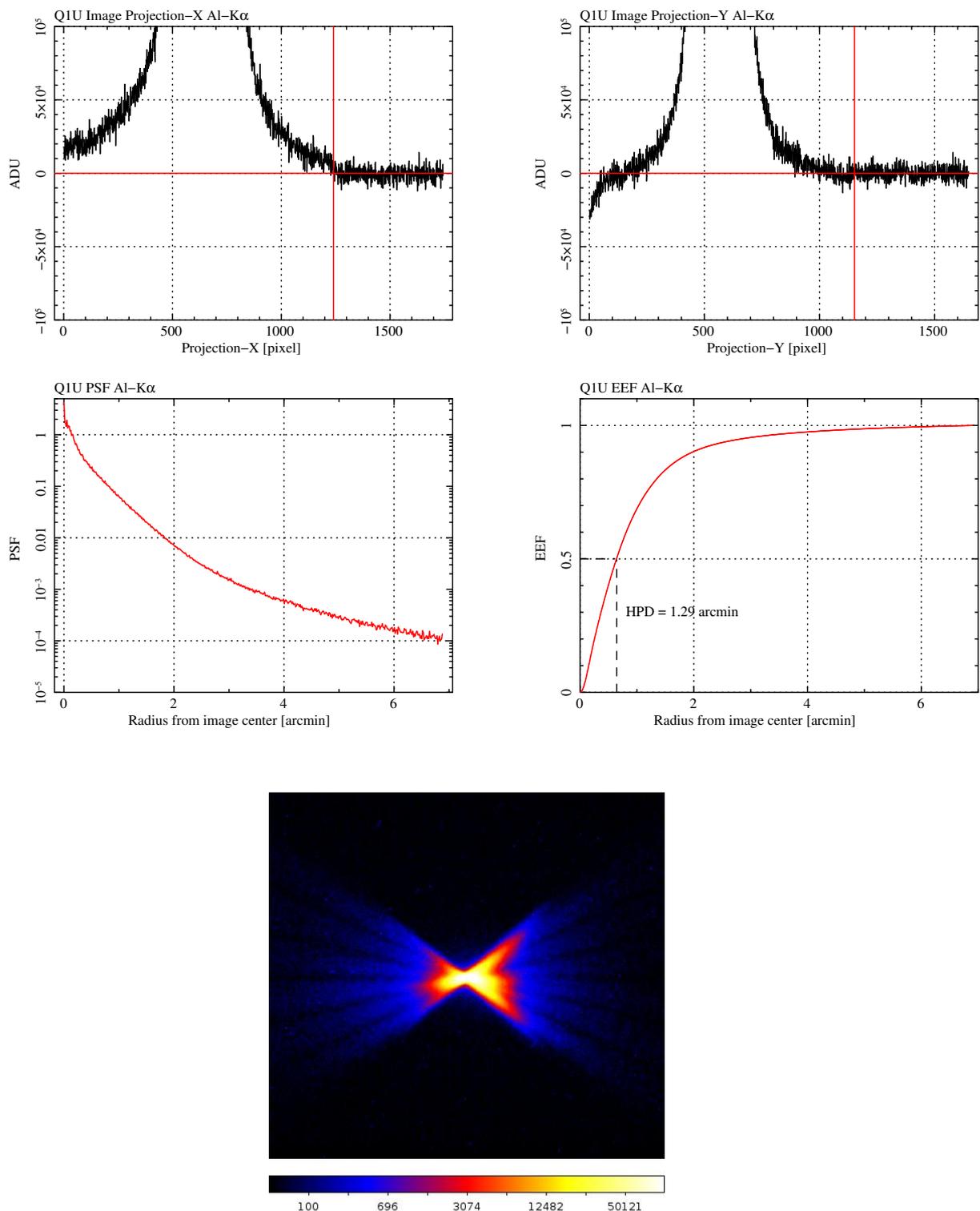
Q1 Al-K α 

図 6.48: Al-K α における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

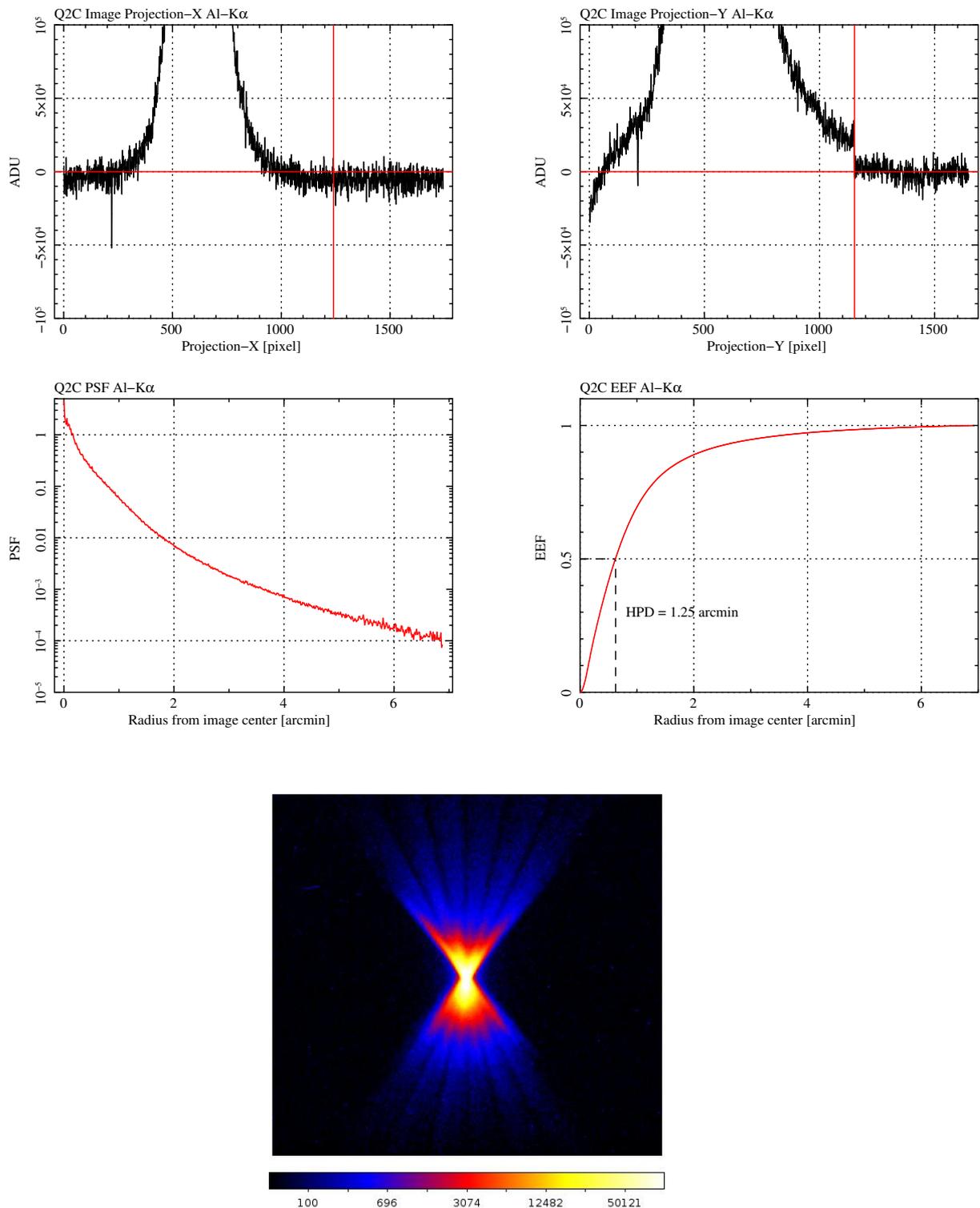
Q2 Al-K α 

図 6.49: Al-K α における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

Q3 Al-K α

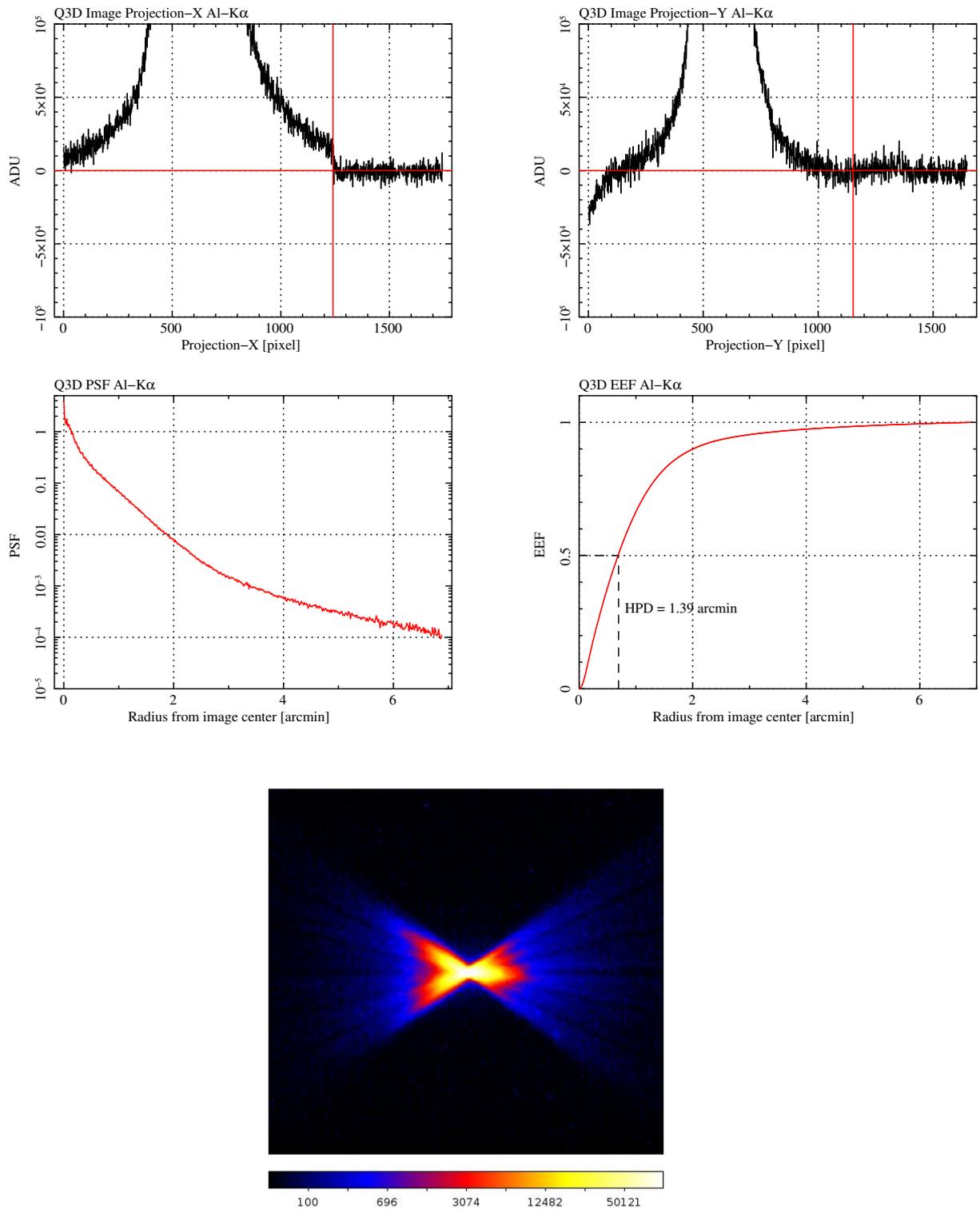


図 6.50: Al-K α における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

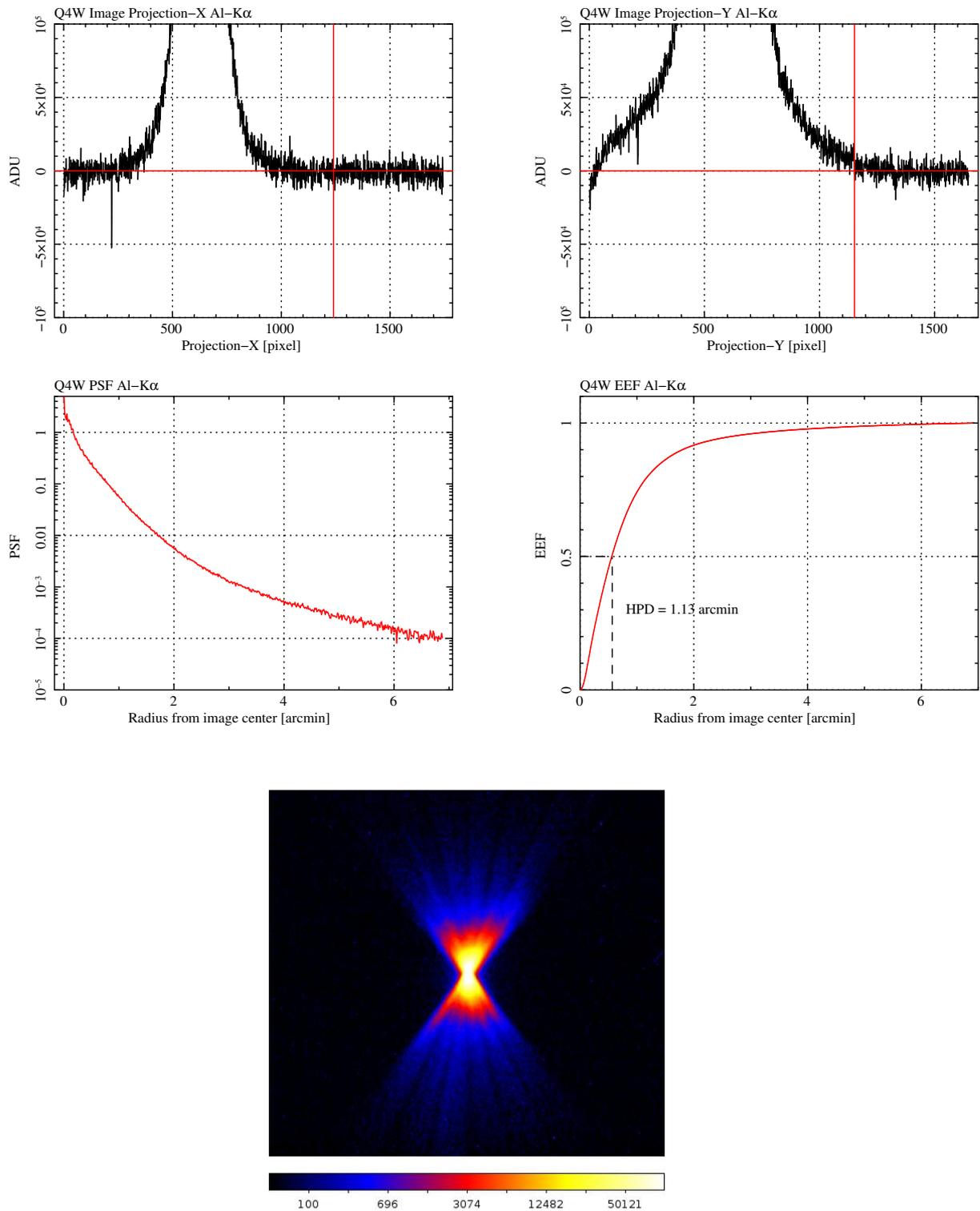
Q4 Al-K α 

図 6.51: Al-K α における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

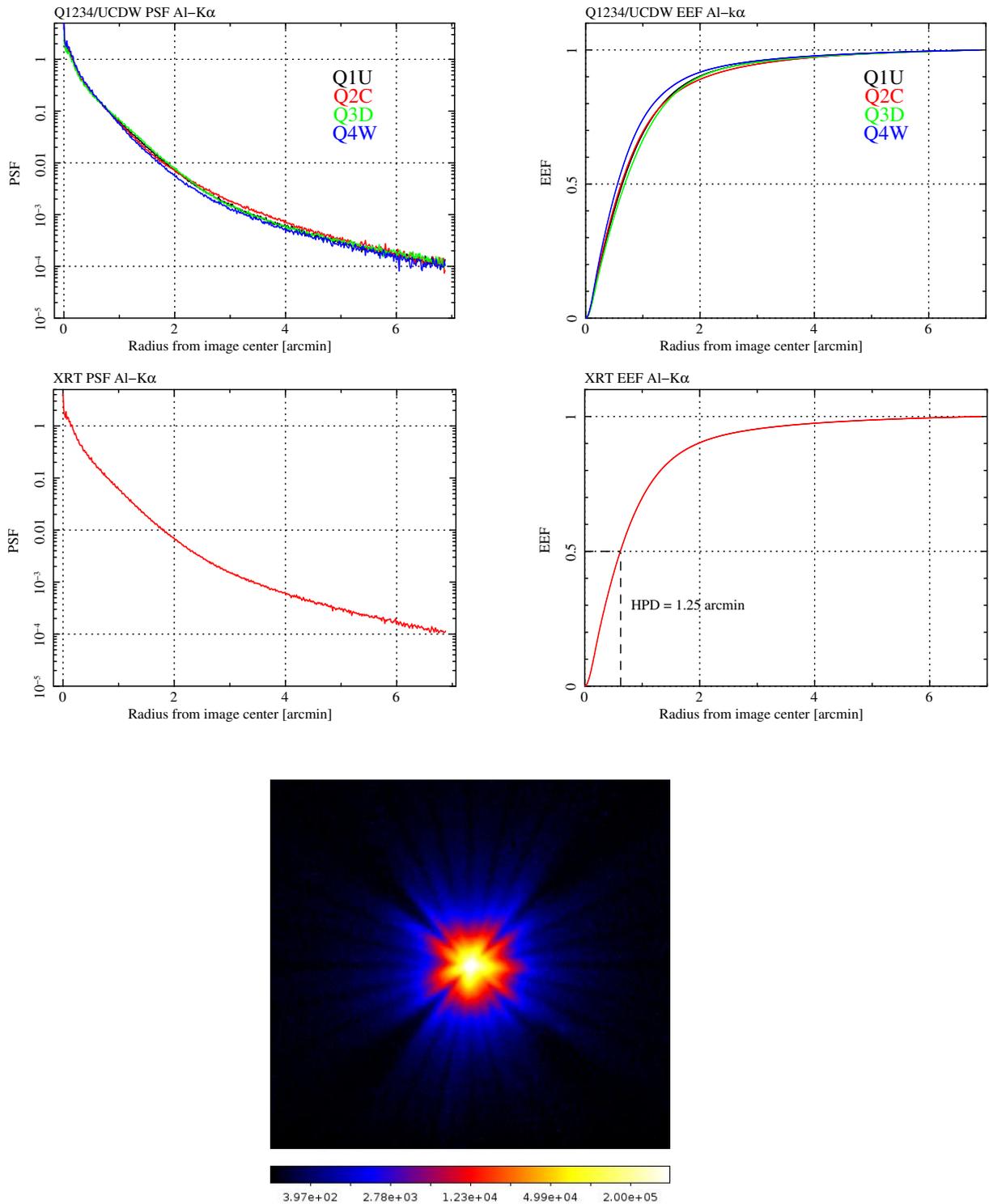
XRT Al-K α 

図 6.52: Al-K α における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上: Quadrant 毎の PSF の比較、右上: Quadrant 毎の EEF の比較、中央左: XRT の PSF、中央右: XRT の EEF、下: XRT のイメージ。

Q1 Ti-K α

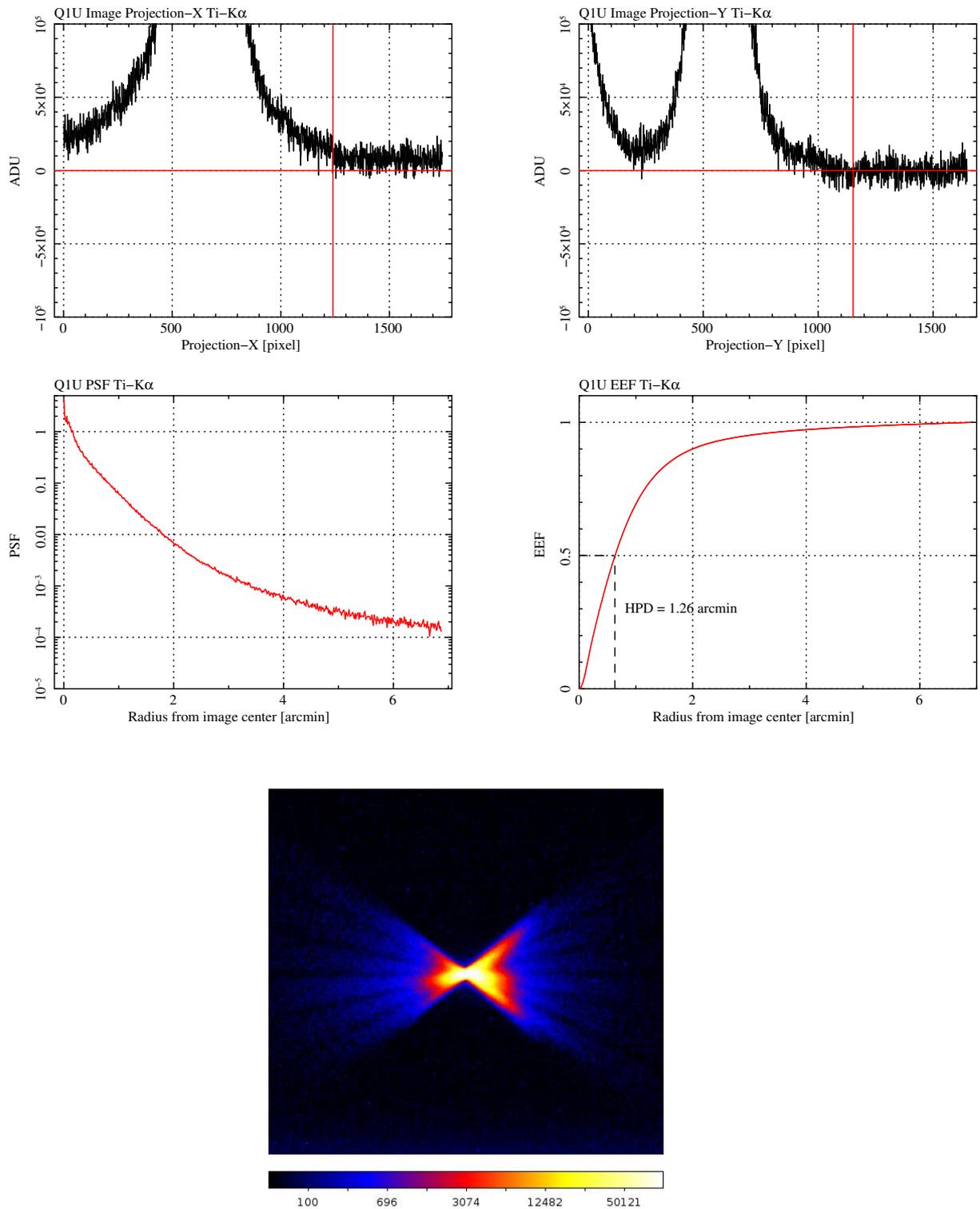


図 6.53: Ti-K α における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

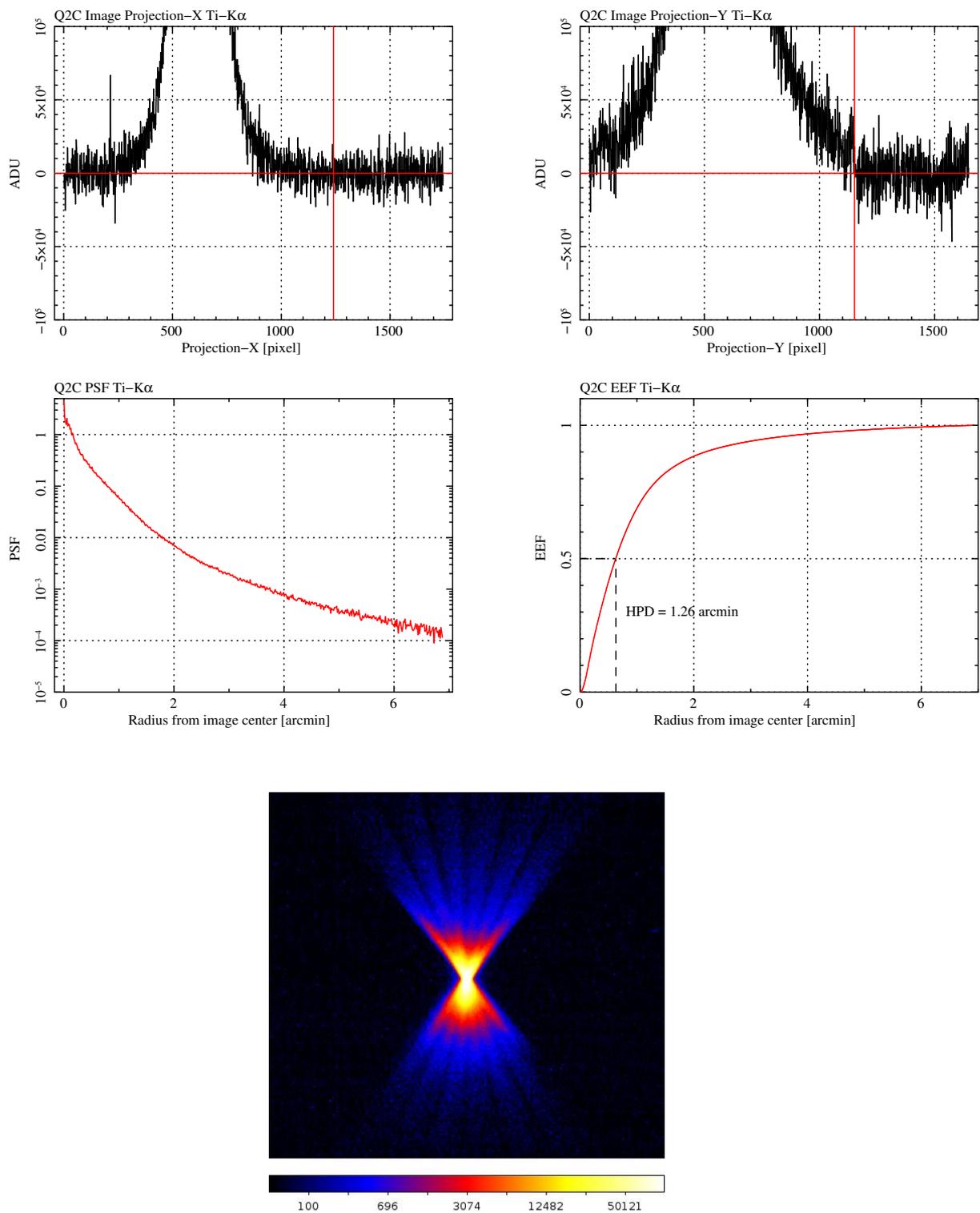
Q2 Ti-K α 

図 6.54: Ti-K α における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

Q3 Ti-K α

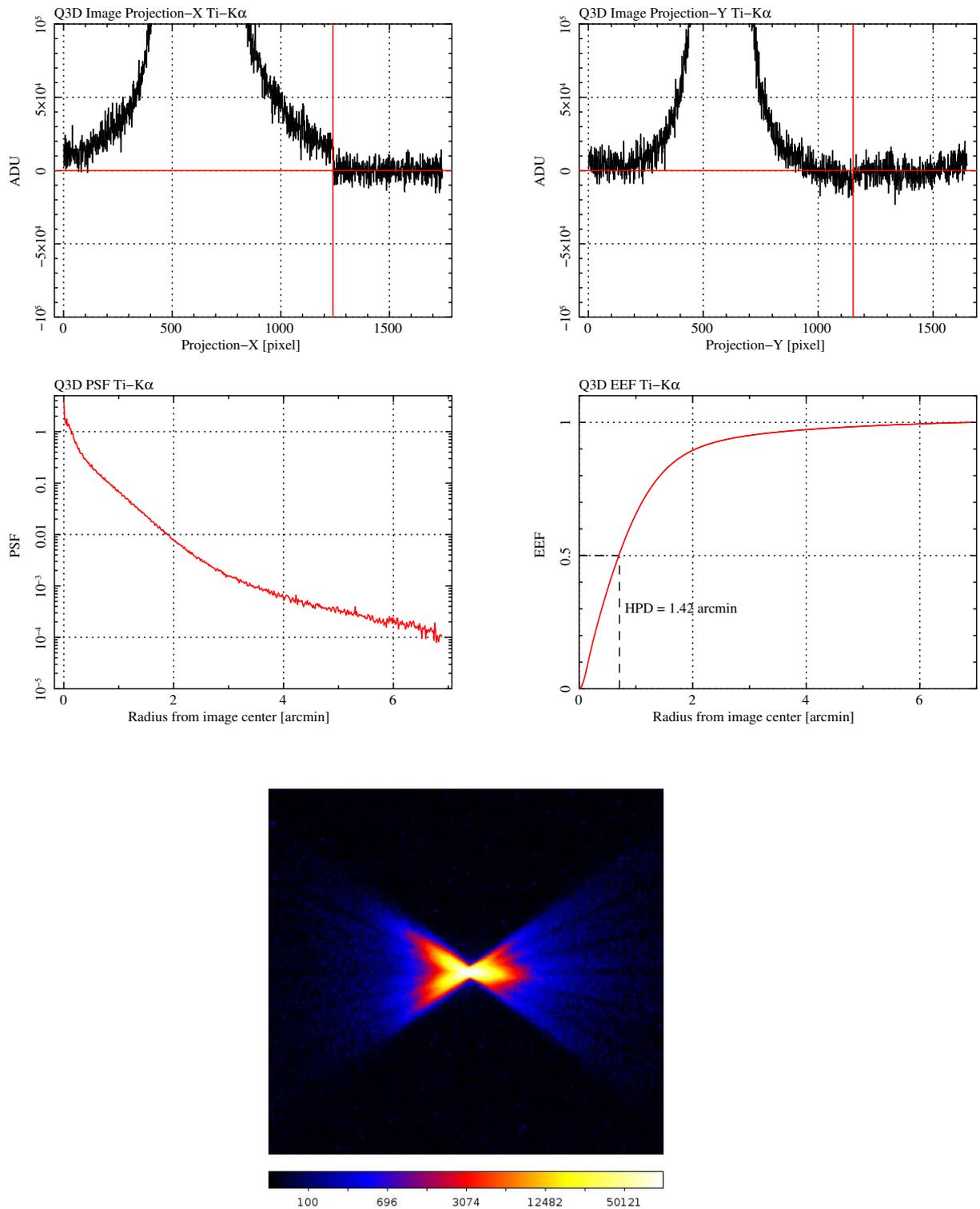


図 6.55: Ti-K α における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

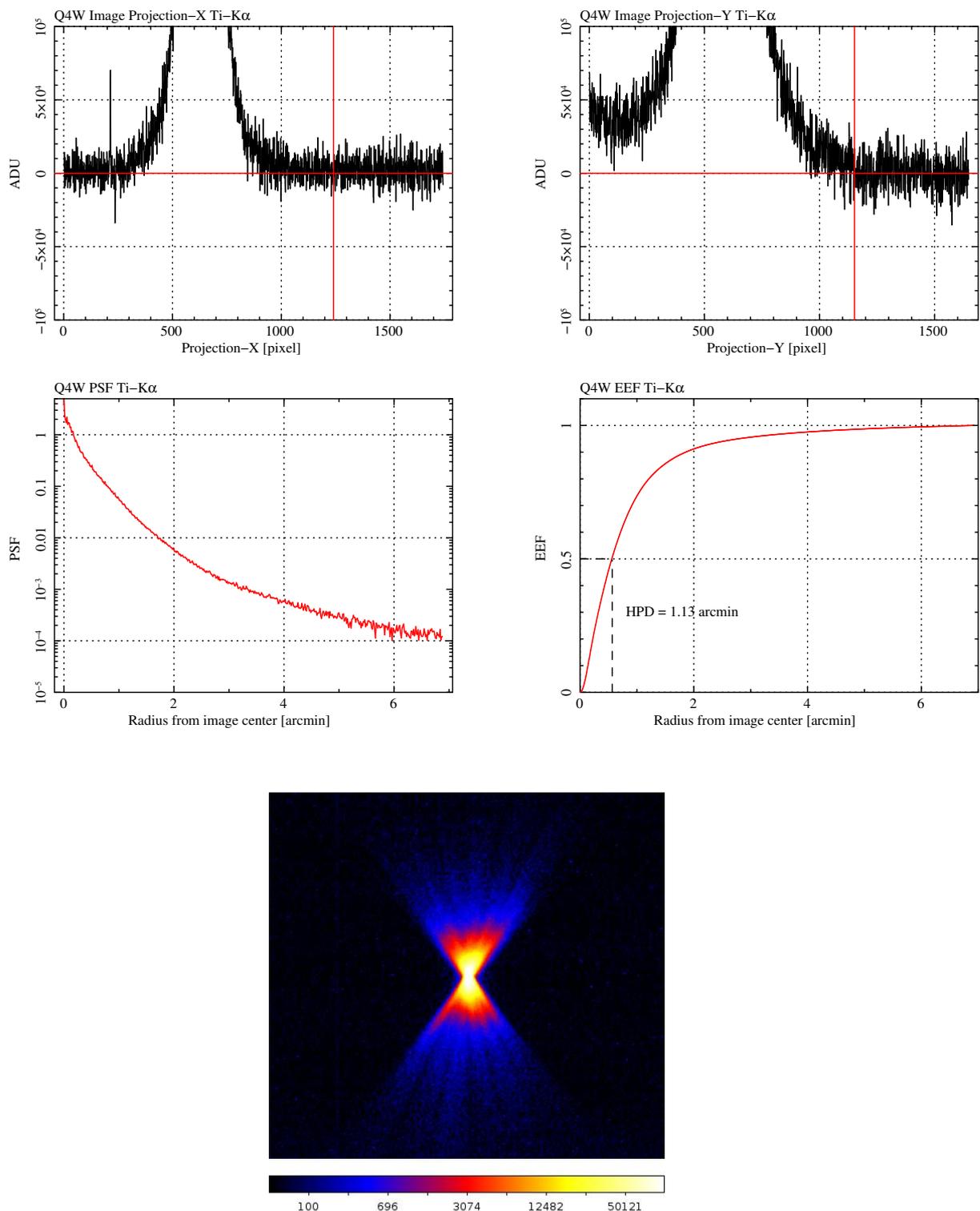
Q4 Ti-K α 

図 6.56: Ti-K α における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

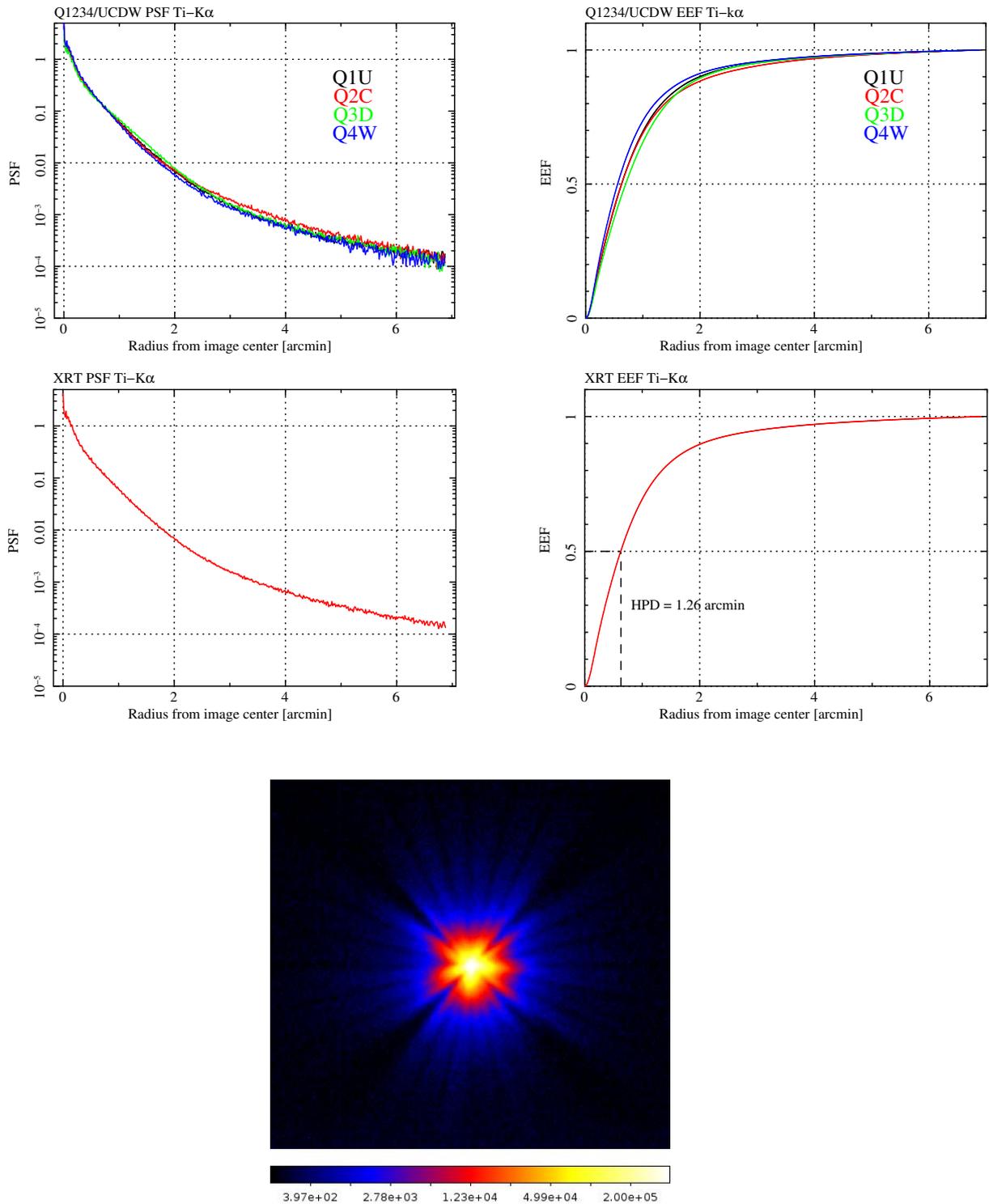
XRT Ti-K α 

図 6.57: Ti-K α における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上: Quadrant 毎の PSF の比較、右上: Quadrant 毎の EEF の比較、中央左: XRT の PSF、中央右: XRT の EEF、下: XRT のイメージ。

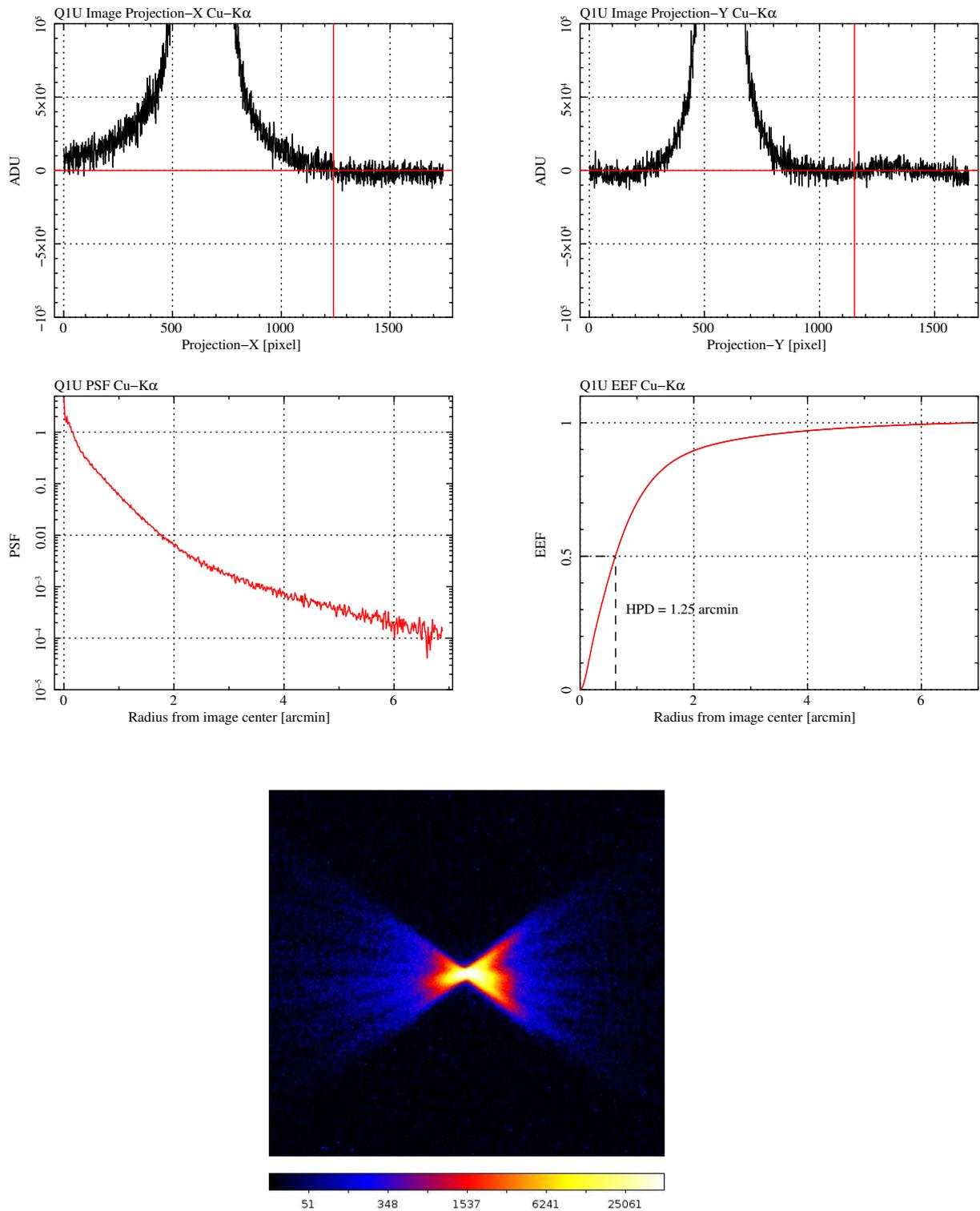
Q1 Cu-K α 

図 6.58: Cu-K α における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

Q2 Cu-K α

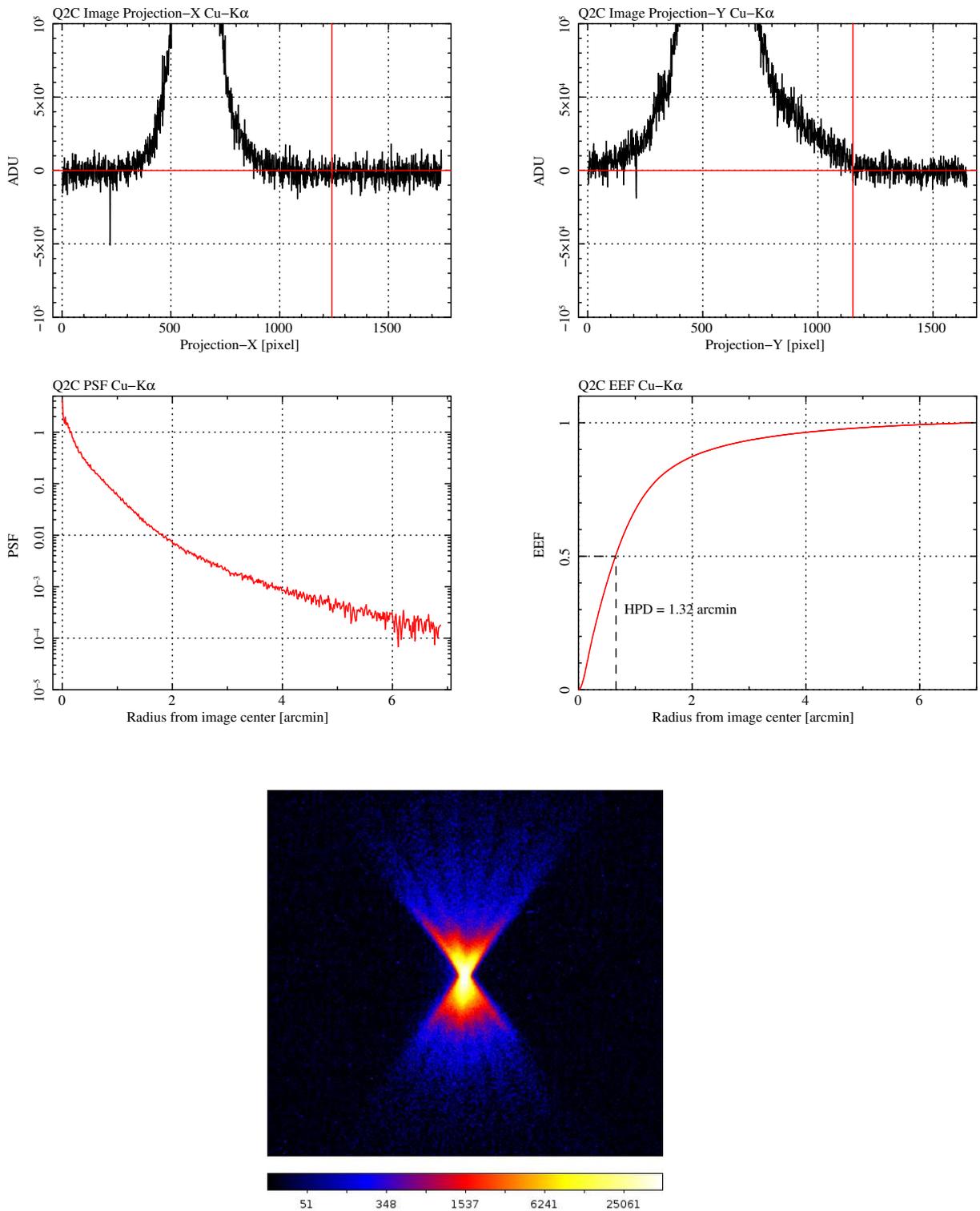


図 6.59: Cu-K α における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

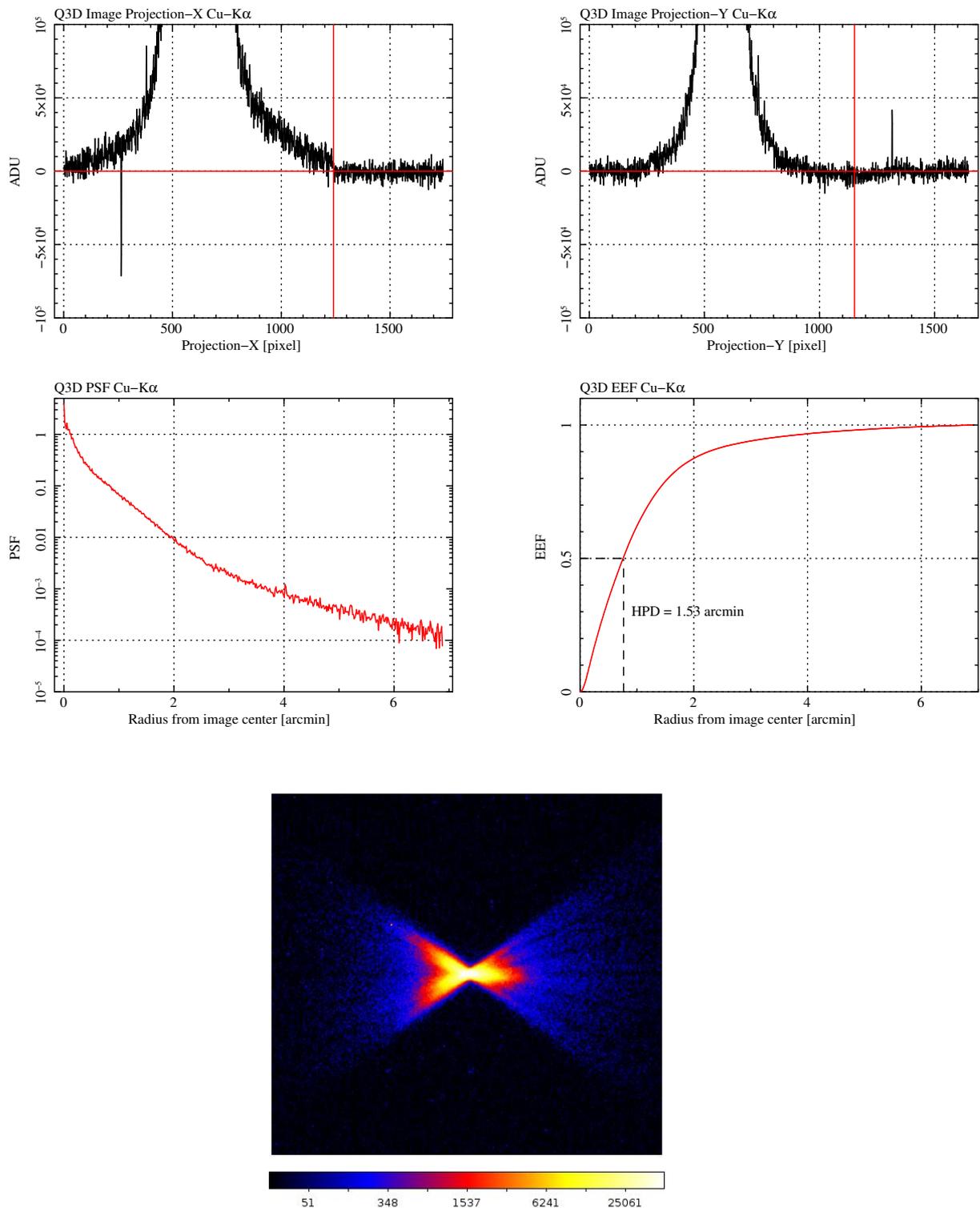
Q3 Cu-K α 

図 6.60: Cu-K α における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

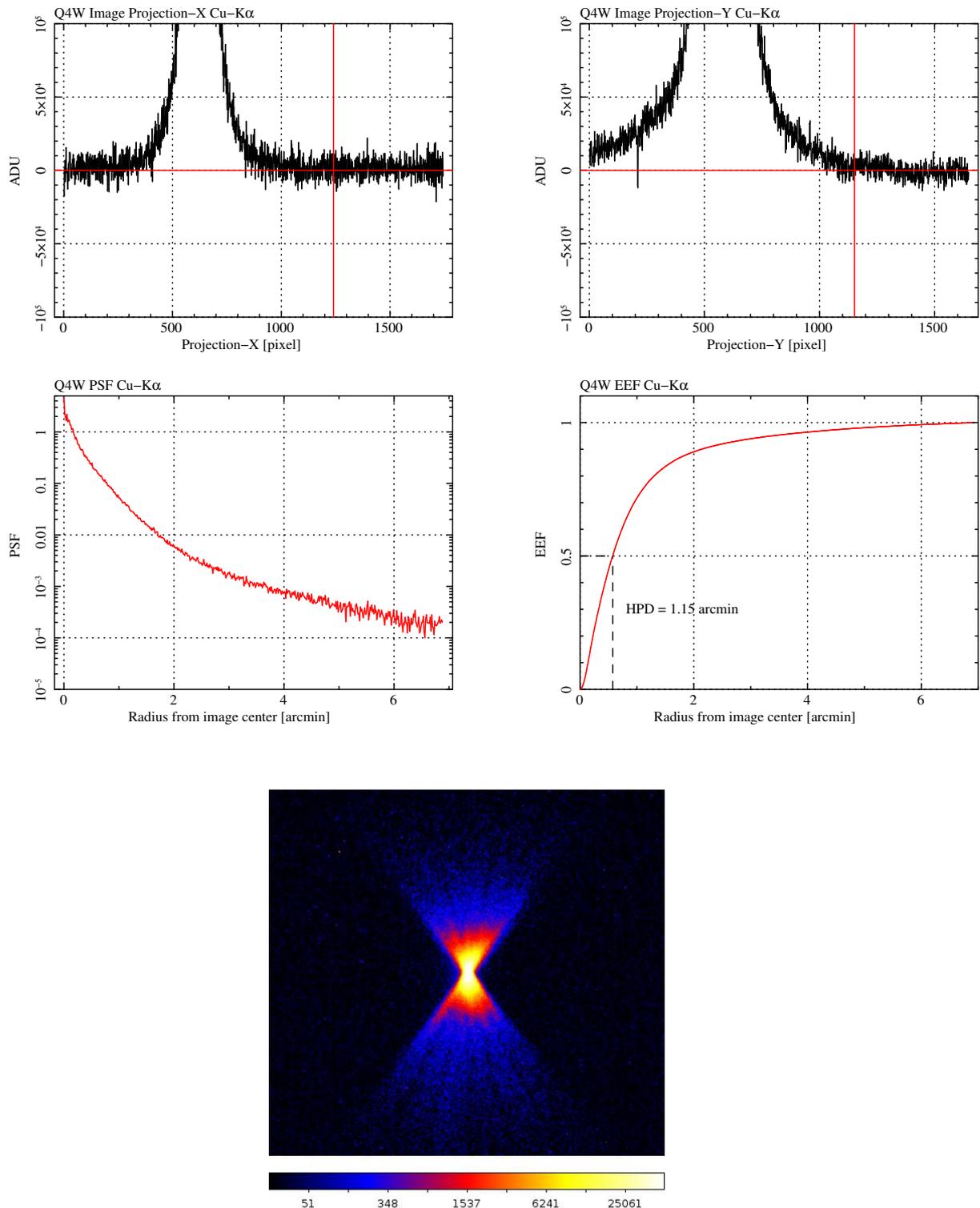
Q4 Cu-K α 

図 6.61: Cu-K α における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

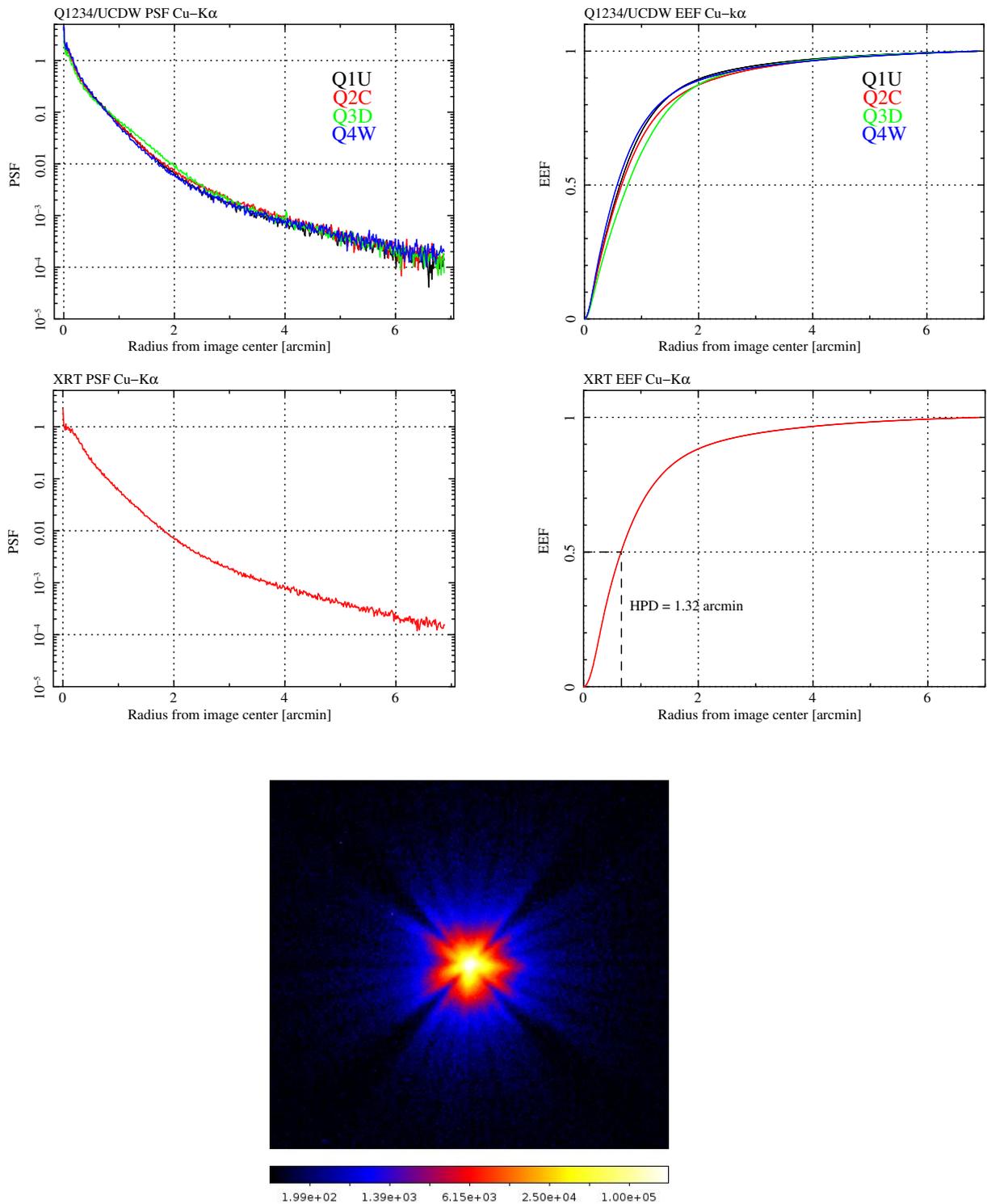
XRT Cu-K α 

図 6.62: Cu-K α における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上: Quadrant 毎の PSF の比較、右上: Quadrant 毎の EEF の比較、中央左: XRT の PSF、中央右: XRT の EEF、下: XRT のイメージ。

Q1 Pt-L α

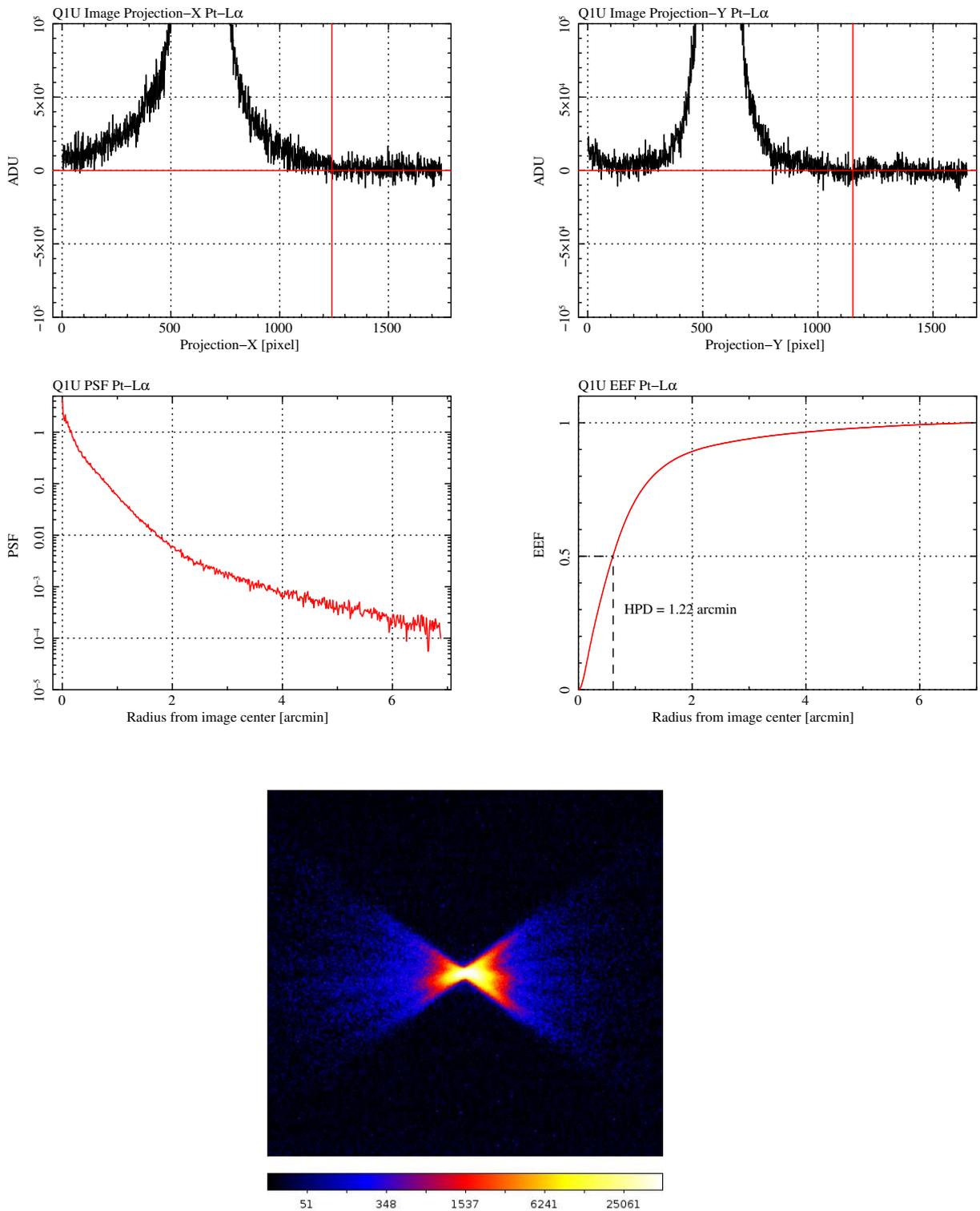


図 6.63: Pt-L α における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projectlaon X 方向、右上：イメージの projectlaon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

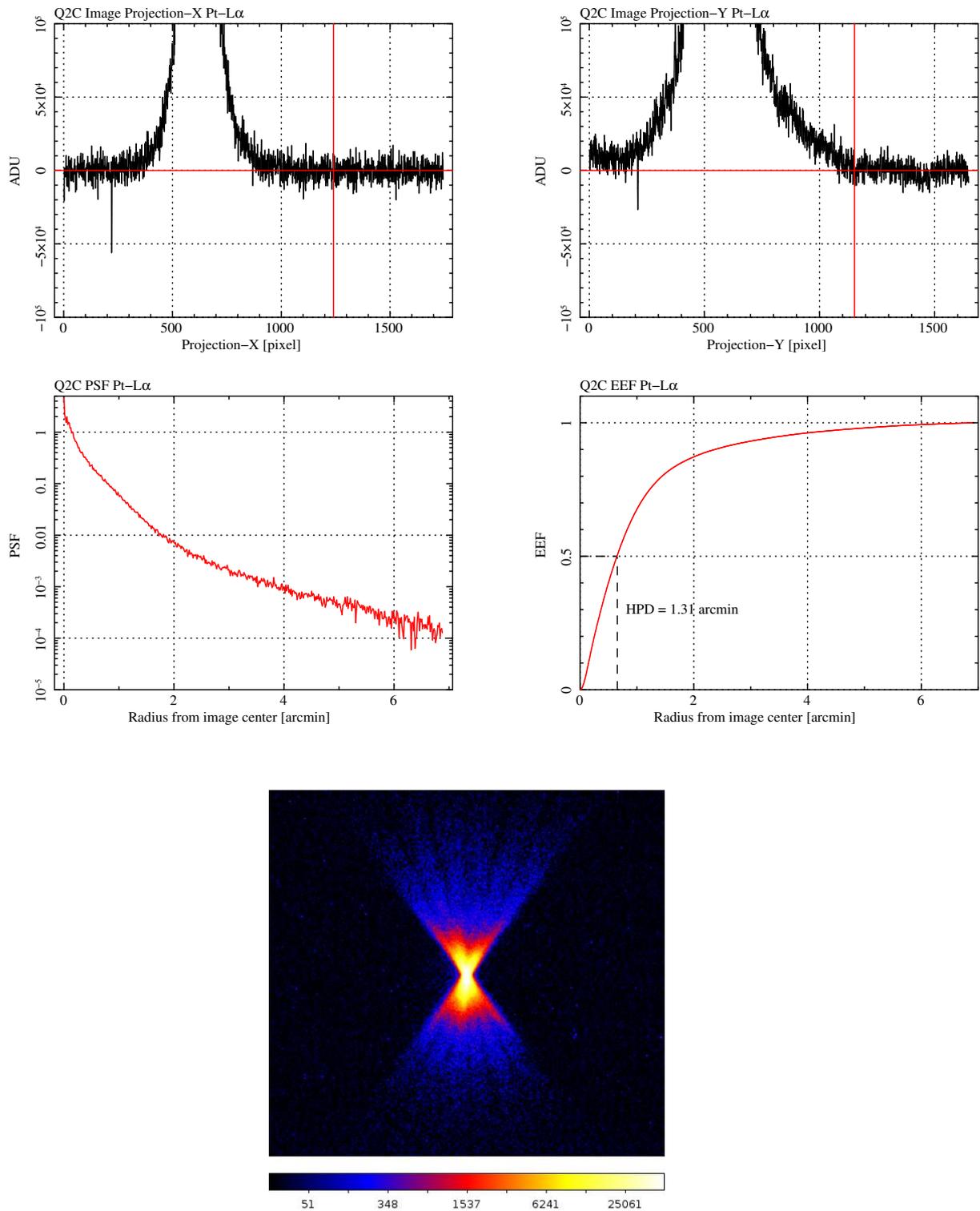
Q2 Pt-L α 

図 6.64: Pt-L α における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

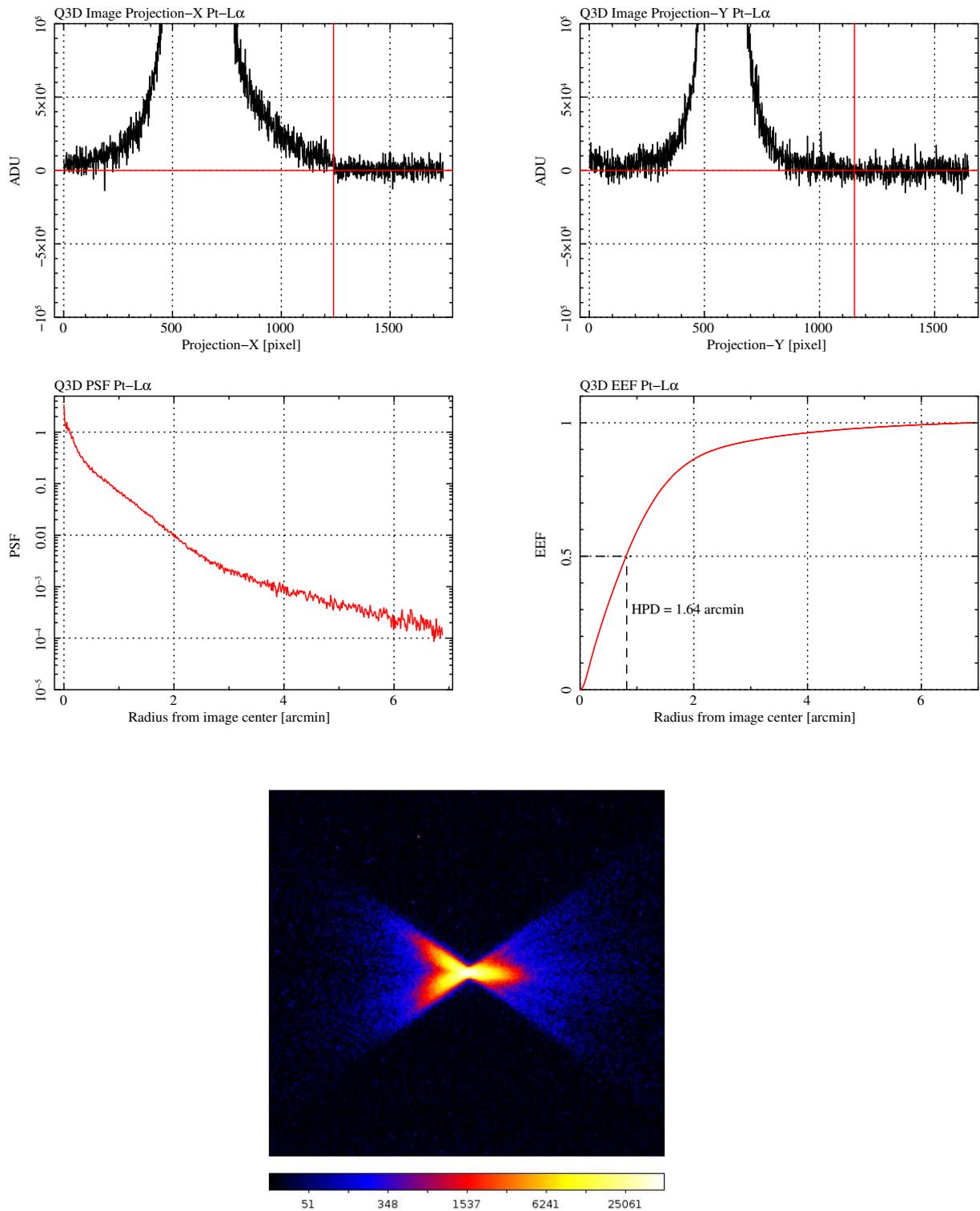
Q3 Pt-L α 

図 6.65: Pt-L α における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

Q4 Pt-L α

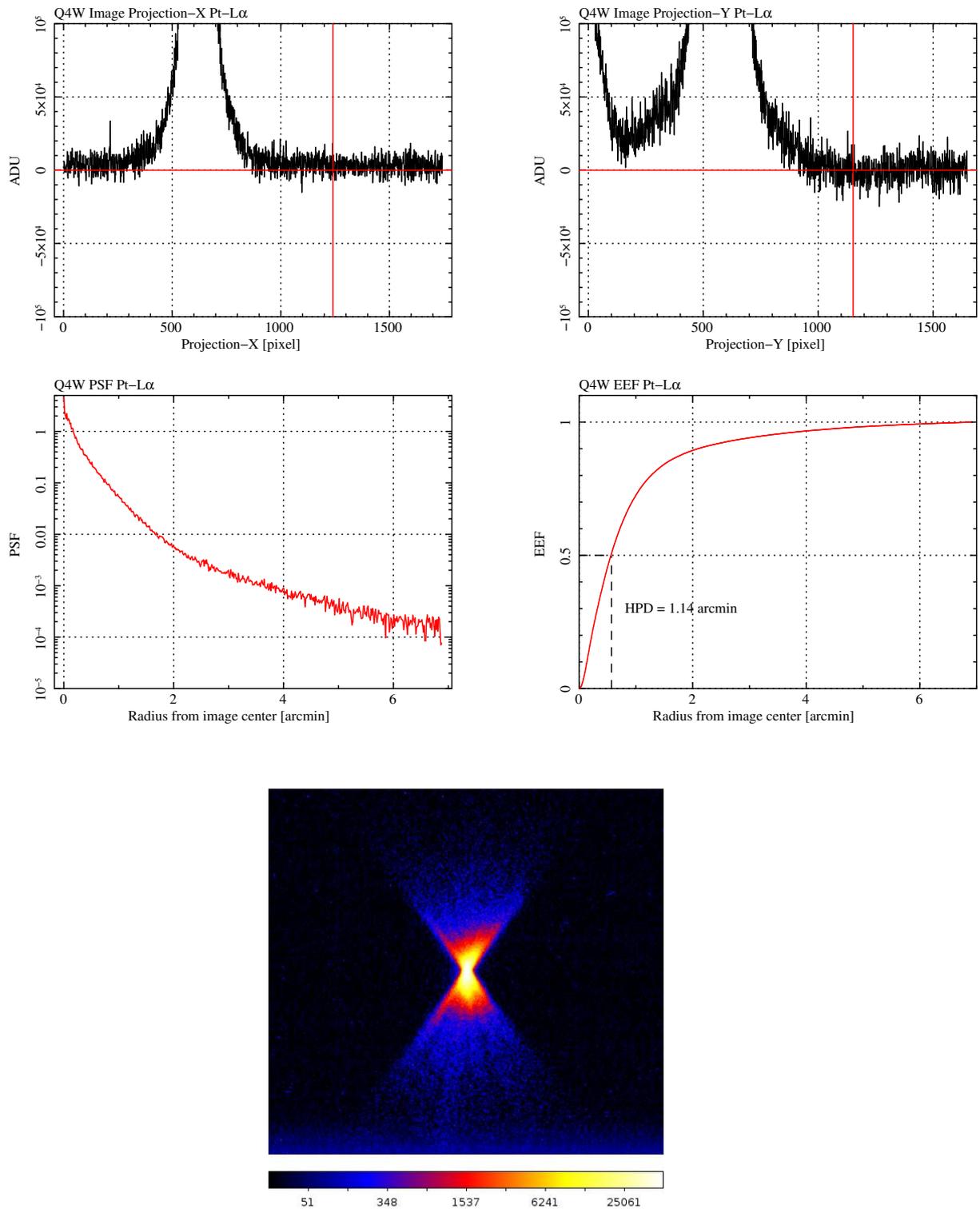


図 6.66: Pt-L α における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

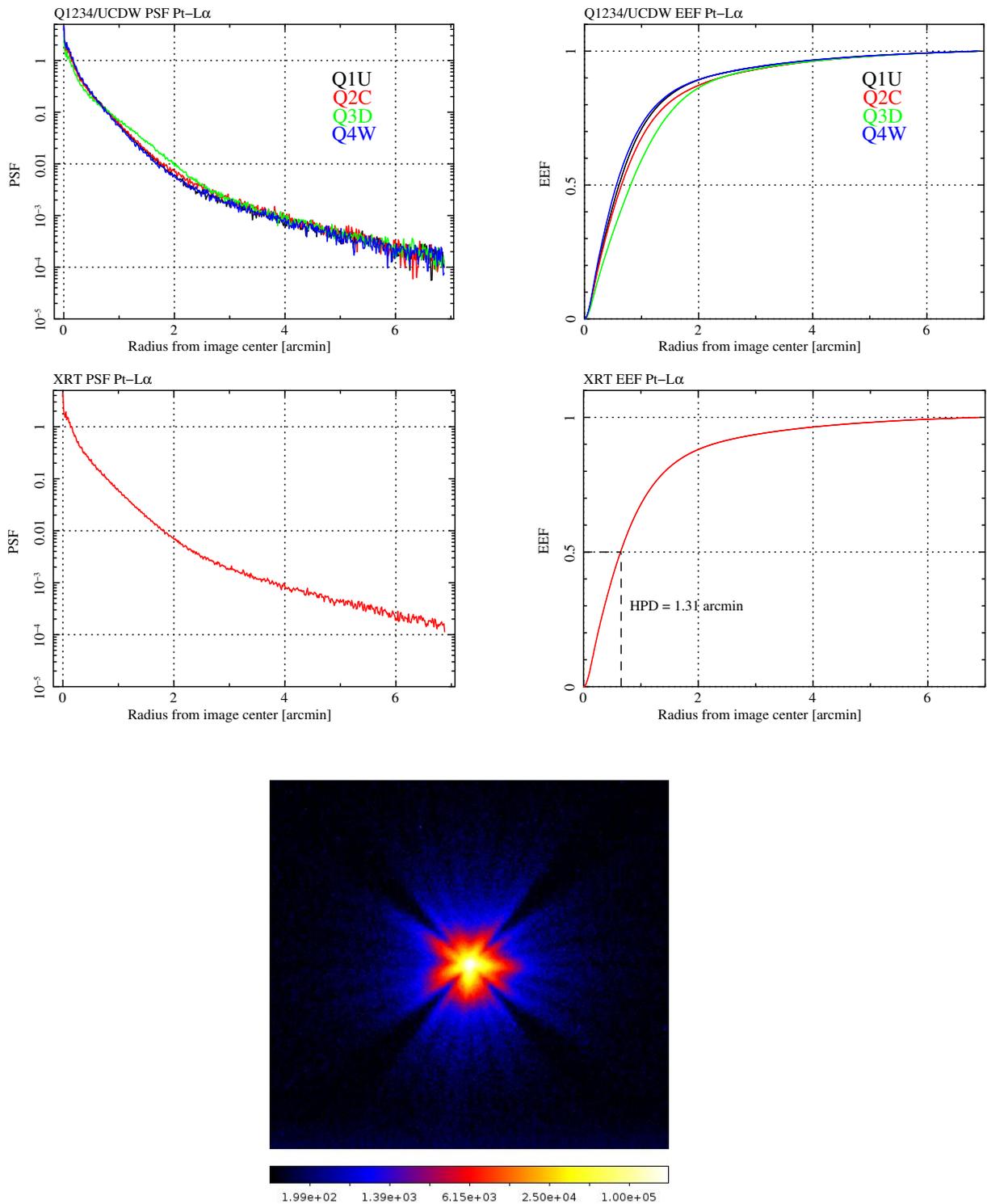
XRT Pt-L α 

図 6.67: Pt-L α における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上: Quadrant 毎の PSF の比較、右上: Quadrant 毎の EEF の比較、中央左: XRT の PSF、中央右: XRT の EEF、下: XRT のイメージ。

Q1 Pt-L β

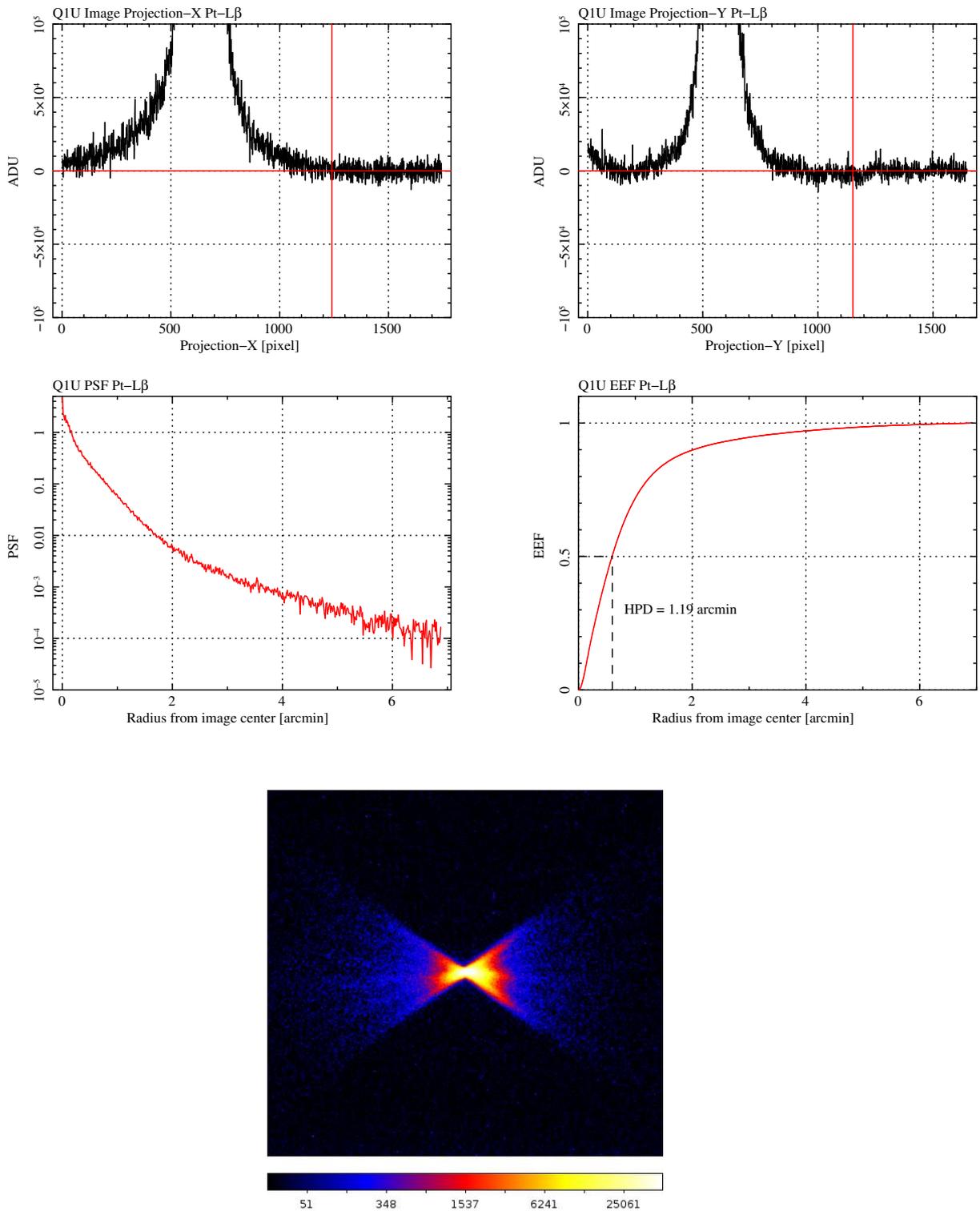


図 6.68: Pt-L β における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projectlbon X 方向、右上：イメージの projectlbon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

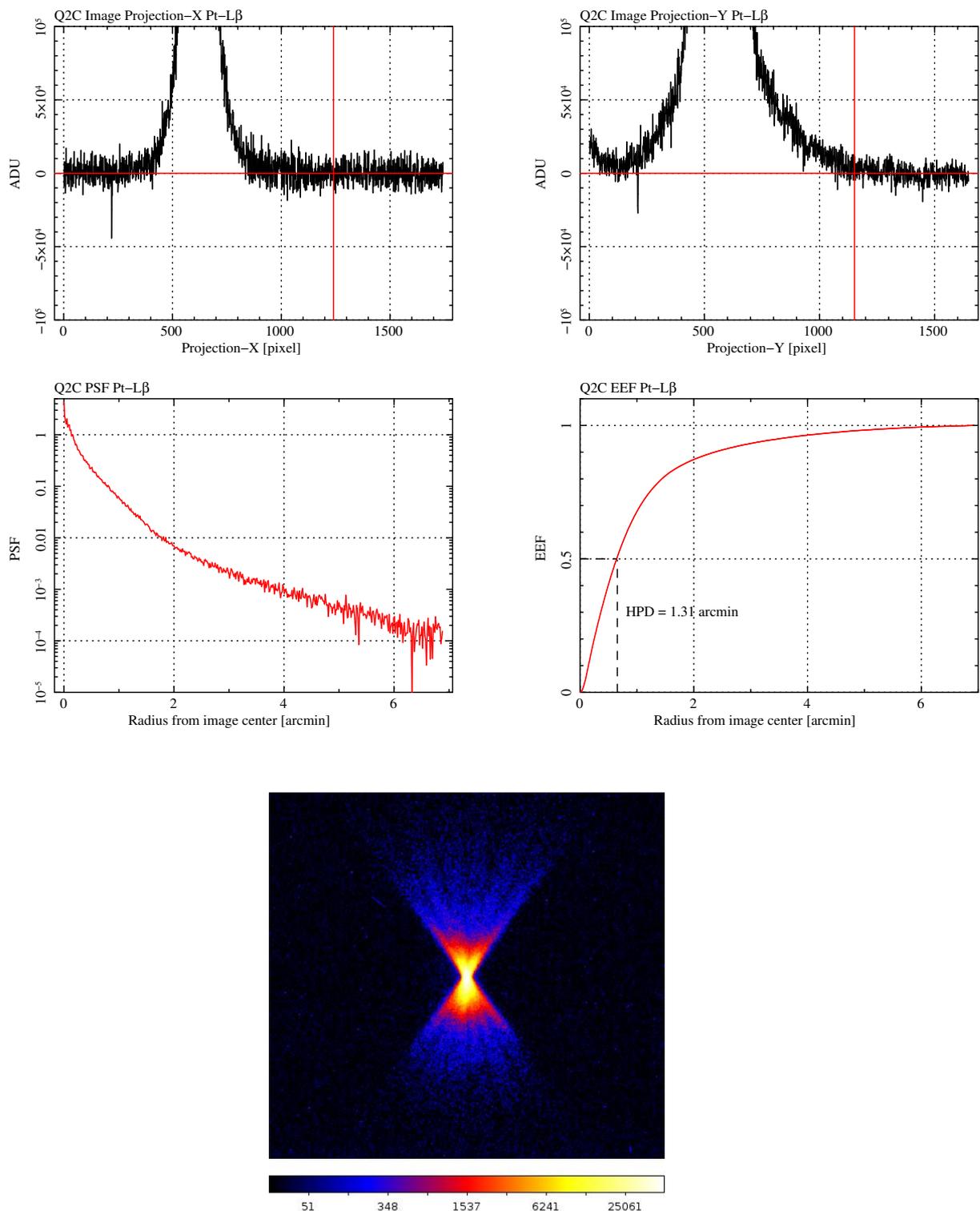
Q2 Pt-L β 

図 6.69: Pt-L β における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projectlbon X 方向、右上：イメージの projectlbon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

Q3 Pt-L β

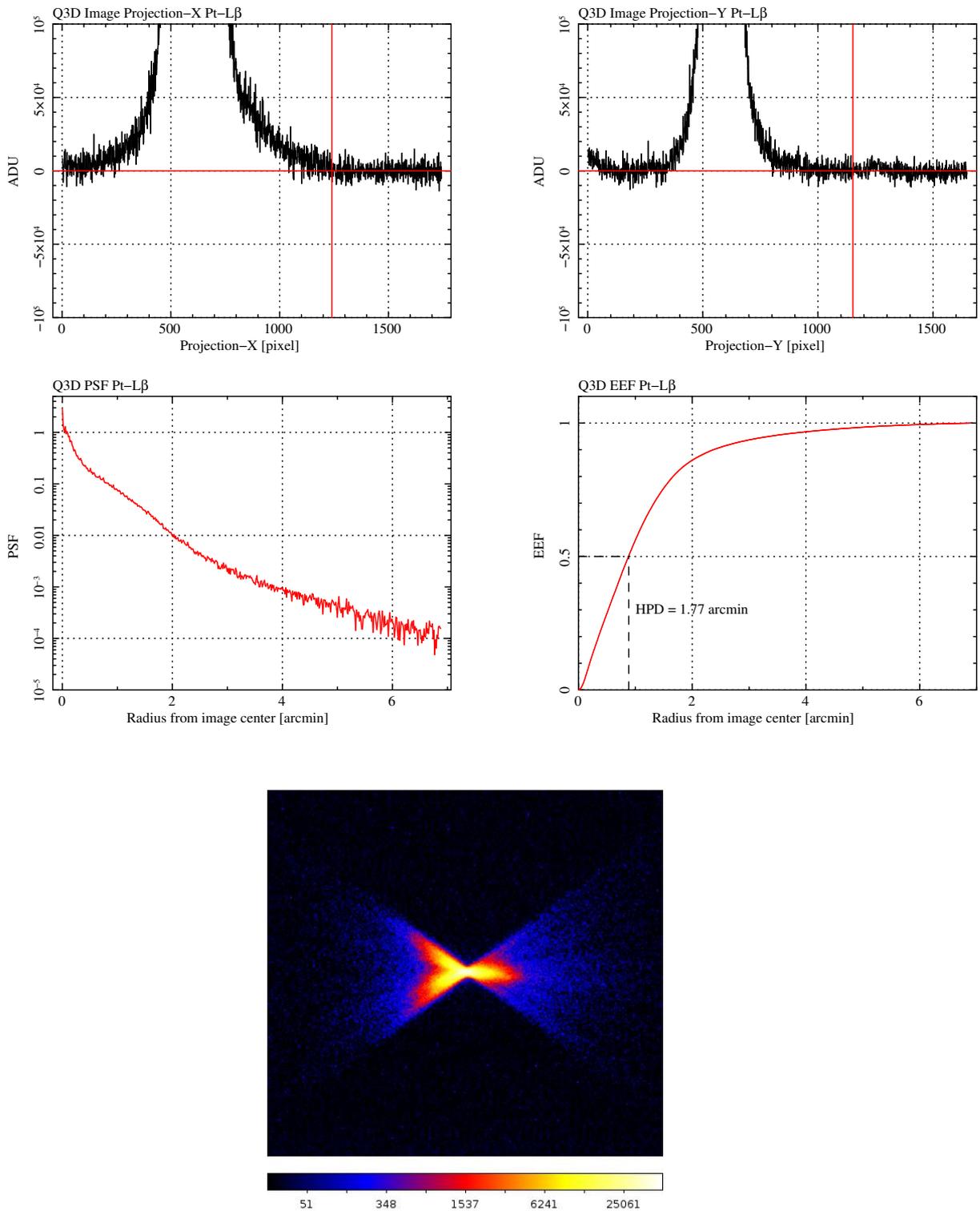


図 6.70: Pt-L β における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projectlbon X 方向、右上：イメージの projectlbon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

Q4 Pt-L β

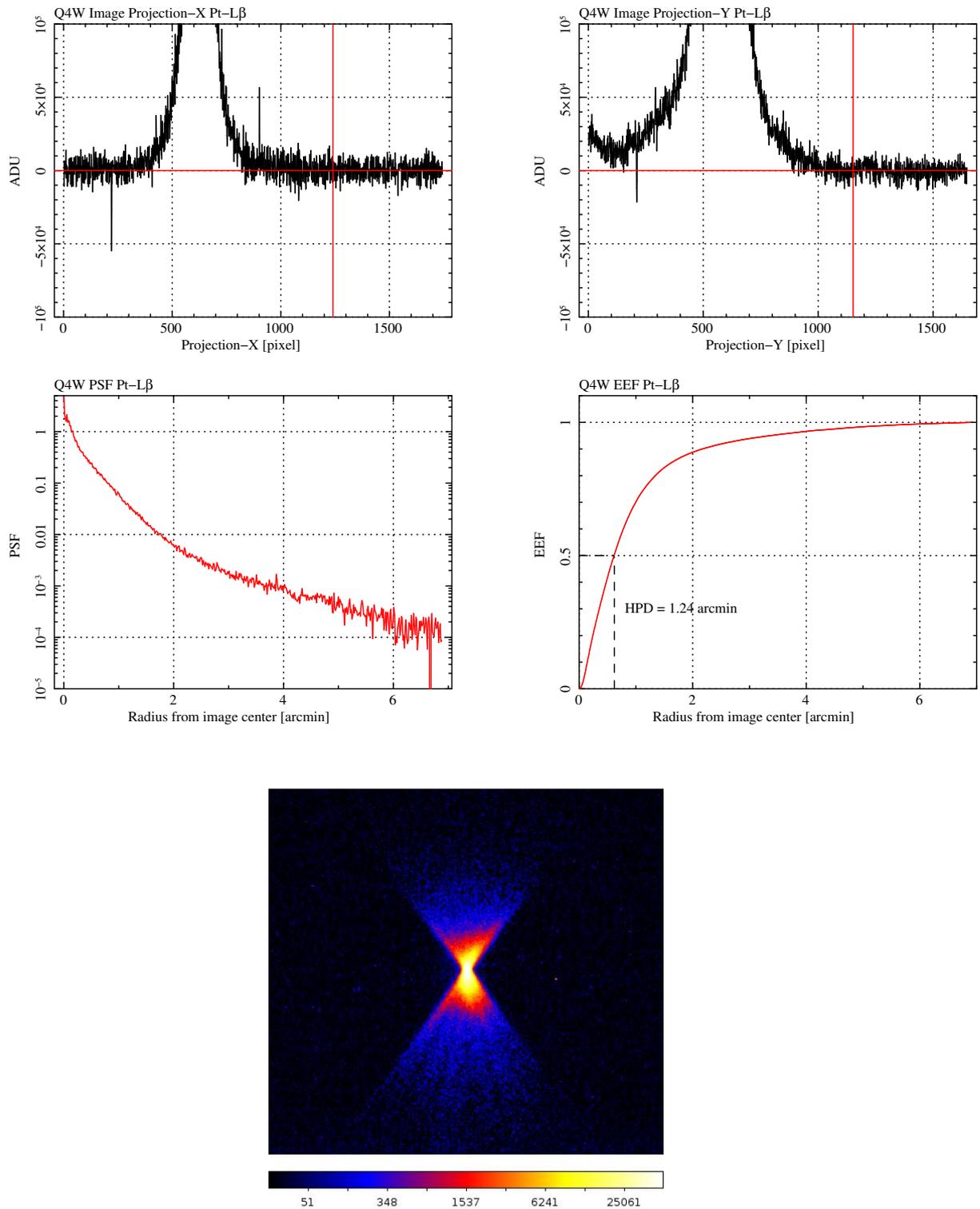


図 6.71: Pt-L β における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projectlbon X 方向、右上：イメージの projectlbon Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

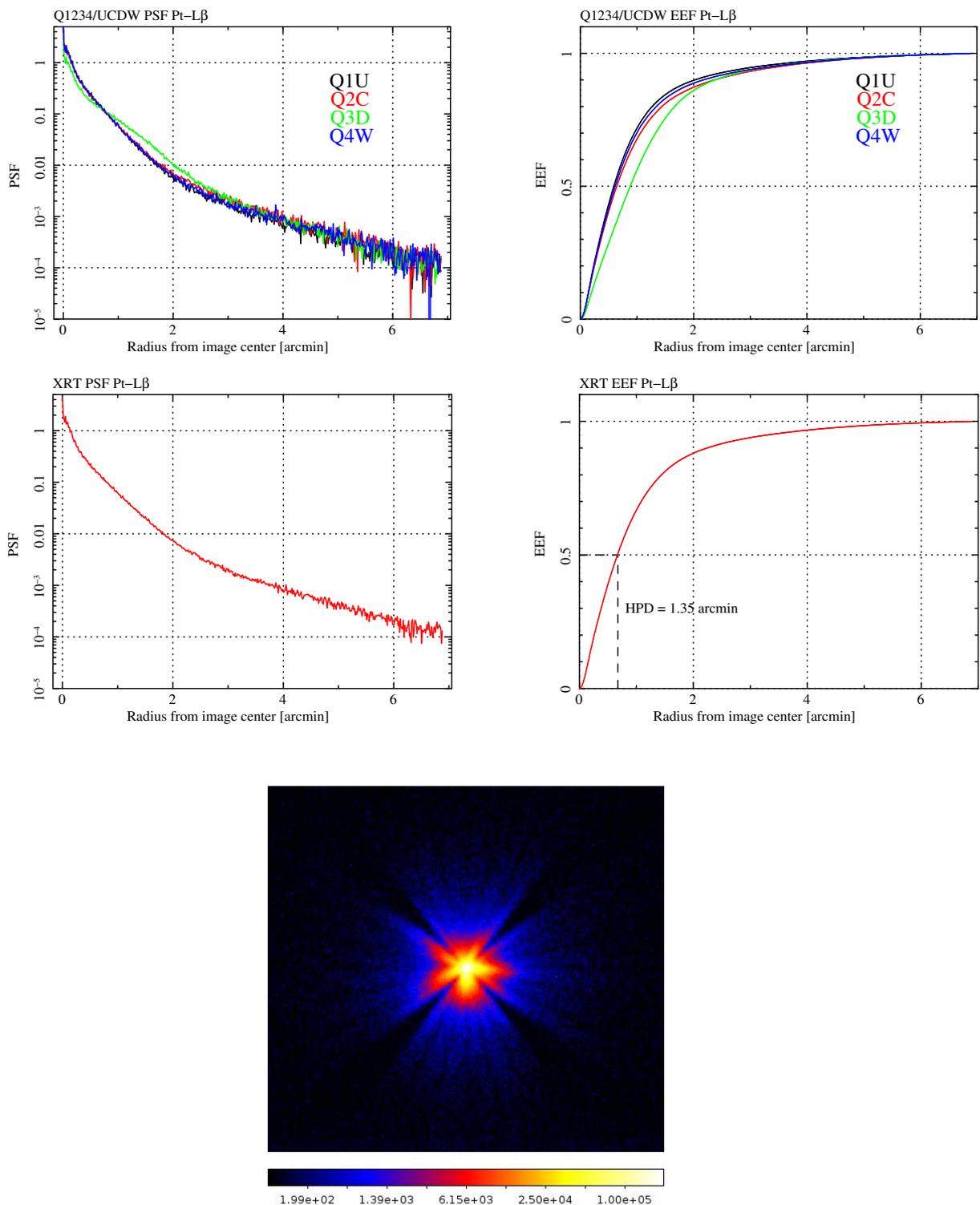
XRT Pt- $L\beta$ 

図 6.72: Pt- $L\beta$ における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上: Quadrant 毎の PSF の比較、右上: Quadrant 毎の EEF の比較、中央左: XRT の PSF、中央右: XRT の EEF、下: XRT のイメージ。

Q1 Pt-L γ

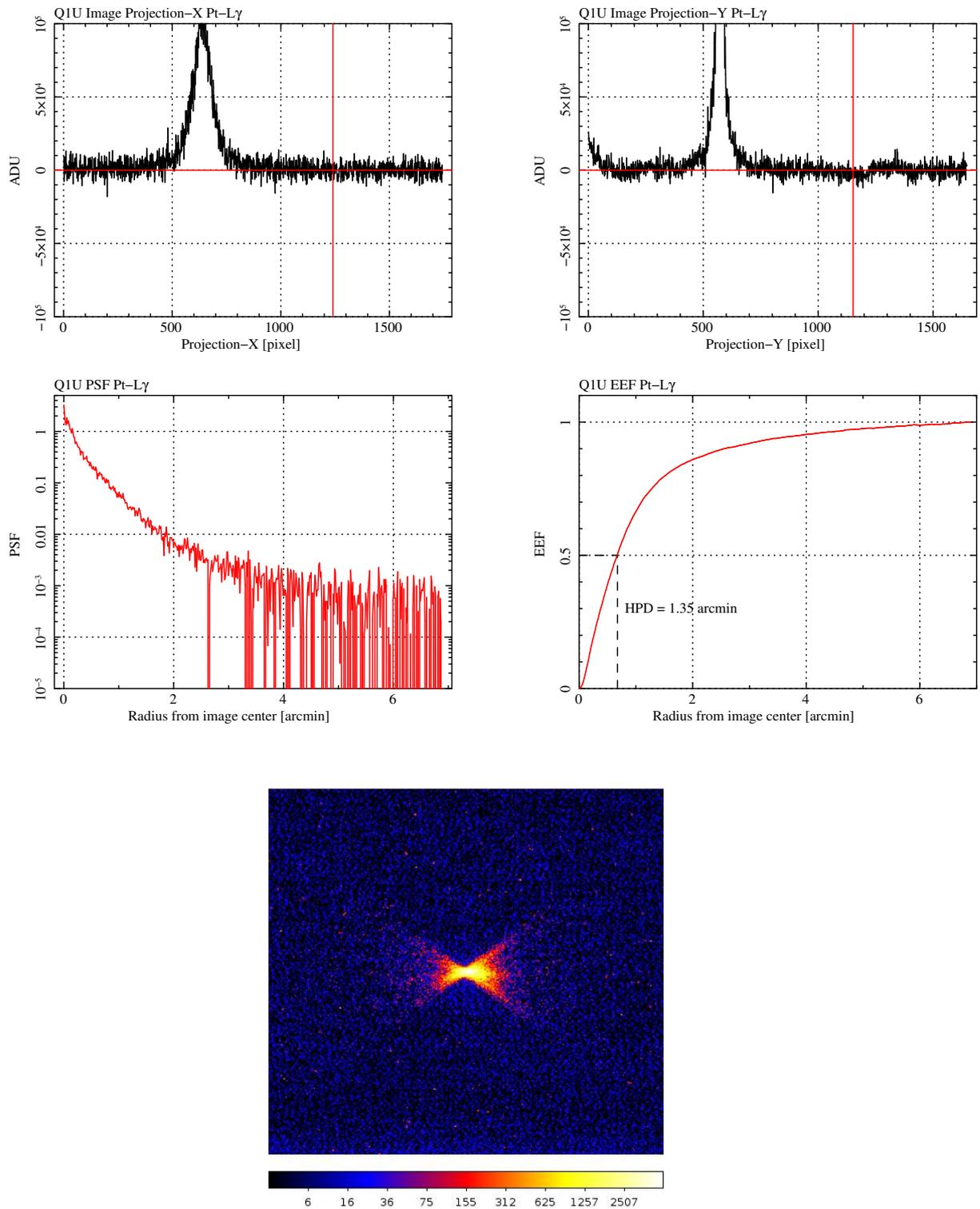


図 6.73: Pt-L γ における Q1 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

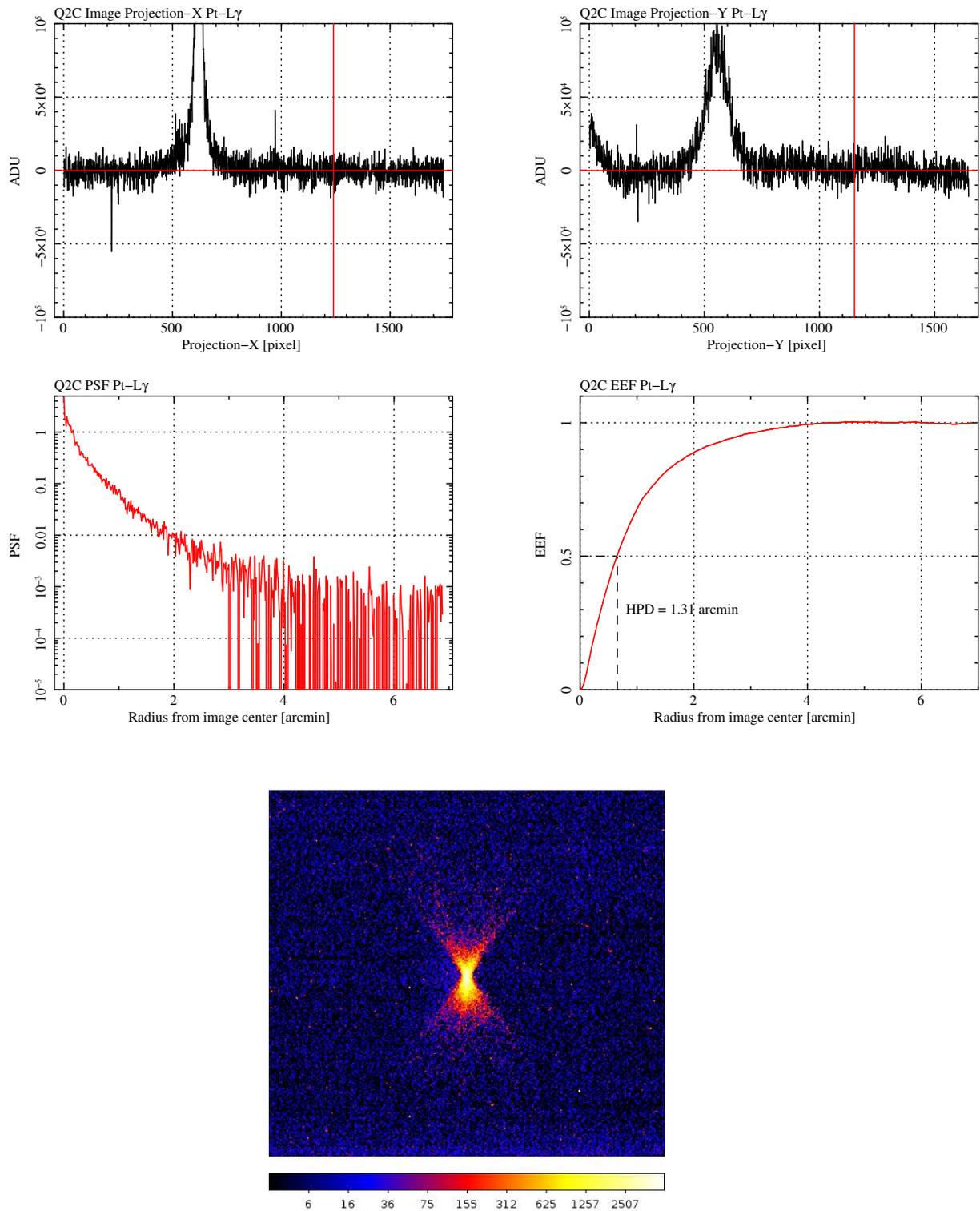
Q2 Pt- $L\gamma$ 

図 6.74: Pt- $L\gamma$ における Q2 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

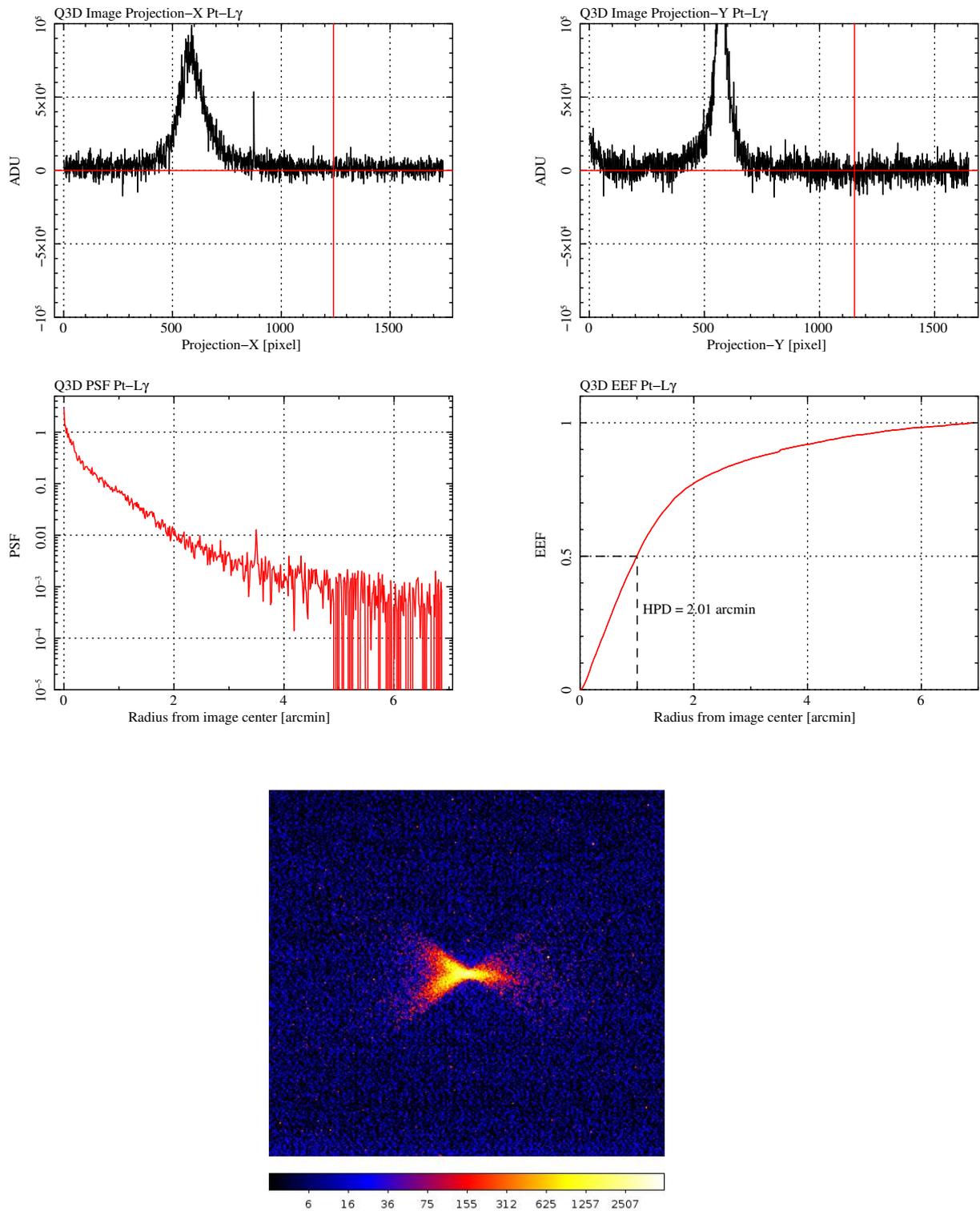
Q3 Pt- $L\gamma$ 

図 6.75: Pt- $L\gamma$ における Q3 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

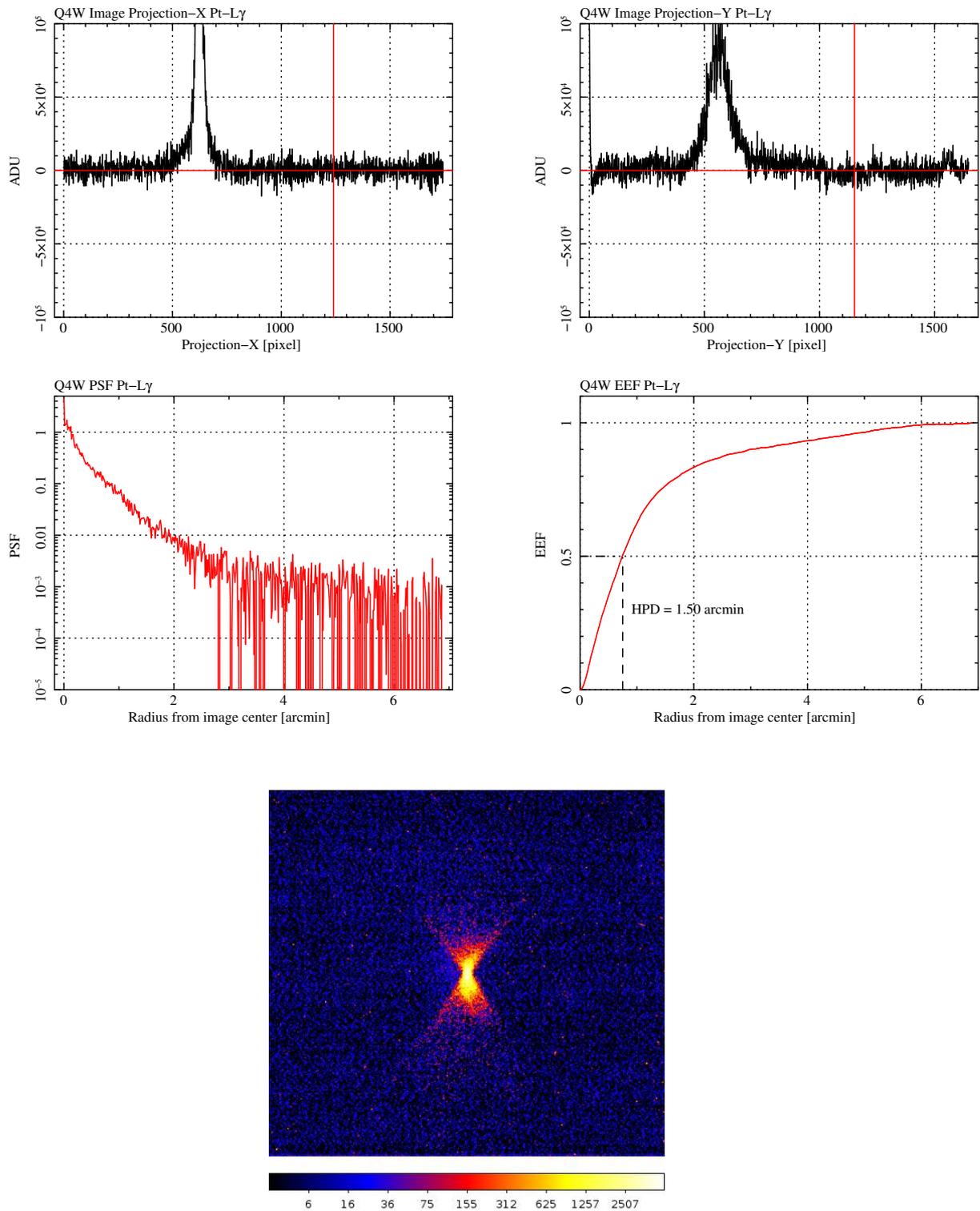
Q4 Pt- $L\gamma$ 

図 6.76: Pt- $L\gamma$ における Q4 の結像性能の結果。左上：イメージの projection X 方向、右上：イメージの projection Y 方向、中央左：PSF、中央右：EEF、下：イメージ。

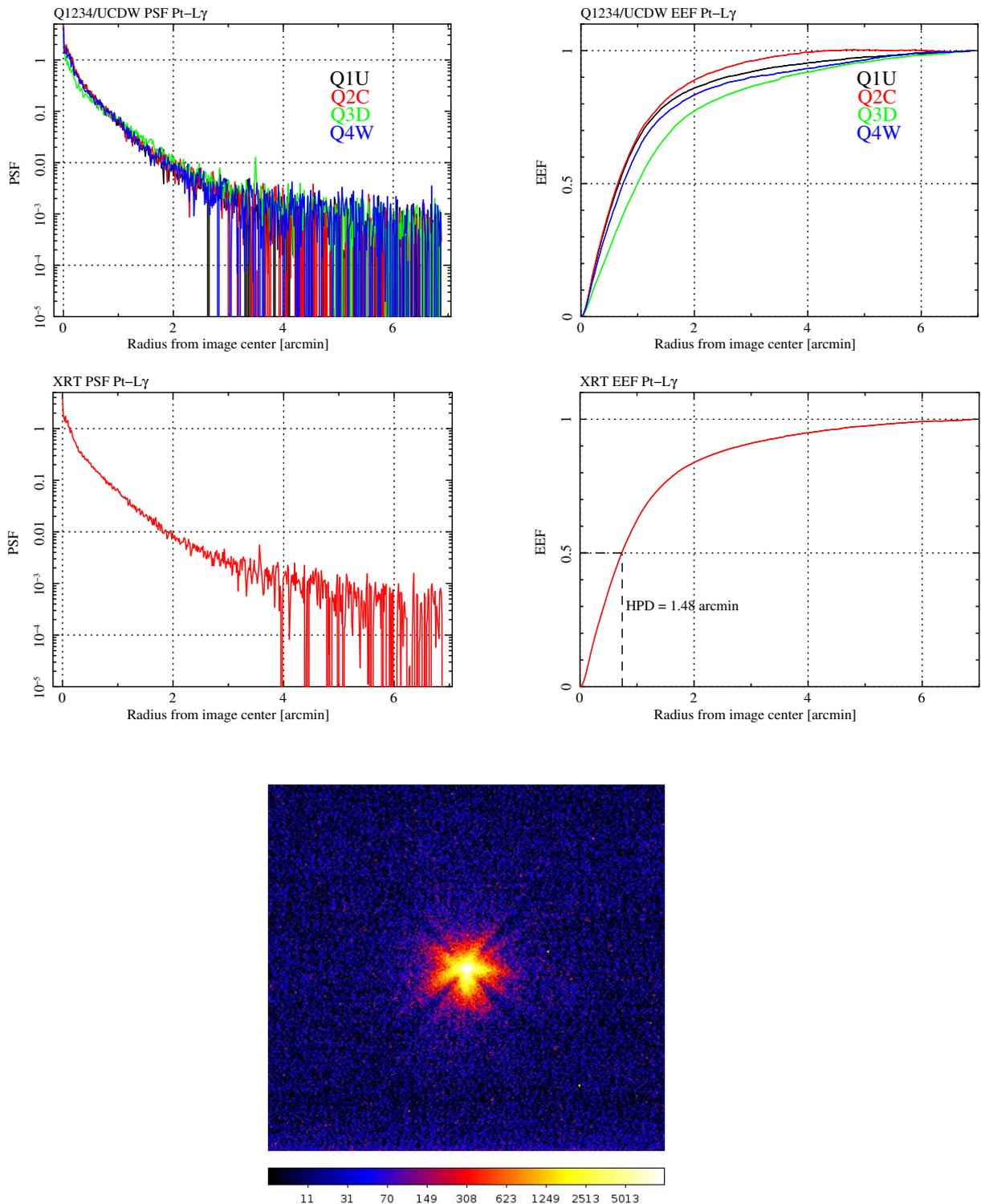
XRT Pt-L γ 

図 6.77: Pt-L γ における XRT の結像性能の結果 (Q1, Q2, Q3, Q4 の合成イメージ)。左上: Quadrant 毎の PSF の比較、右上: Quadrant 毎の EEF の比較、中央左: XRT の PSF、中央右: XRT の EEF、下: XRT のイメージ。

6.9 望遠鏡に与える重力効果の評価

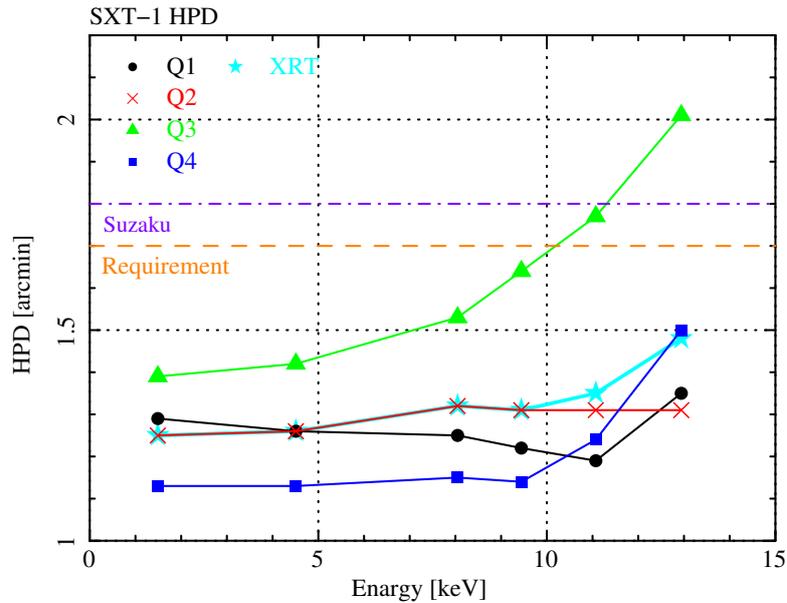


図 6.78: Quadrant 毎の HPD のエネルギー依存性。

表 6.18: 各エネルギーに対する Quadrant の HPD。XRT は望遠鏡一台分を意味する。括弧内はイメージの中心座標 (単位は [pixel])

	Al-K α	Ti-K α	Cu-K α	Pt-L α	Pt-L β	Pt-L γ
Q1U	1.29' (613, 569)	1.26' (618, 570)	1.25' (617, 574)	1.22' (616, 576)	1.19' (624, 581)	1.35' (614, 574)
Q2C	1.25' (617, 566)	1.26' (619, 564)	1.32' (619, 565)	1.31' (619, 567)	1.31' (619, 569)	1.31' (619, 569)
Q3D	1.39' (626, 574)	1.42' (629, 575)	1.53' (628, 578)	1.64' (627, 577)	1.77' (628, 580)	2.01' (625, 575)
Q4W	1.13' (623, 577)	1.13' (625, 573)	1.15' (624, 576)	1.14' (624, 577)	1.24' (621, 585)	1.50' (620, 586)
XRT	1.25' (622, 570)	1.26' (623, 571)	1.32' (620, 578)	1.31' (624, 579)	1.35' (620, 579)	1.48' (619, 575)

6.9 望遠鏡に与える重力効果の評価

これまでの測定は望遠鏡は回さず、全て Q1U の configuration で行ってきた。ここでは望遠鏡を 180 ° 回し、Q3U の configuration で性能評価 (望遠鏡光軸と結像性能) を行い、重力の効果により望遠鏡の性能にどのような変化が見られるかを調査する。エネルギーは Ti-K α で測定した。

6.9.1 望遠鏡光軸

Q1U のときと同様に Quadrant 毎に vignetting を行い、望遠鏡光軸を求める。Q3U における望遠鏡光軸の結果を図 6.79 に示す。図 6.79 は Q3U の光軸を Q1U に変換した図になっている。Q1U における各 Quadrant の光軸は、Q3U における各 Quadrant の光軸に比べて、全体的に右下へ約 18 秒角シフトしている。このシフトは、セオドライトの原点と X 線軸がずれて生じたと考えるのが自然である。しかし現時点でそのズレの確認は出来ておらず、また、Q3D のみ左下へシフトしていることも現状ではまだ理解出来ていない。まとめると、重力による光軸の変化は、セオドライトと X 線軸が 18 秒角ずれたまま測定していたと仮定すると、その影響はほぼ無視できると推測される。光軸のさらに詳しい考察は 8.1 章で議論する。

表 6.19: 測定条件。

Config.	Q3U
Target	Ti-K α
Slit size	2 × 2 mm
Pitch	4 mm pitch
Measure Point ($\Delta\theta_y, \Delta\theta_z$)	(0', 0'), ($\pm 4'$, 0'), (0', $\pm 4'$)
FL	5600 mm
Detector	P.C.

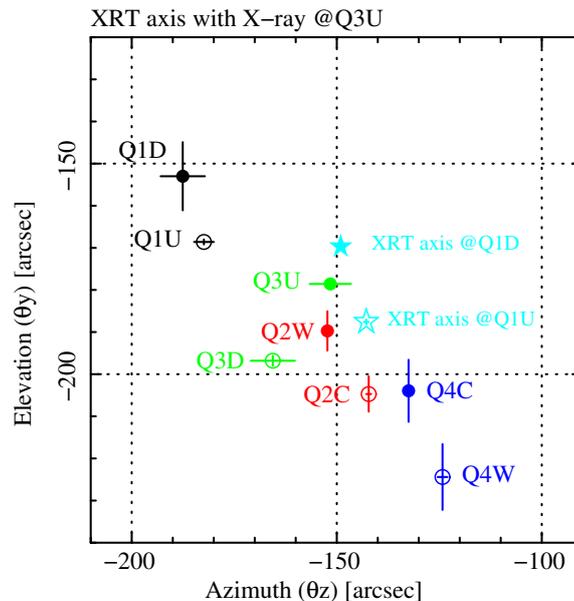


図 6.79: Q3U における光軸を Q1U 相当に変換した光軸。

6.9 望遠鏡に与える重力効果の評価

Config.	Azimuth (θ_z) [arcsec]	Elevation (θ_y) [arcsec]
Q1D → Q1U	-188''	-153''
Q1U	-182''	-169''
Q2W → Q2C	-152''	-190''
Q2C	-142''	-205''
Q3U → Q3D	-152''	-179''
Q3D	-166''	-197''
Q4C → Q4W	-132''	-204''
Q4W	-124''	-224''
X-ray XRT axis(@Q3U)	-149''	-170''
X-ray XRT axis(@Q1U)	-143''	-188''

表 6.20: Q3D における光軸を Q1U 相当に直した光軸の値。

6.9.2 結像性能

図 6.80 ~ 6.99 に Q3U における結像性能の結果を以下に示す。どの Quadrant も Q1U のときの HPD とほぼ consistent であり、イメージの形も大きく変わった様子ない。また、PSF において、散乱成分の領域までよく一致しており、望遠鏡光軸と同様に重力の効果はほぼ無いと推測される。なお、Q3U のイメージの図は Q1U との比較をするため 180°回転させている。図 6.100 に、横軸に Q1U の HPD、縦軸に Q3U の HPD をプロットした。どちらの configuration も HPD に有為な変化は見られず、直線上にきれいに乗っている。表 6.22 に Q1U 時と Q3U 時の HPD の値を示す。

表 6.21: 測定条件。

Config.	Q3U, (θ_y, θ_z) = (204, 37) pulse
Target	Ti-K α
Slit size	2 × 2 mm
Pitch	2 mm pitch
FL	5600 mm
Detector	X線 CCD カメラ

6.9 望遠鏡に与える重力効果の評価

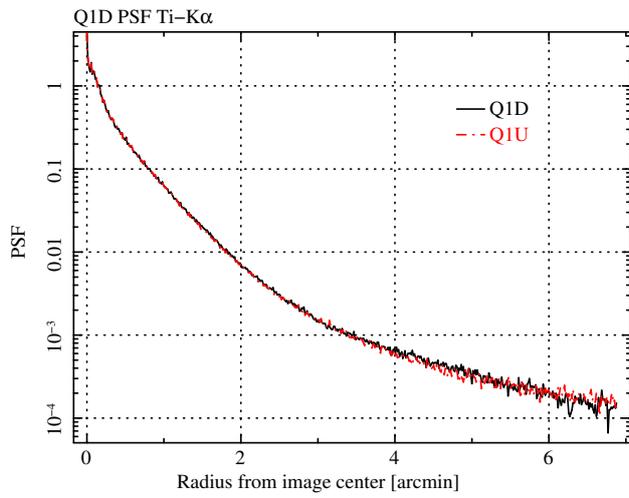


図 6.80: Q1D の PSF。

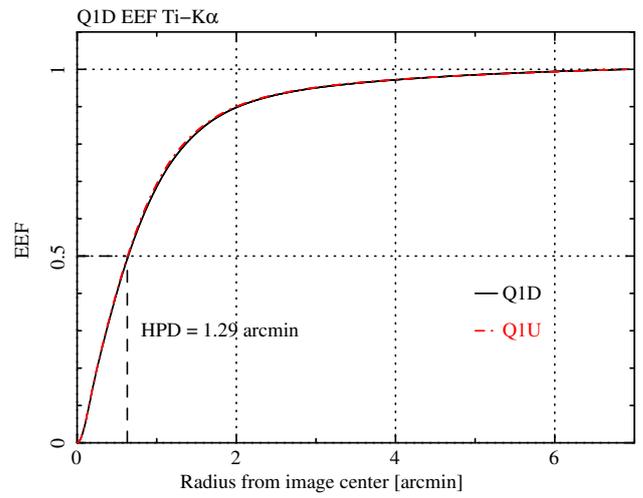


図 6.81: Q1D の EEF。

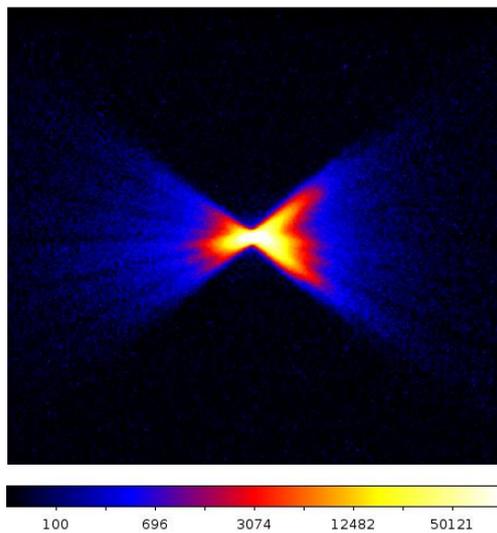


図 6.82: Q1D のイメージ。

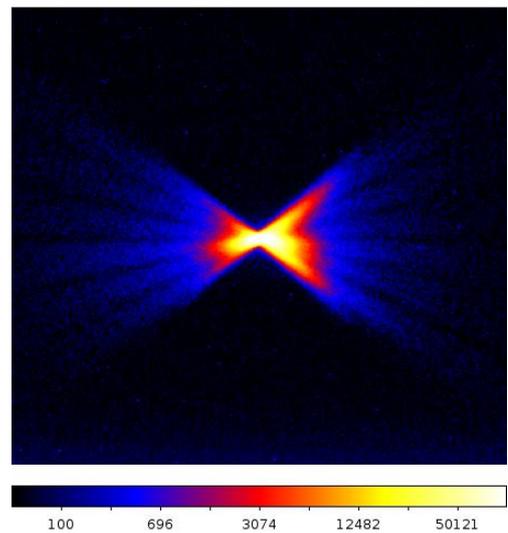


図 6.83: Q1U のイメージ。

6.9 望遠鏡に与える重力効果の評価

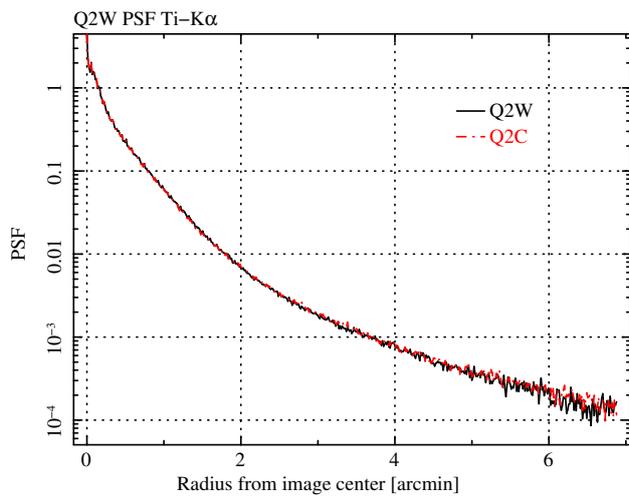


図 6.84: Q2W の PSF。

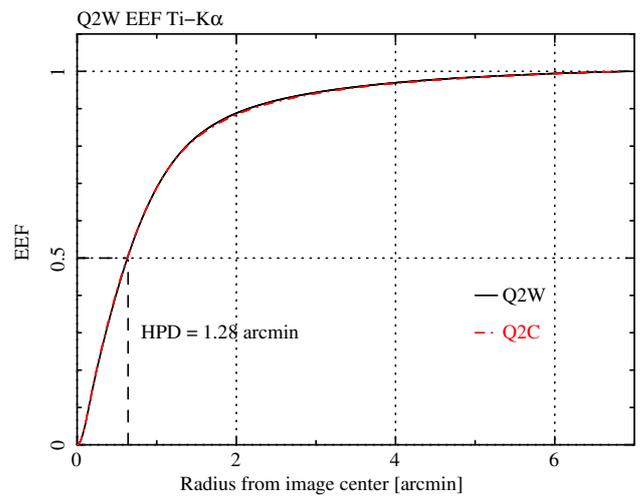


図 6.85: Q2W の EEF。

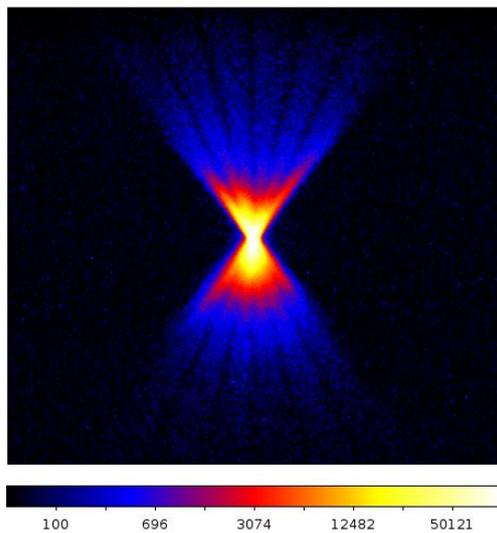


図 6.86: Q2W のイメージ。

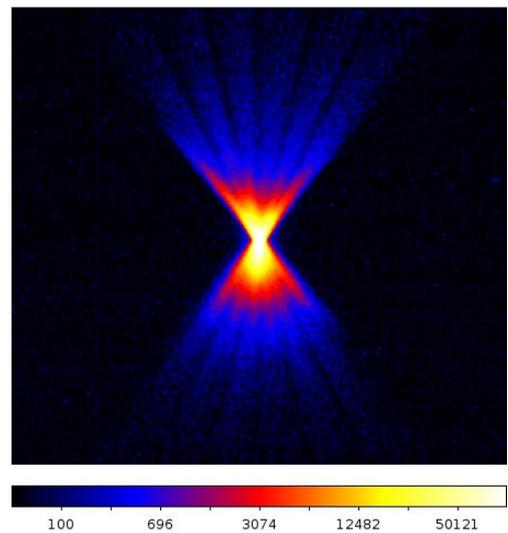


図 6.87: Q2C のイメージ。

6.9 望遠鏡に与える重力効果の評価

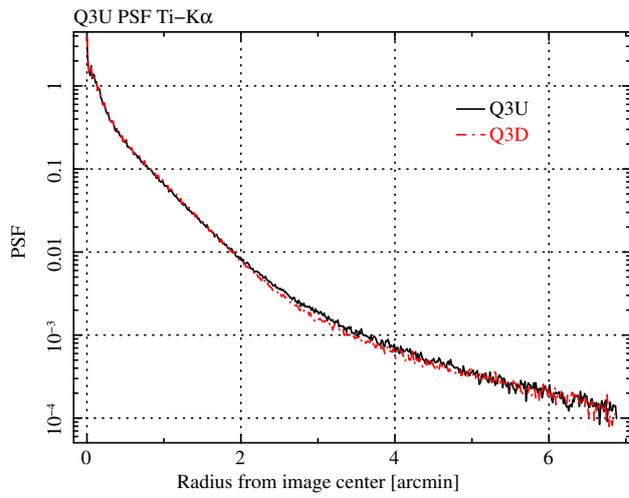


図 6.88: Q3U の PSF。

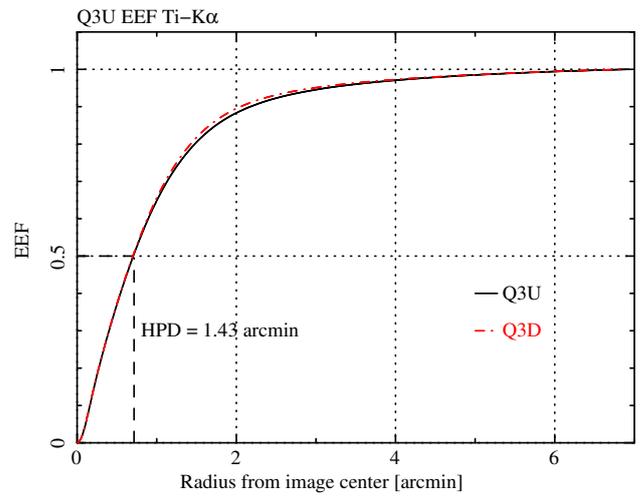


図 6.89: Q3U の EEF。

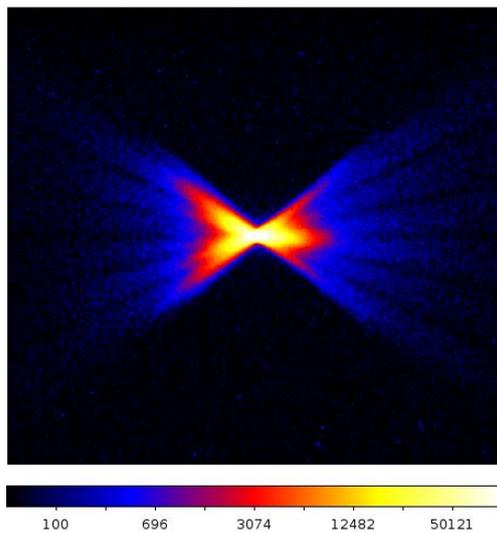


図 6.90: Q3U のイメージ。

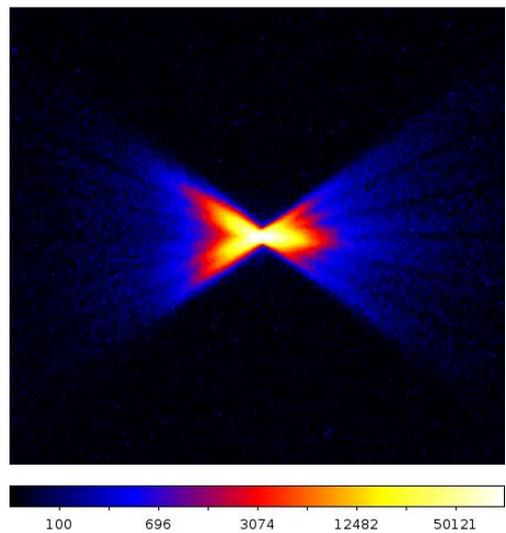


図 6.91: Q3D のイメージ。

6.9 望遠鏡に与える重力効果の評価

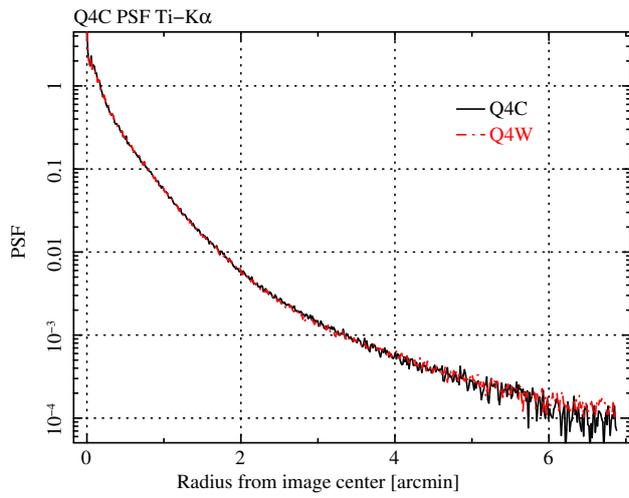


図 6.92: Q4C の PSF。

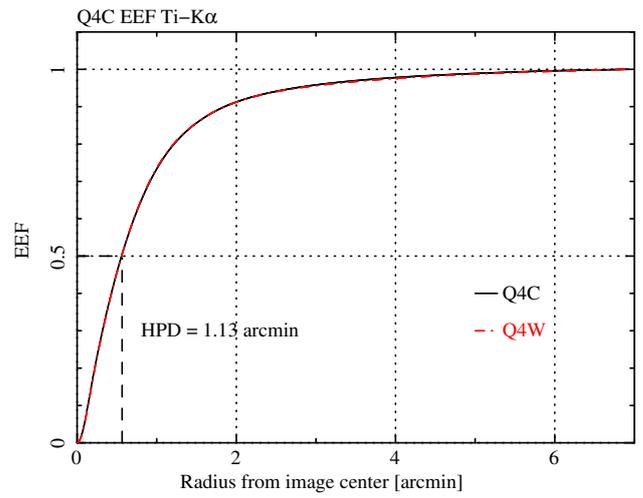


図 6.93: Q4C の EEF。

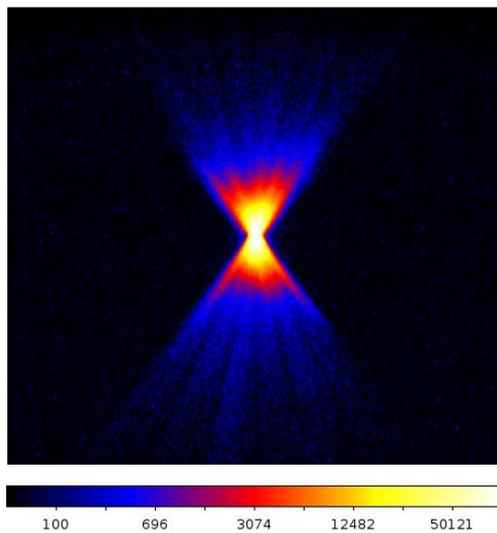


図 6.94: Q4C のイメージ。

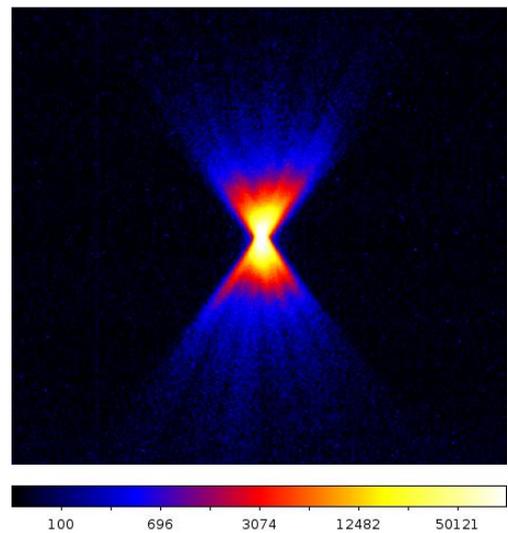


図 6.95: Q4W のイメージ。

6.9 望遠鏡に与える重力効果の評価

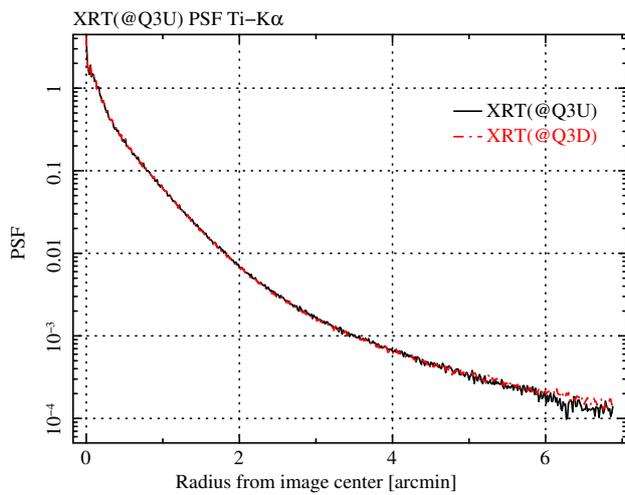


図 6.96: Q3U における XRT の PSF。

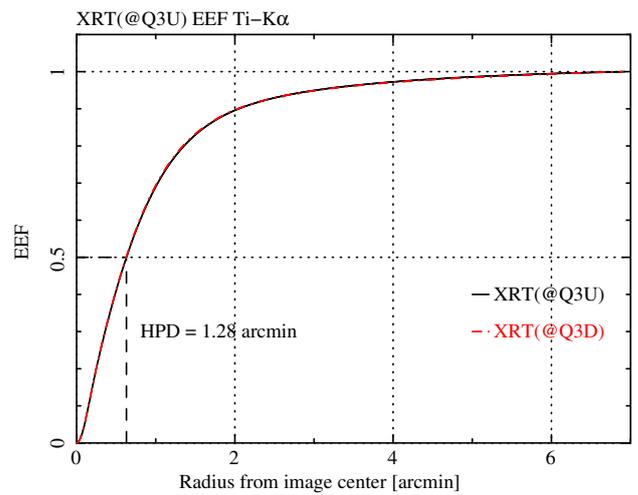


図 6.97: Q3U における XRT の EEf。

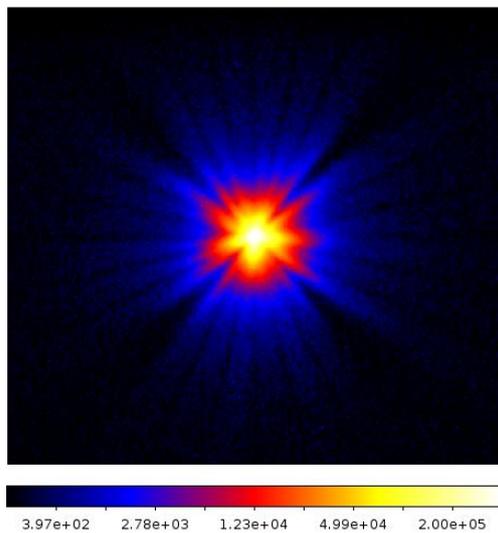


図 6.98: Q3U における XRT のイメージ。

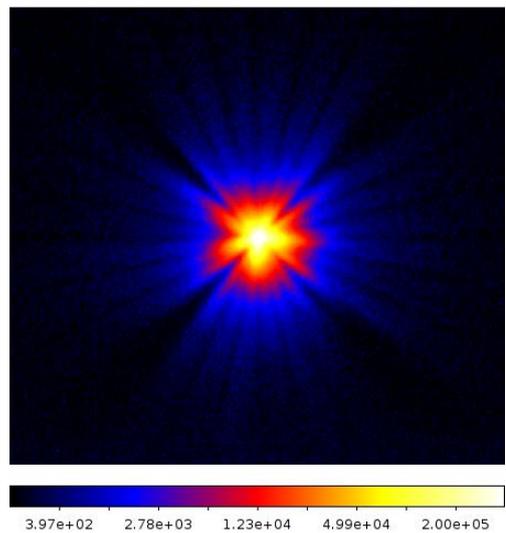


図 6.99: Q1U における XRT のイメージ。

6.9 望遠鏡に与える重力効果の評価

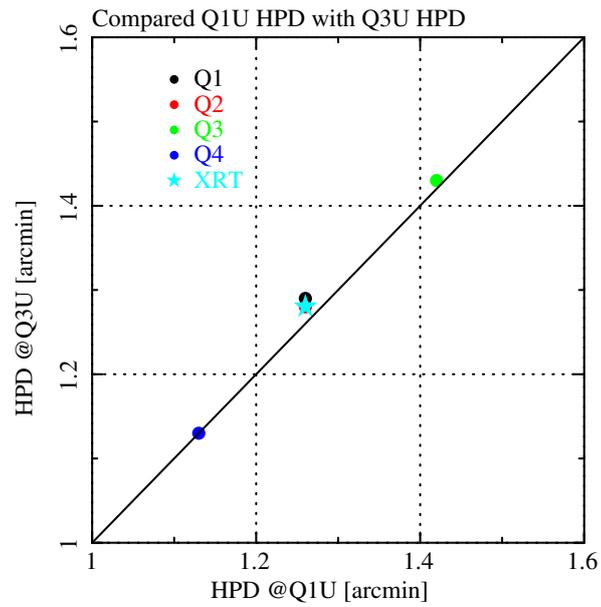


図 6.100: Q1U と Q3U における HPD の比較。

表 6.22: Q3U の configuration での HPD の値。

	Q1	Q2	Q3	Q4	XRT
@Q3U	1.29'	1.28'	1.43'	1.13'	1.28'
@Q1U	1.26'	1.26'	1.42'	1.13'	1.26'

6.10 PSF (Point Spread Function) の tail 測定

6.8 章では検出器 X 線を焦点距離である 5600 mm に置いて結像性能の測定を行った。しかし 5600 mm にある検出器の視野は X 線 CCD カメラで 17.1' × 15.8' であり、実際に搭載される SXI の最大視野である ~ 33' をカバーすることはできない。そのためイメージの裾に伸びる反射成分を視野内に全て捕らえることはできない。例えば Al の PSF の tail を見ると、その tail は 7 分角を過ぎても続いているのがわかる。これは検出器の視野外に反射成分が残っていることを示している。ここではこの視野外に残された反射成分が、SXI の視野の場合、どこまで広がっているかを調査し、応答関数に取り込むことを目的とする。図 6.103 に SXI の視野を示す。

6.10.1 測定方法

測定に用いている X 線 CCD カメラの視野では SXI の視野を一度にカバーできない。そこで検出器を焦点距離である 5600 mm から 3733 mm (5600 mm の 3 分の 2 倍) にすることで、X 線 CCD カメラの画角を 1.5 倍 (最大で ~ 35 分角) にした。さらに検出器を上下斜めにずらして撮像することで SXI の視野をカバーすることにした (図 6.101)。ここで注意しなければならないのは、焦点距離を 3 分の 2 倍にしているため、ラスタースキャンをする際は検出器ステージとサンプルステージの速度比を 2 : 3 にしなければならない。さらに今回の測定では、望遠鏡を衛星座標と対応させるようにしており、6.102 のように配置した。この configuration を Q4II と定義する。

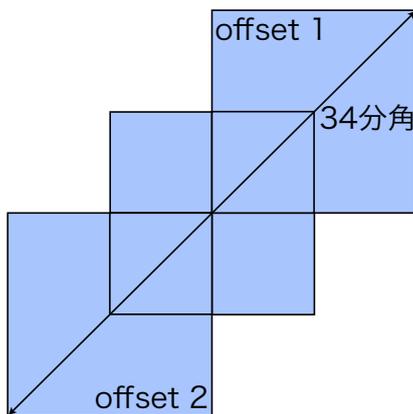


図 6.101: 検出器を上下にずらすことで SXI の視野をカバーする。

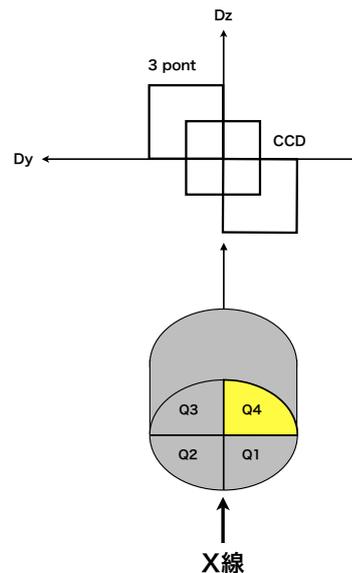


図 6.102: PSF tail 測定の概念図。

6.10 PSF (Point Spread Function) の tail 測定

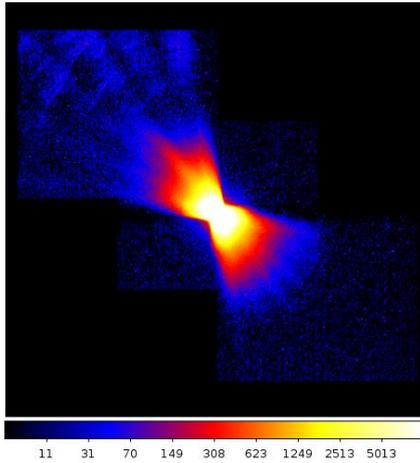


図 6.104: Al-K α のイメージ。

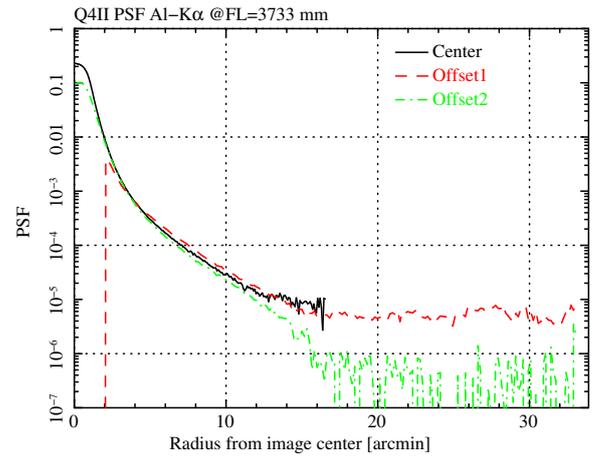


図 6.105: Al-K α における PSF tail。

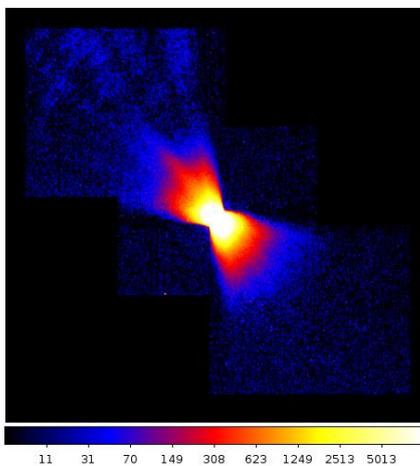


図 6.106: Ti-K α のイメージ。

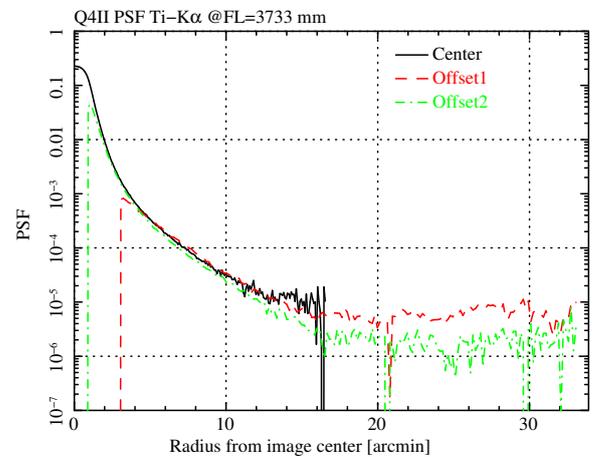


図 6.107: Ti-K α における PSF tail。

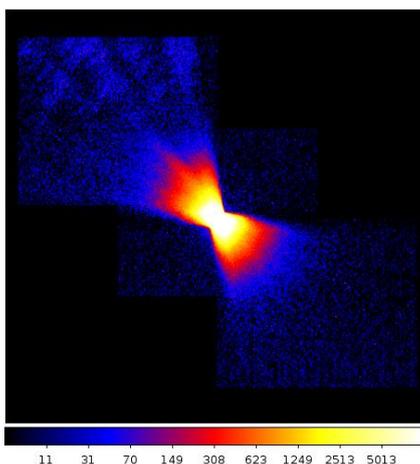


図 6.108: Cu-K α のイメージ。

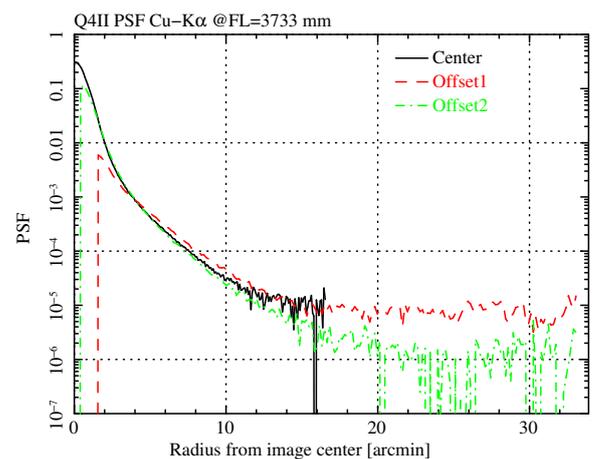


図 6.109: Cu-K α における PSF tail。

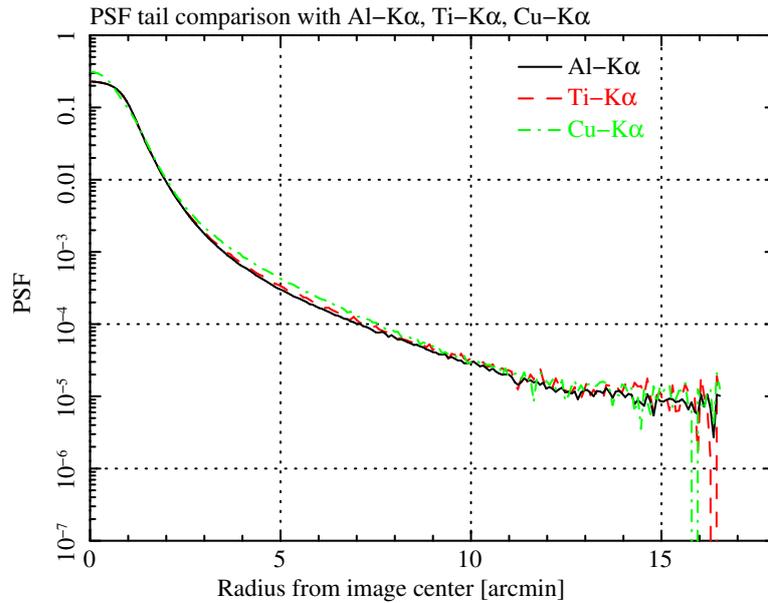


図 6.110: Al-K α 、Ti-K α 、Cu-K α における PSF tail の比較。

6.11 迷光

視野外から洩れ込む迷光は、特に銀河団や宇宙 X 線背景放射などの広がった天体の観測精度を大きく低下してしまう。この迷光を極力抑えるために、SXT の反射鏡直上には薄い円筒遮蔽版 (120 μm) を同心円状に並べたプリコリメータを搭載している。プリコリメータは光軸から大きくはずれた X 線光路のみを遮断するため、光軸方向の有効面積を減らすことなく、迷光の主成分である secondary 成分の X 線を効率よく遮断できる。

ここでは、プリコリメータによって遮断しきれなかった迷光の洩れ込みや分布パターンについて検証を行う。

6.11.1 プリコリメータによる secondary only 成分の遮断

図 3.9 のシミュレーションでもわかるとおり、迷光の主な成分は secondary only 成分である。この迷光を極力遮断するような構造を持たせたものがプリコリメータである。迷光の主成分である secondary only 成分は一段目の反射鏡の上端すれすれの所を通過する。そのためこの成分を効率良く取り除くためには、望遠鏡と同じように同心円上に多数の円筒薄板を並べたものを真上に搭載すれば良い。これがプリコリメータである。ただし、逆にわずかに光軸からはずれた正常 2 回反射を行なって焦点面上に結像する X 線も止めてしまうために、X 線望遠鏡の視野を狭くしてしまうというデメリットもある。図 6.111 にプリコリメータの概念図及び断面図を示す。

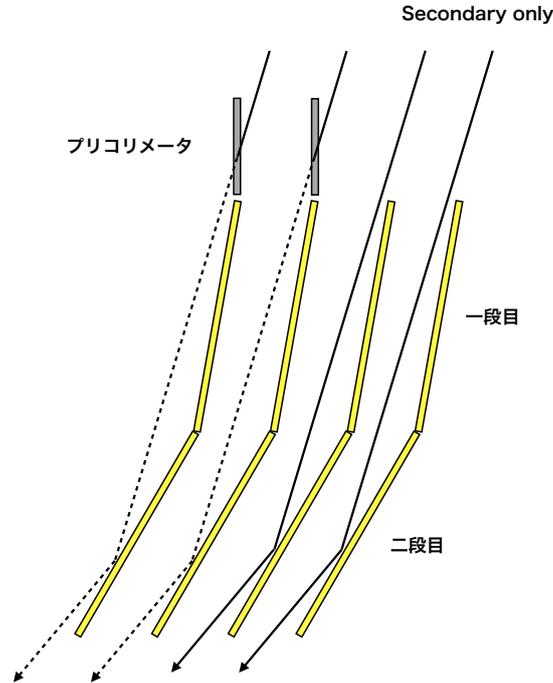


図 6.111: プリコリメータを搭載した望遠鏡の断面図。一段目のフォイルの真上に望遠鏡と同じ同心円上の円筒を立てることで、反射鏡すれすれを通過する迷光を取り除くことができる。

図 6.112 に、プリコリメータを考慮した場合の ASTRO-H に搭載される SXT のシミュレーション結果を載せる。図中の数字は反射鏡の番号 (図 6.113) と対応しており、1 = primary 表面、2 = secondary 表面、3 = primary 背面、4 = secondary 背面、5 = pre-colimator 表面、6 = pre-colimator 背面と定義している。また、括弧の「NO.1」は一番内側の反射鏡であることを意味している。例えば「12」反射は正常二回反射成分を、「2(No.1)」反射は一番内側の反射鏡の secondary only 成分を表している。図の内側の四角 (赤) と丸 (黄) の領域はそれぞれ測定で用いた X 線 CCD カメラと P.C. の視野を表しており、外側の四角 (青) は SXI の視野を表している。 $+30'$ では一番内側の反射鏡を通り抜ける direct 成分が視野の中心付近に見え、SXI の視野の右下にはプリコリメータによって遮断しきれなかった secondary 成分が見えているのがわかる。また、 $-30'$ では一番内側の反射鏡による primary only 成分が見えているのがわかる。その他プリコリメータの反射鏡を介した反射のパターンも見えるが、そのレベルは主成分の迷光に比べて低い。

6.11 迷光

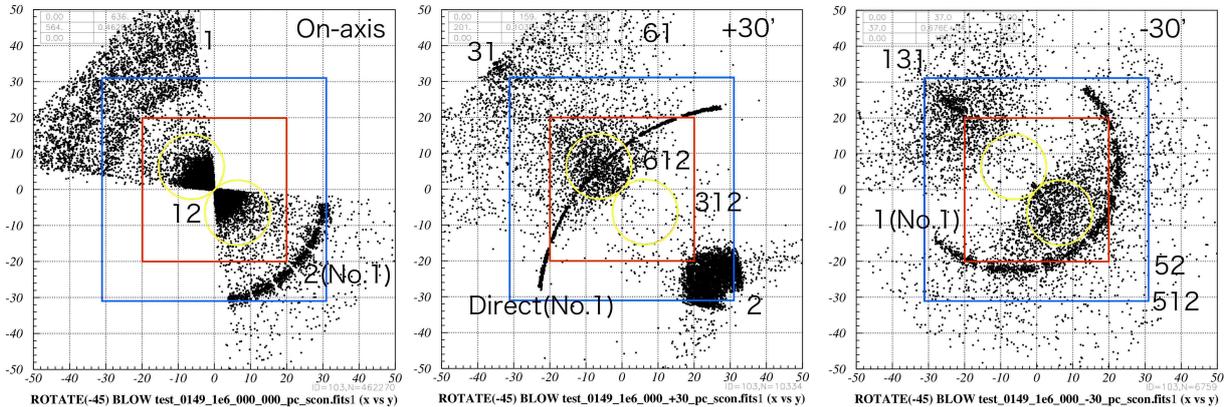


図 6.112: Ray-tracing によるシミュレーション。左: On-axis、中央: +30'、右: -30'。

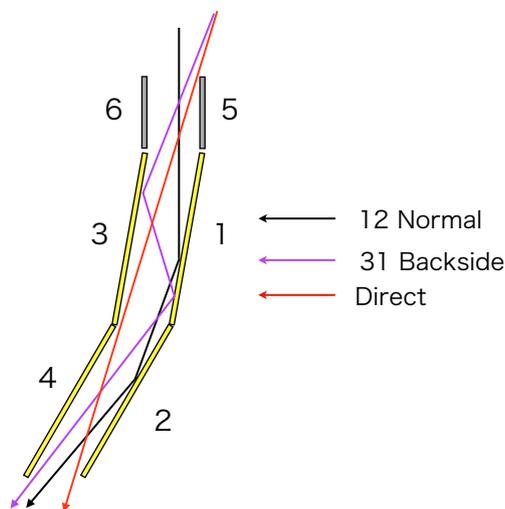


図 6.113: 迷光の経路。反射鏡に番号を振って光子の反射経路を定義する。

6.11.2 測定方法

6.11.1 では、 $\pm 30'$ の off-axis 角における迷光をシミュレーションした。実際の測定でも同じ off-axis 角での測定を行い、迷光の出るパターンを確かめ、その有効面積を調査しておく。また、シミュレーションでは主に一番内側の反射鏡に関する成分が支配的であることがわかった。このことから、一番内側の反射鏡に X 線を当て、大角度の off-axis 角における迷光のパターン、さらにはセクター毎の迷光など、ローカルな部分の測定を行った。

迷光の測定は X 線軸に対して望遠鏡を傾け、視野外から X 線がくる状況を擬似的に作る。そのため、今まで望遠鏡光軸と検出器中心は直線上にあったが (end-to-end と表現する) 迷光では望遠鏡光軸を傾けると焦点距離にある検出器は end-to-end からはずれてしまう。よって、望

6.11 迷光

遠鏡を θ だけ傾けた場合、検出器は $\Delta x = f \tan \theta$ だけ動かして測定する必要がある。なお、検出器の位置は PSF tail の測定で設定した 3733 mm に置いている。Configuration は衛星座標に対応するように配置し (図 6.114)、測定する Quadrant は Q4 とした。理由は、(1)HPD が最も良い、(2)有効面積が他の Quadrant に比べて小さいことから、プリコリメータがずれて搭載されている可能性を調査する、というものである。さらに SXT と対を成す SXI の視野は一辺が 38 分角と広く、測定に用いてる CCD の視野では全体を一度に見ることはできない。そのため、CCD の撮像箇所を 3 つに分けて測定をした。

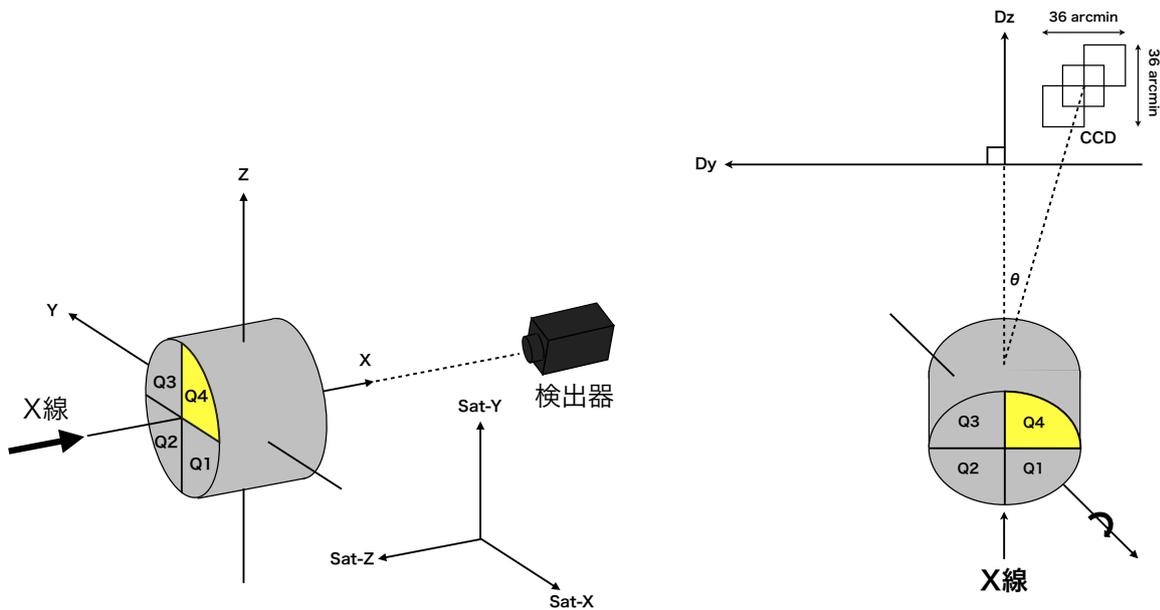


図 6.114: Quadrant の配置の定義と測定方法の概念図。

以下に測定項目とその方法を説明する。

±30' における迷光

望遠鏡を +30' (-30') に傾け、ラスタースキャンを行う。撮像ポイントは結像位置と、そこを中心とした右上と左下の計 3 つの領域を撮る (図 6.114)。ターゲットは Al-K α 、スリットサイズは 8 × 8 mm とした。

最内側の反射鏡による迷光

最も内側にある反射鏡に X 線を当て、-60' から +60' の範囲を 1' ピッチ毎に 1 枚撮像し、迷光のパターンを見る。ターゲットは Al-K α と Cu-K α 、スリットサイズは 8 × 8 mm とした。

セクター毎の迷光

Q4を含む全てのQuadrantにおいて、7種類の off-axis 角で迷光パターンを見る。ただしラスタースキャンは測定時間が膨大なため、セクターを 1line だけラスタースキャンすることで時間の短縮を図る。

Quadrant にはセクターが 8 つある。それぞれのセクターをビームライン y 軸に平行 (ビームライン z 軸に垂直) になる位置に置き、最内側の反射鏡から最外側の反射鏡を、 y 軸に沿って平行にスキャンする。スキャンが終わったら望遠鏡を回し、次のセクターに移動させ同様にスキャンする。このように各 off-axis 角について $8 \times 4 = 32$ 本のセクターをスキャンする。図 6.115 にセクタースキャンの該線図を示す。off-axis 角は $\theta = -30', -15', 0', 15', 30', 45', 60'$ の 7 種類。ターゲットは Al-K α 、スリットサイズは 8×8 mm とした。

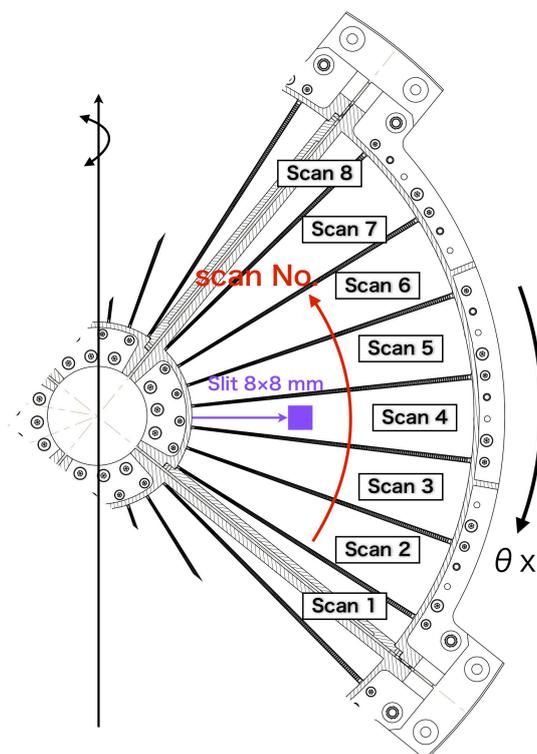


図 6.115: セクタースキャンの概念図。

6.11.3 測定結果

望遠鏡を $\pm 30'$ 傾けたときの迷光の分布イメージと、その有効面積（図 6.116, 6.117 の緑の円内）を表 6.24, 6.117 まとめる。off-axis 角が $+30'$ の迷光では右下に secondary only 成分が見え、中央やや左上には No.1 の反射鏡とハウジングの間をすり抜ける direct 成分が弧状に現れている。また、off-axis 角が $-30'$ の迷光では 52 反射と 131 反射が見えた。これらはいずれもシミュレーションで予測された迷光を確認することができたが、No.1 の反射鏡による primary only 成分は確認されなかった。

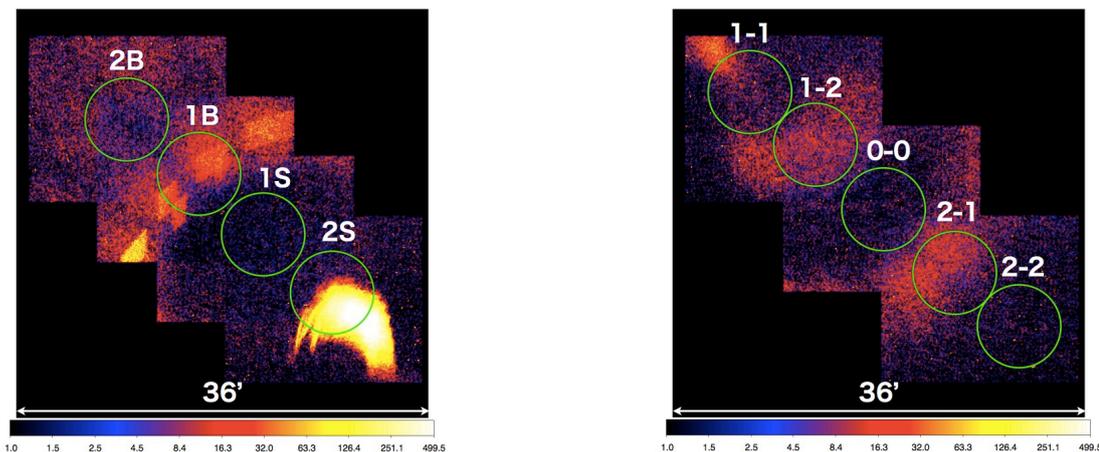


図 6.116: off-axis 角 $+30'$ における迷光の分布。図 6.117: off-axis 角 $-30'$ における迷光の分布。

Pos.ID	EA [cm ²]
1S	0.01
2S	0.59
1B	0.07
2B	0.03

表 6.24: off-axis 角 $+30'$ における迷光の有効面積。

Pos.ID	EA [cm ²]
0-0	0.01
0-1	0.02
0-2	0.04
1-0	0.04
1-1	0.02
1-2	0.04
2-0	0.01
2-1	0.05
2-2	0.00

表 6.25: off-axis 角 $-30'$ における迷光の有効面積。

6.11 迷光

続いて最も内側にある (No.1) 反射鏡に X 線を当てた時の迷光の分布の結果についてまとめる。off-axis 角は $-60'$ \sim $+60'$ の範囲を $1'$ ピッチ毎に 1 枚撮像し、迷光のイメージを取得した。エネルギーは Al-K α と Cu-K α である。有効面積の off-axis 角依存性を見ると、図 6.118 の $+\theta$ 側に見られる secondary only 成分と direct 成分が顕著である。その大きさはどちらも同程度で、正常 2 回反射の $\sim 20\%$ 程度である。

また、Al-K- α において、SXS の視野 ($\sim 3 \times 3$ 分角) で有効面積を見積もると、primary only 成分や secondary only 成分、direct 成分はほとんど寄与していないことがわかった (図 6.119)。ただしこれは光軸の位置と SXS の視野中心が完全に一致している場合である。SXS にはエラーバジェットが最大で 2 分角であるため、視野は最大で 7 分角になる。この場合の迷光の有効面積を見積もると、primary only と secondary only 成分の一部が視野内に入ることがわかった。図 6.120、6.121 に $1'$ ピッチごとの迷光のイメージを示す。

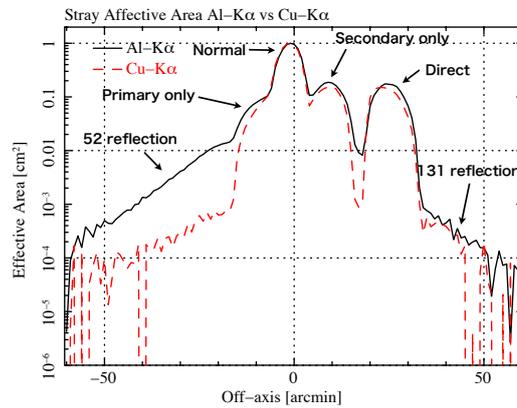


図 6.118: Al-K α と Cu-K α の有効面積の比較。

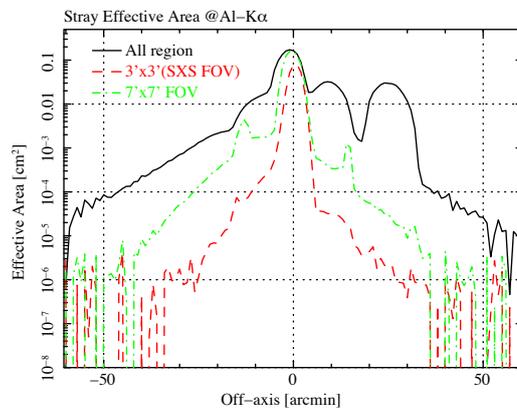


図 6.119: イメージ全体の有効面積と SXS の視野での有効面積の比較。

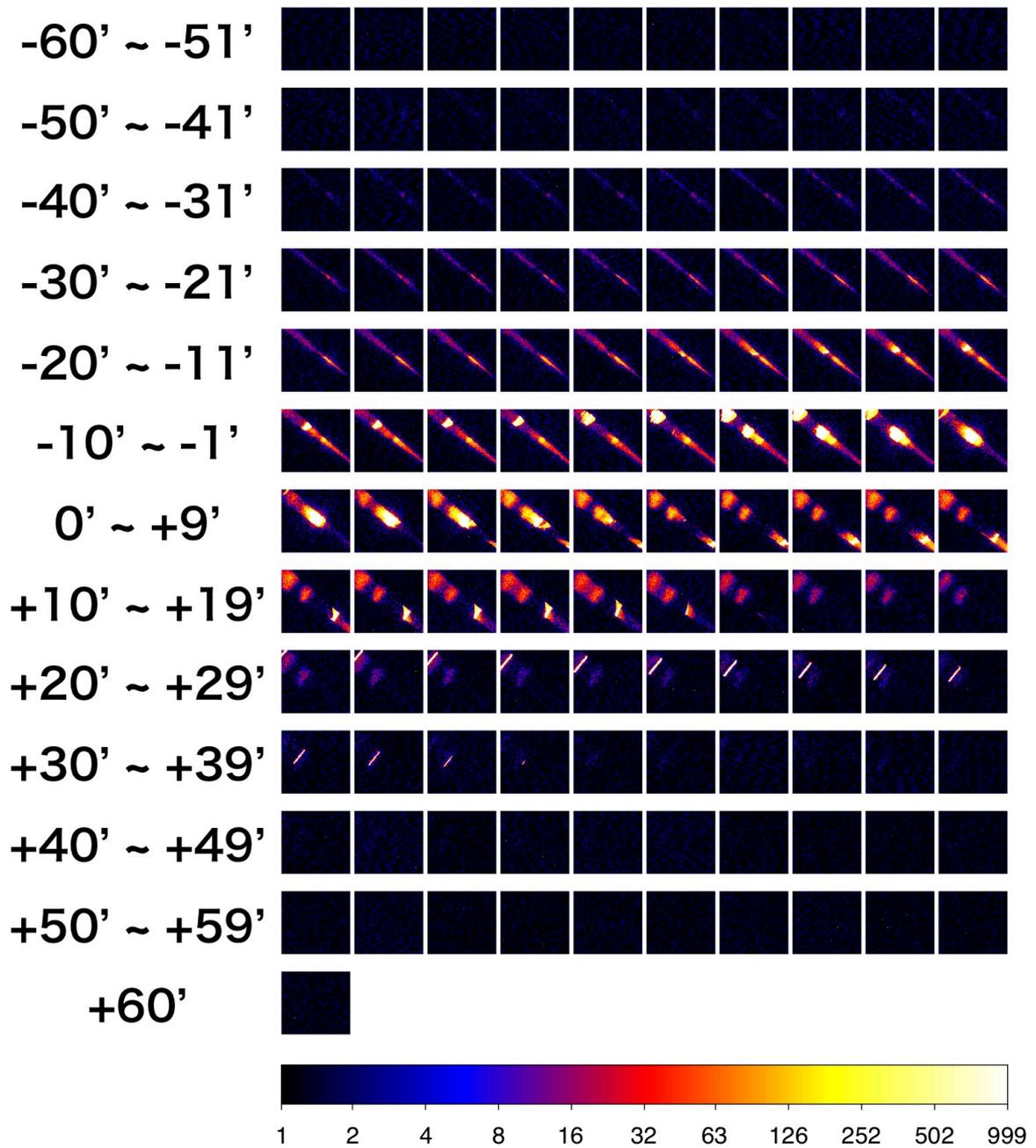


図 6.120: $-60' \sim +60'$ の迷光のイメージ。1' ピッチ。@Al-K α

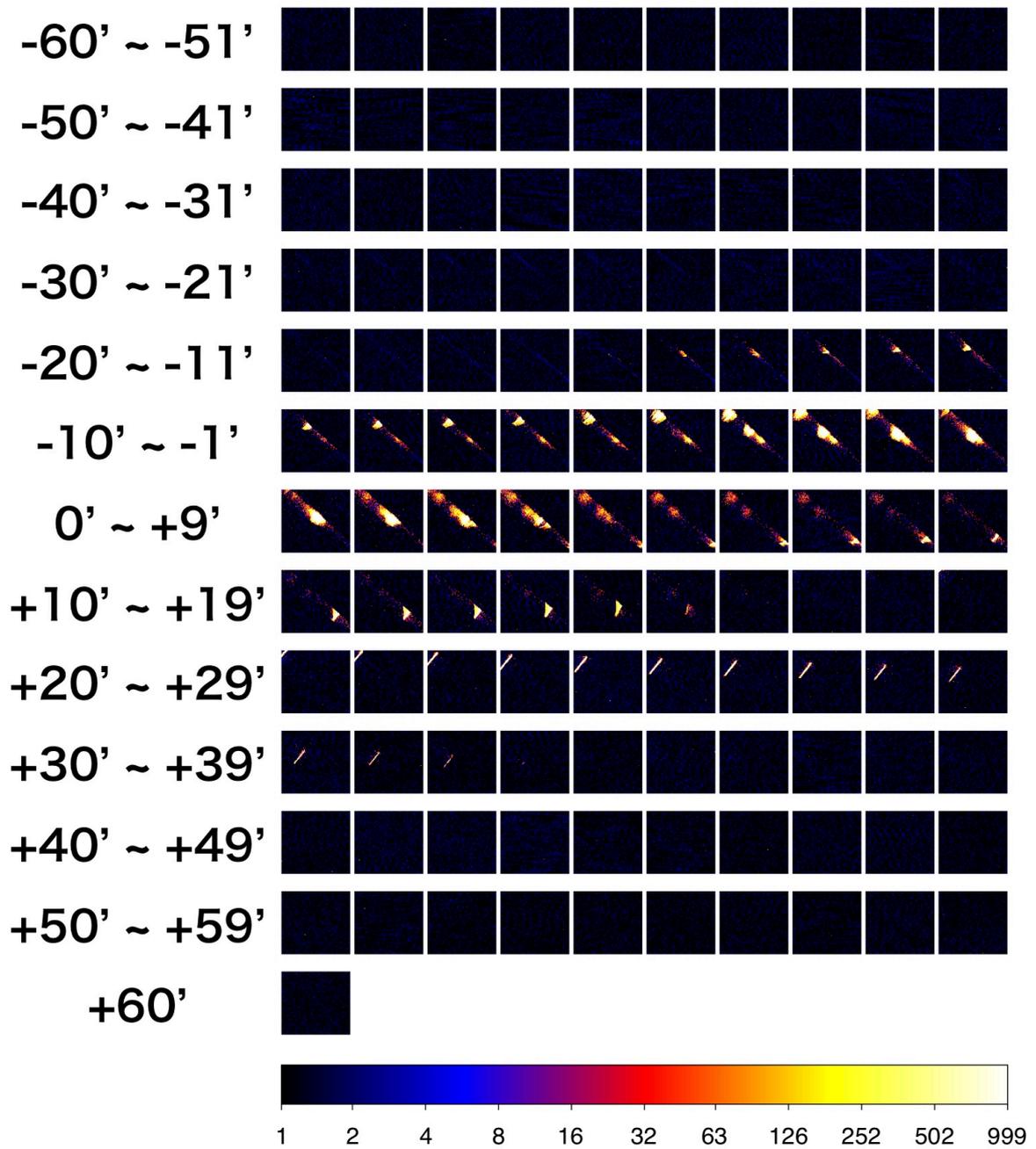


図 6.121: -60' ~ +60' の迷光のイメージ。1' ピッチ。@Cu-K α

6.11 迷光

ここまでの迷光測定で、No.1 による primary only 成分が検出器内に入り込んでいることがわかった。SXS の視野内 (3 分角) にはその寄与はほとんどないものの、他の反射鏡による想定外の迷光が洩れ込んでくることも予想される。ここでは、off-axis 角を変えたときの ($\theta = -30', -15', 0', 15', 30', 45', 60'$) セクター毎の迷光分布パターンを調査した。図 6.122 ~ 6.135 に、角度順にそのイメージと有効面積の結果 (全有効面積, secondary 側 EA, backside 側 EA) をまとめる。

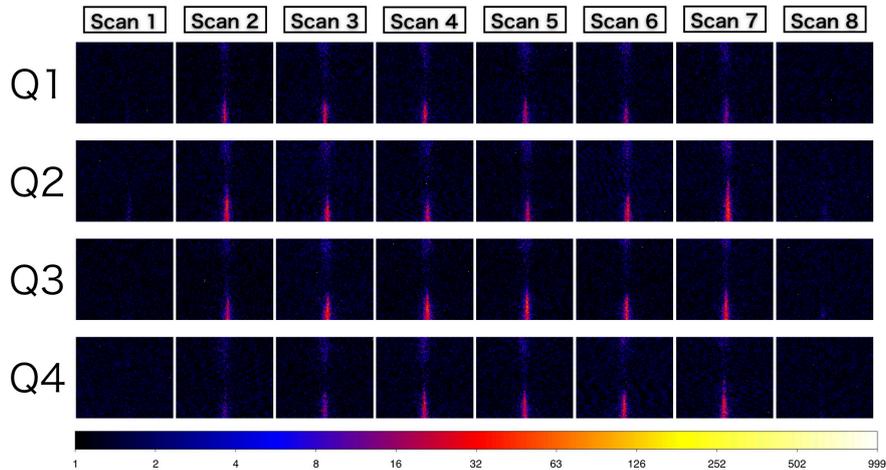


図 6.122: off-axis 角 $-30'$ におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α

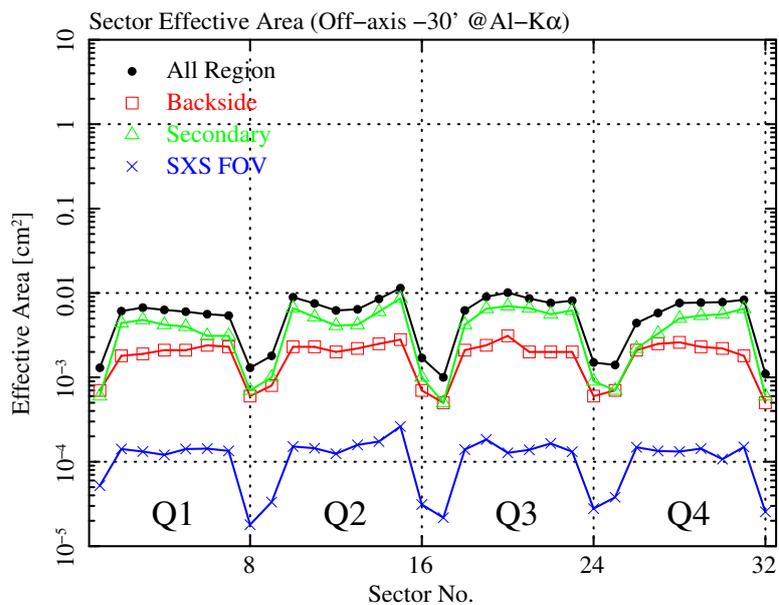


図 6.123: off-axis 角 $-30'$ におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α

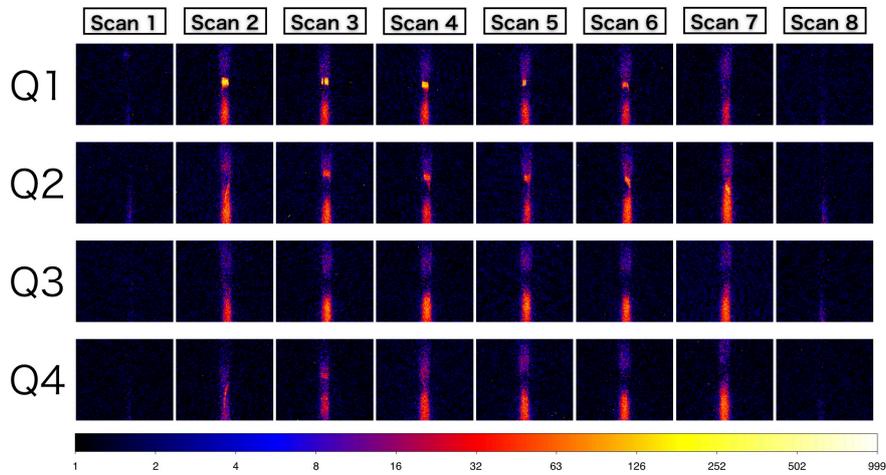


図 6.124: off-axis 角 $-15'$ におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α

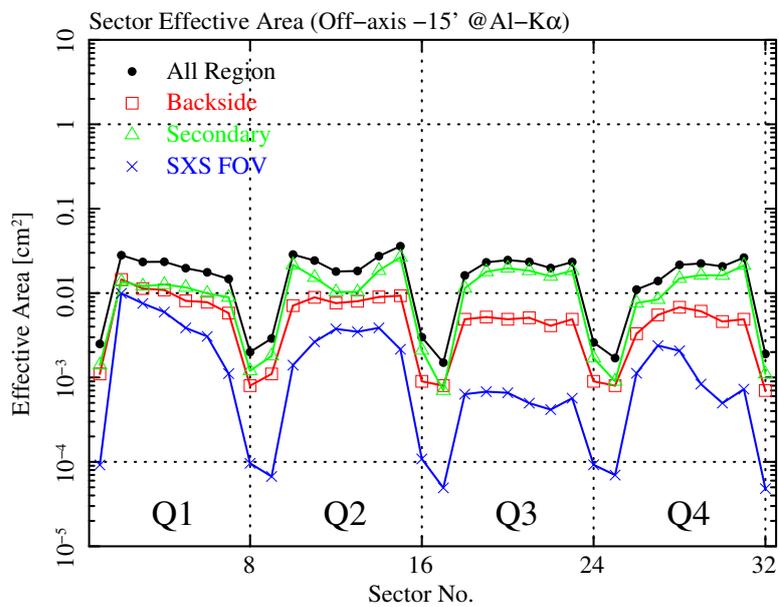


図 6.125: off-axis 角 $-15'$ におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α

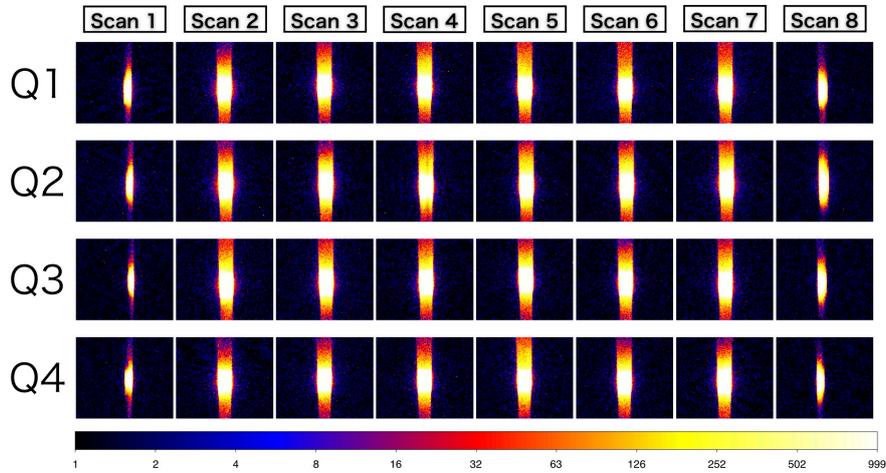


図 6.126: on-axis におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α

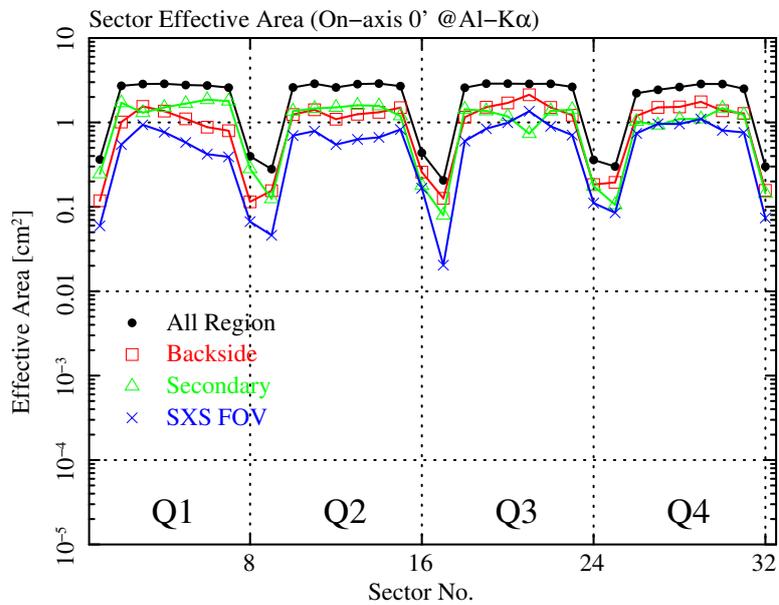


図 6.127: on-axis におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α

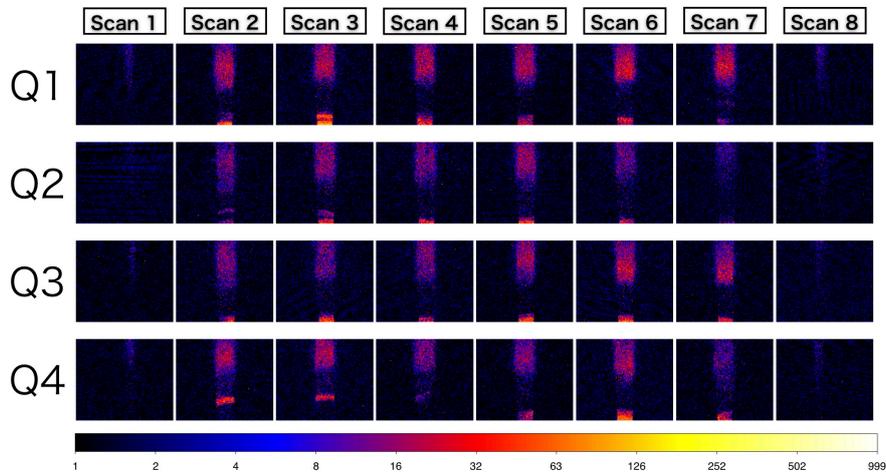


図 6.128: off-axis 角 +15' におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α

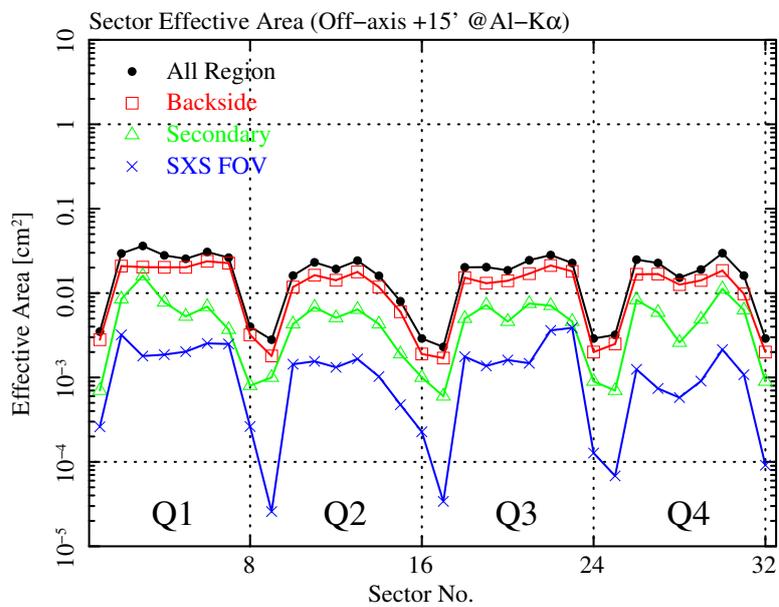


図 6.129: off-axis 角 +15' におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α

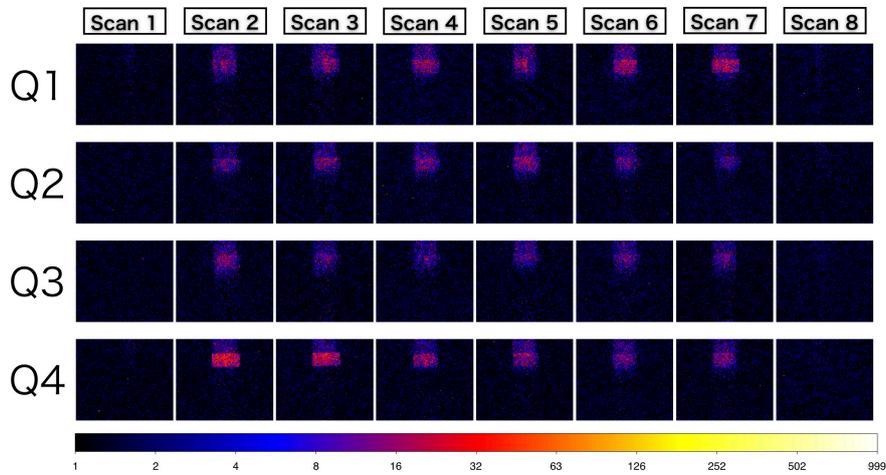


図 6.130: off-axis 角 +30' におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α

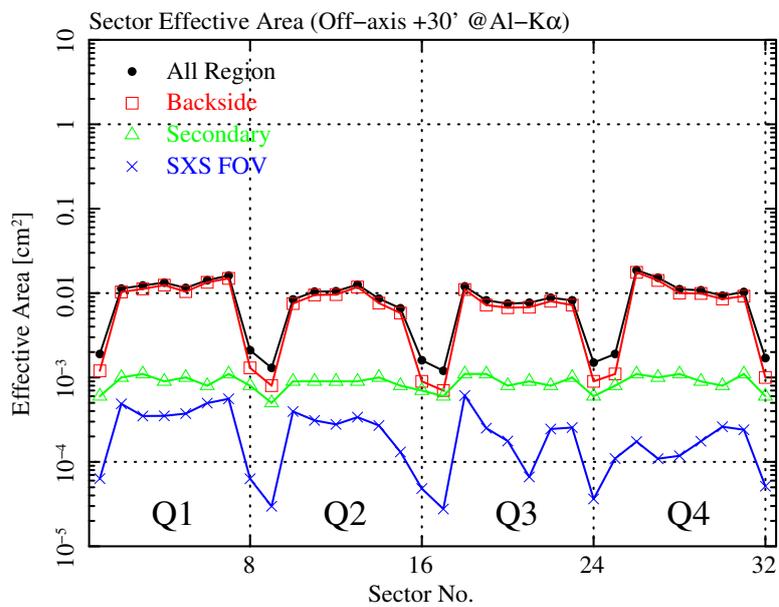


図 6.131: off-axis 角 +30' におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α

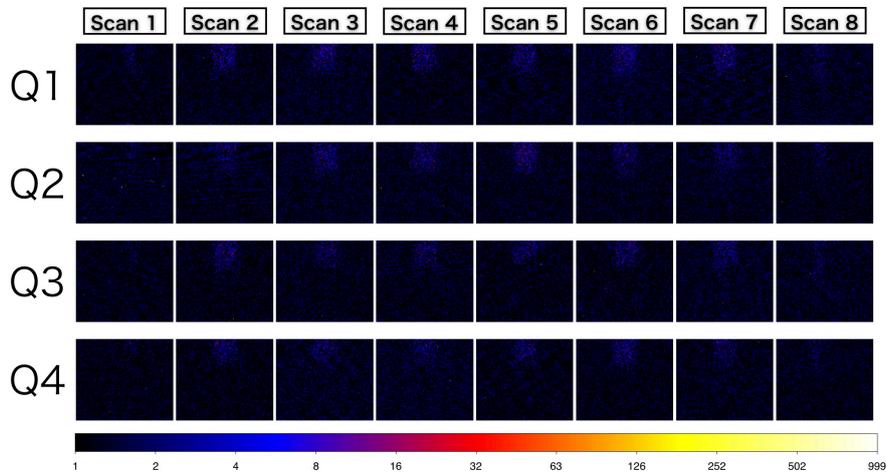


図 6.132: off-axis 角 +45' におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α

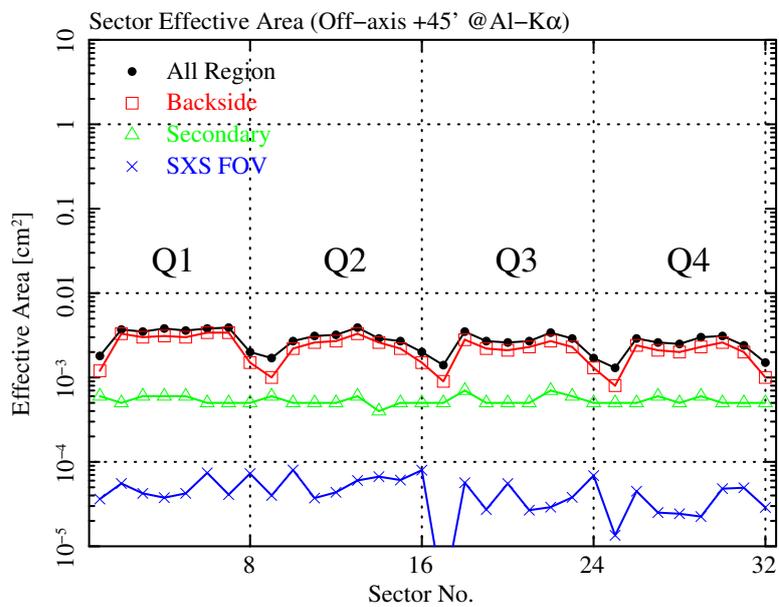


図 6.133: off-axis 角 +45' におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α

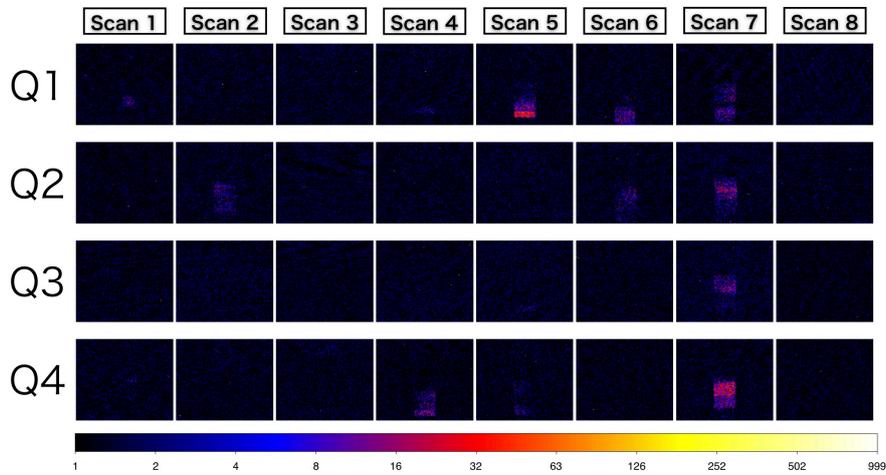


図 6.134: off-axis 角 $+60'$ におけるセクターの迷光のイメージ。@Al-K α

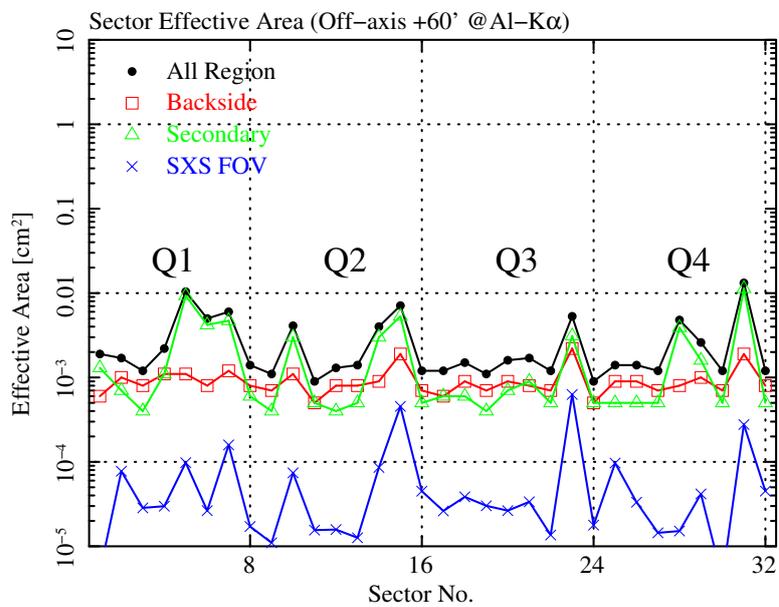


図 6.135: off-axis 角 $+60'$ におけるセクターの迷光の有効面積。@Al-K α

第7章 X線測定 ～ローカルな部分の性能評価～

第6章では主に Quadrant 単位でラスタースキャンを行い、望遠鏡全体の総合的な性能評価を行った。しかしラスタースキャンは一度に望遠鏡全体をスキャンしてしまうため、ローカルな部分の性能について評価するのは困難である。そこでこの章では、スポットスキャンという新たな手法を用いて、望遠鏡のローカルな部分の性能について評価をする。スポットスキャンとは、Quadrant を 8×8 mm を単位とした領域で分けし、その領域一つひとつの性能を評価するというものである。この手法を使えば望遠鏡のローカルな部分の結像性能が評価でき、イメージが広がる要因の調査も可能になる。

7.1 結像性能劣化の要因

X線望遠鏡で結像性能を老化させる主な要因は、Wolter I型による円錐近似、反射鏡の位置決め誤差、反射鏡表面の形状誤差の三つである。

以下に結像性能を老化させる主な要因について説明する。

1. 円錐近似

ASTRO-H に搭載される SXT は、回転双曲面鏡と回転放物面鏡を用いた 2 回反射により集光する Wolter I 型光学系を採用しているが、回転双曲面鏡と回転放物面鏡は非常に製作が困難であるため、二次曲面を円錐で近似した反射鏡を用いている。そのため、円錐近似によるイメージは 1 点に集光せず、必ず広がりを持ってしまう (図 7.1)。この広がり $\text{HPD}_{\text{円錐近似}}$ を見積もってみると、

$$\text{HPD}_{\text{円錐近似}} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{L \tan \theta / \cos 4\theta}{F} \right) = 20 \text{ 秒角}$$

θ : 入射 X 線と反射鏡のなす角 $\sim 0.59^\circ$

L : 光軸方向への反射鏡の長さ = 100 mm

F : 焦点距離 = 5600 mm

となる。SXT の設計上、この 20 秒角が原理的な結像性能の限界となる。

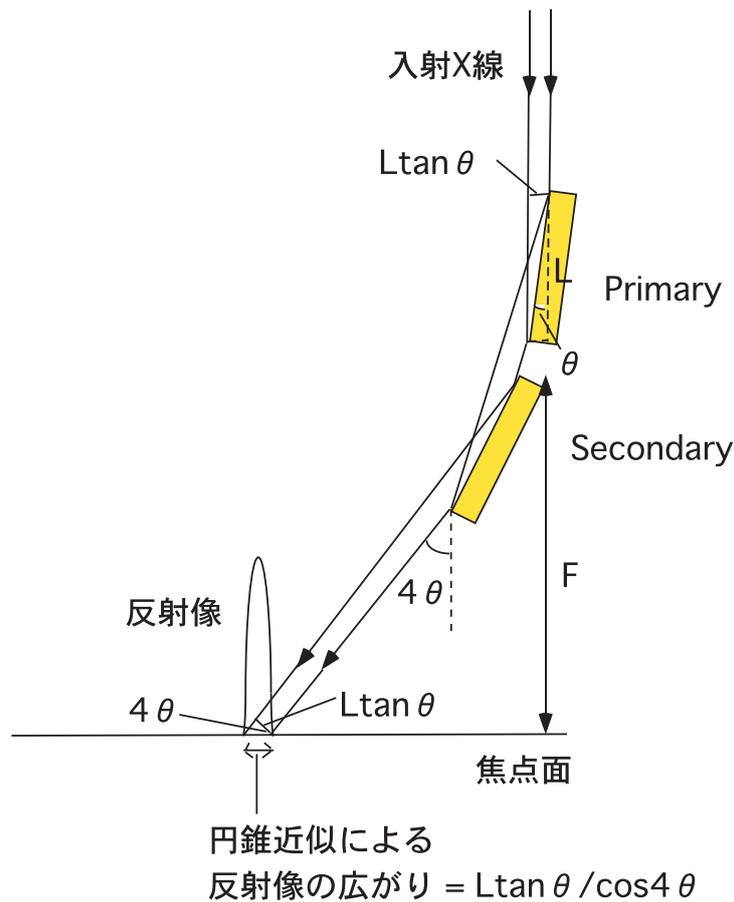


図 7.1: 反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり。

2. 形状誤差

多重薄板型 X 線望遠鏡の反射鏡は数百 μm と非常に薄い。そのため、反射鏡鏡面に数 mm のスケールの大きなうねりを生じてしまい、入射 X 線が様々な方向に反射され、焦点面での像が広がってしまう (図 7.3)。この像の広がり の要因を、反射鏡鏡面の形状誤差と呼ぶ。本来、厳密な形状誤差の見積もりは一組の反射鏡に X 線を当て、鏡面のうねりを反射鏡各点の法線ベクトルの揺らぎを用いて求めることができる。ただし、ここではスポットスキャンによる形状誤差の見積もりを試みることにする。各スポットの結像位置は主に位置決め誤差によりばらつく。よって、各スポットの結像位置を一点 (例えば Quadrant の結像位置) に揃えて解析し、位置決め誤差を無くすことによって形状誤差を見積もる (図 7.2)。

7.1 結像性能劣化の要因

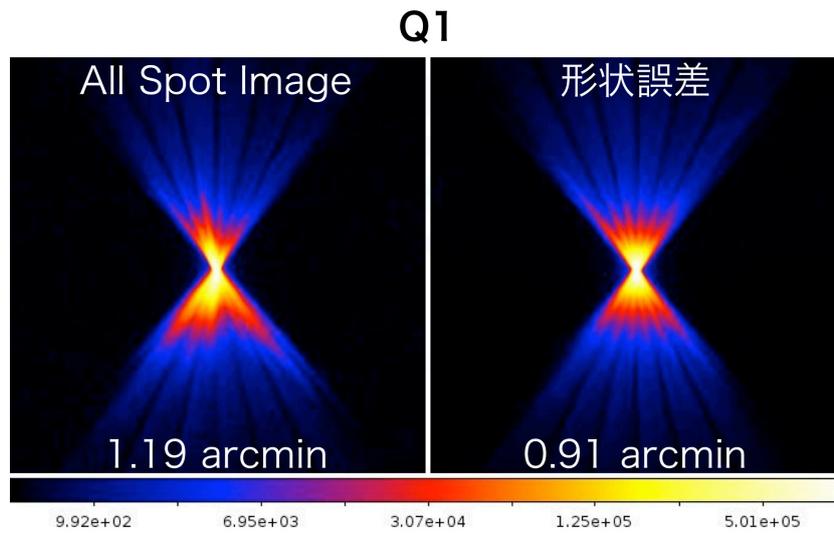


図 7.2: 左：スポットスキャンのイメージ、右：各スポットでの結像位置を一点に合わせたイメージ。

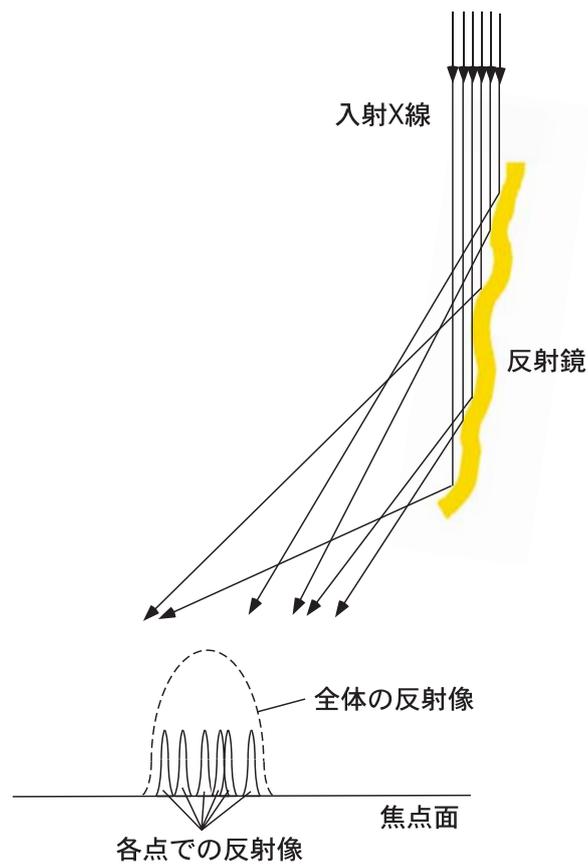


図 7.3: 反射鏡の形状による像の広がり。

7.1 結像性能劣化の要因

3. 位置決め誤差

Wolter I型により生まれる結像性能の劣化には、円錐近似の他に位置決め誤差がある。Wolter I型は2回反射による2枚一組の反射鏡を用いている。そのため、この2枚の反射鏡が正しい角度・位置で配置されていないとイメージは広がってしまい(図7.6) 結像性能の劣化に繋がる。位置決め誤差は、Quadrantの結像位置と各スポットの結像位置の距離を求め、Quadrantの結像位置から測定点の半数が収まる直径と定義する(図7.4, 7.5)。例えば図7.5における位置決め誤差は、Quadrantの結像位置から半数の測定点が入る距離が $0.36'$ なので、 $HPD_{\text{位置決め誤差}} = 0.36' \times 2 = 0.72'$ となる。

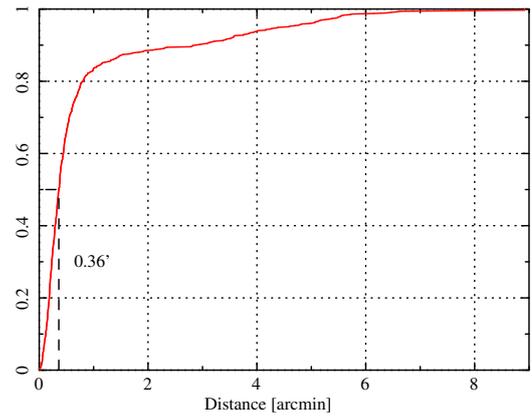
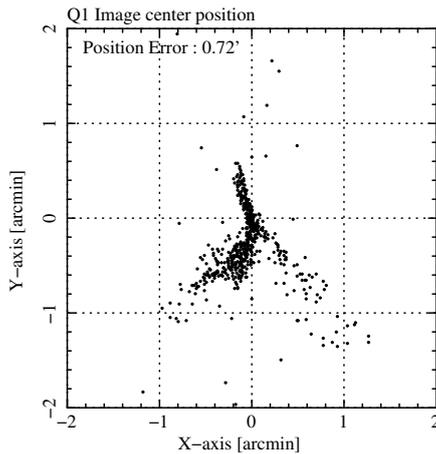


図 7.4: 各スポットの結像位置のばらつきの例。原点が Quadrant の結像位置となっている。

図 7.5: Quadrant の結像位置から測定点の半数が収まる直径を位置決め誤差とする。縦軸は測定数で規格化している。

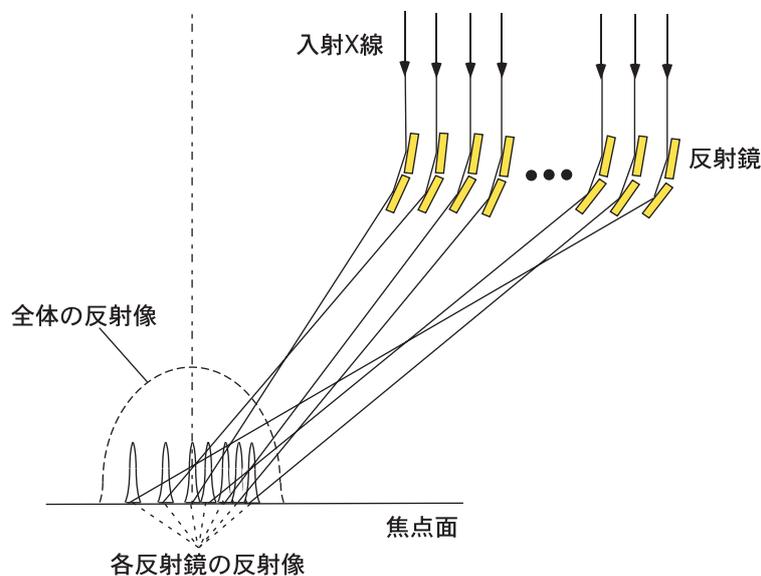


図 7.6: 反射鏡の位置決めによる像の広がり。

7.2 結像性能劣化要因の分離

結像性能を決める主な要因は円錐近似、位置決め誤差、形状誤差の詳しく議論したが、実際に望遠鏡ではそれらの要因がどの程度結像性能の劣化に寄与しているのか知ることは、光学特性の理解と、X線望遠鏡への改善点を探るという両方の点で非常に重要である。これらの誤差がどの程度望遠鏡の結像性能に影響を与えているか明らかにするために、Quadrantに 8×8 mmのX線ビームをくまなく当て、ローカルな領域の性能評価を行う。この場合、数枚の反射鏡に一度にX線が当たるため、像の広がりを生む円錐近似と形状誤差の分離はできない。そのため、7.1章で述べた形状誤差の定義に円錐近似も含まれるとして考える。以上を踏まえると、Quadrantの結像性能は以下のように表される。

$$\text{HPD}_{\text{Quadrant}}^2 = \text{HPD}_{\text{形状}}^2 + \text{HPD}_{\text{位置}}^2 \quad (7.1)$$

これらの結像性能劣化のHPDを実際に求め、QuadrantのHPDを定量的に表せるかを議論する。また、各スポット領域のHPDや反射する光量の度合いを求め、二次元ヒストグラムを作った。

7.2.1 測定方法

7.1で前述した通り、望遠鏡のローカルな部分の結像性能を評価するため、スポットスキャンという手法を用いて測定を行う。スポットスキャンは、Quadrantを 8×8 mmを単位とした領域に区分けし、各スポットの結像性能を評価するものである。この場合、ラスタースキャンと比べてX線を反射する領域は非常に小さく、統計が少ないとイメージのコアの部分がぼやけてしまい、正しく結像位置を見積もることは難しい。そこで、望遠鏡を実際の焦点距離の位置に置くことで、よりコアを精度良く測定することを試みる。

SXTの焦点距離は5600 mmと設計されているが、これは無限遠にある点源に対する焦点距離である。宇宙研ビームラインは30mと長く、平行度が非常に高いが、X線の光源は有限の距離にあるため、X線は拡散光となってしまう。そのため、実際にイメージが結ぶ焦点は設計値より長くなる。この、拡散光を考慮した焦点距離はレンズの公式(図7.7)から得ることができる。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (7.2)$$

ここで a は光源から望遠鏡中心(PrimaryとSecondaryの境界)までの距離、 b は拡散光を考慮した焦点距離、 f は望遠鏡の焦点距離である。 a は測距離計で測定しており、 $a = 26.712$ mとなっている。また、 $f = 5.600$ mである。これらを代入して b について解くと、

$$\begin{aligned} b &= \frac{a \cdot f}{a - f} \\ &= \frac{26.712 \times 5.600}{26.712 - 5.600} \\ &= 7.085 \text{ m} \end{aligned} \quad (7.3)$$

7.2 結像性能劣化要因の分離

となり、実際にイメージを結ぶ焦点は 7.085 m であることがわかる。測定はこの位置に検出器を置いて行った。

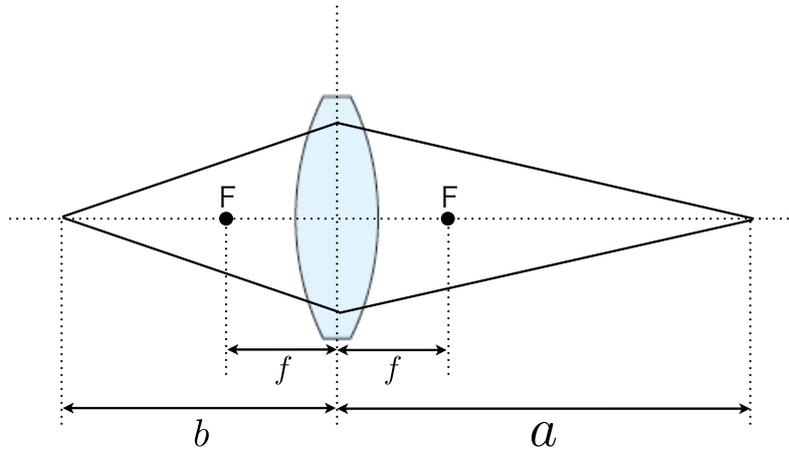


図 7.7: レンズの公式。

以上のセットアップを踏まえ、Quadrant を図 7.8 のようなスポットの領域に分けて測定を行う。Configuration は C-side で行う。理由は、拡散光を考慮した焦点距離に検出器を置いたため、検出器ステージのワーク範囲が広くなり、C-side でしか測定できないためである。また、エネルギーは Ti-K α とした。測定点は計 653 点ある。

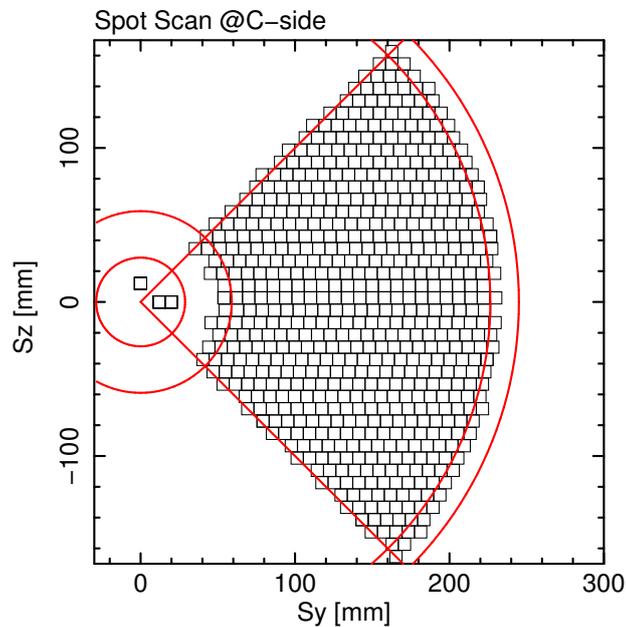


図 7.8: スポットスキャンの概念図。

7.2.2 測定結果

スポットスキャンにより得られたイメージを次のページ以降に載せる。拡散光を考慮した焦点距離の位置に検出器を置いたため、コアがよりシャープになっているのがわかる。また、各スポットの結像位置を揃えたイメージとその形状誤差の HPD、結像位置のばらつきの HPD を示す。結像位置のばらつきは、領域を半径毎・位相角毎の 6 分割に分け、そのばらつきの傾向を調査した。さらに各スポットの HPD、Quadrant の結像中心からの各スポットの結像中心のずれ、Quadrant の結像位置を中心にして求めたときの各 spot の HPD、各スポットが反射する光量の度合いを二次元ヒストグラムとして表した。図 7.89 に各 Quadrant の形状誤差と位置決め誤差を載せる。これら形状誤差と位置決め誤差から算出した HPD は、実際の Quadrant の HPD と consistent であることがわかった (表 7.2)。

表 7.1: 測定条件。

Config.	Q1C
Target	Ti-K α
Slit size	8 × 8 mm
Measure Point	各 Quadrant 全領域 計 653 点
FL	7085 mm
Detector	X 線 CCD カメラ

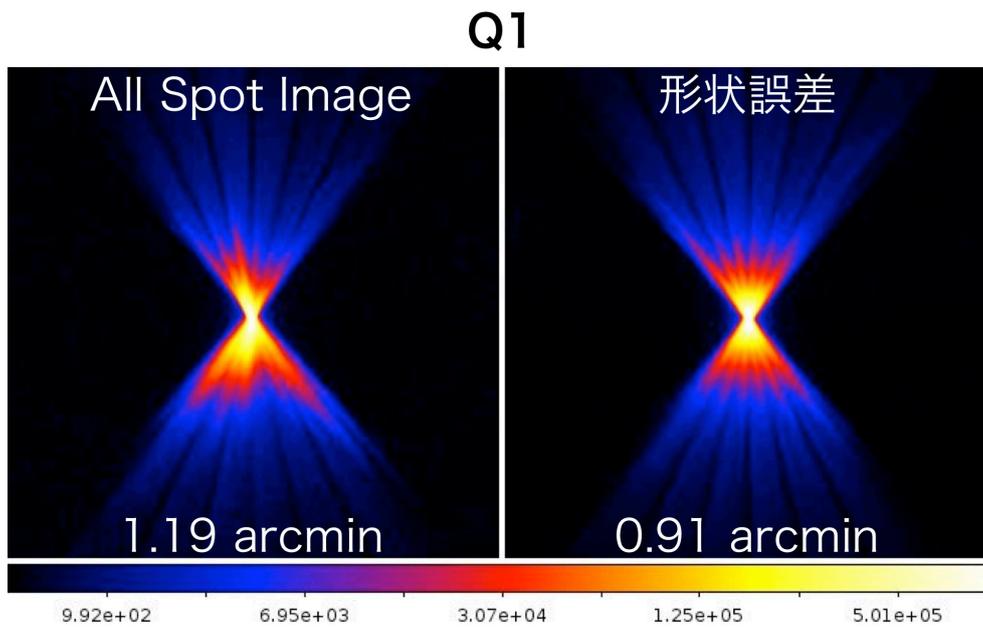


図 7.9: 左 : Q1 のスポットイメージ、右 : 各スポットでの結像位置を一点に合わせたイメージ。

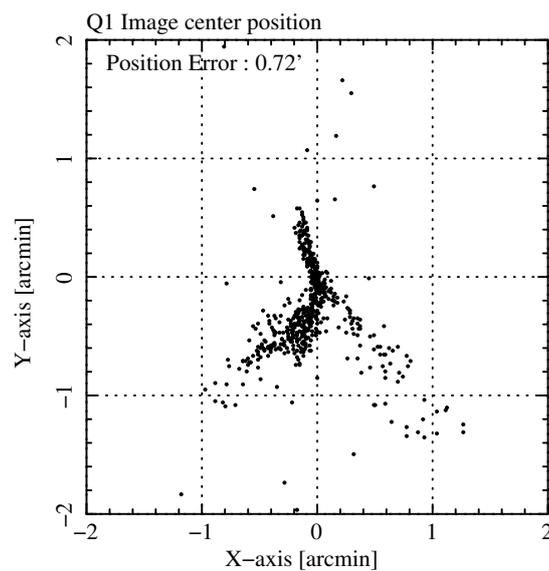


図 7.10: 各スポットにおける結像位置のばらつきの分布。

7.2 結像性能劣化要因の分離

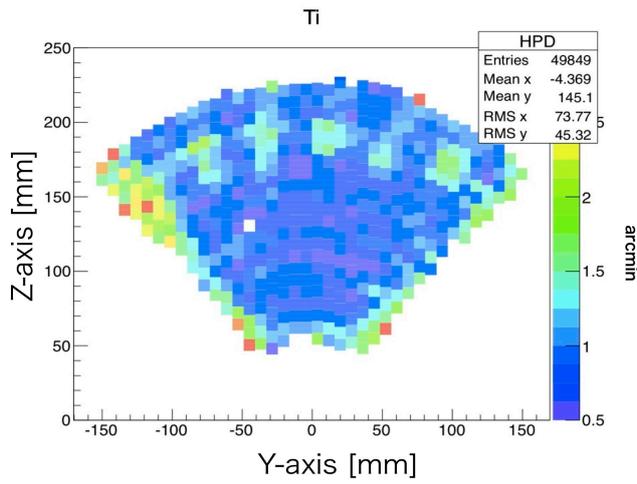


図 7.11: 各スポットの HPD マップ。

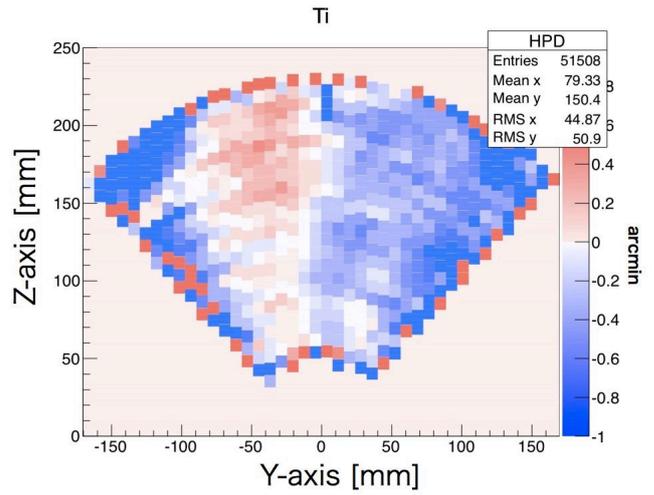


図 7.12: Quadrant の結像位置から各スポットの結像中心のずれ。

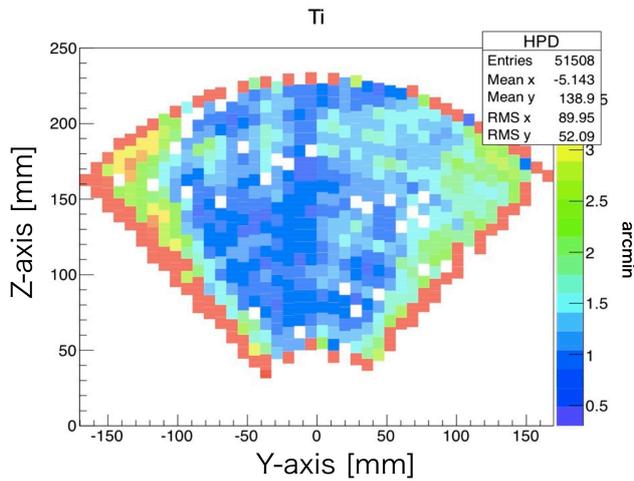


図 7.13: Quadrant の結像位置を中心にして求めた各 spot の HPD マップ。

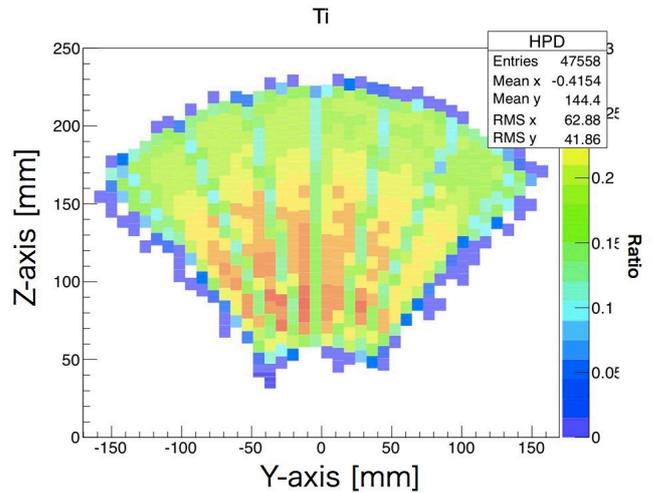


図 7.14: 各スポットが反射する光量の度合い。Direct の光量を 1 としている。

7.2 結像性能劣化要因の分離

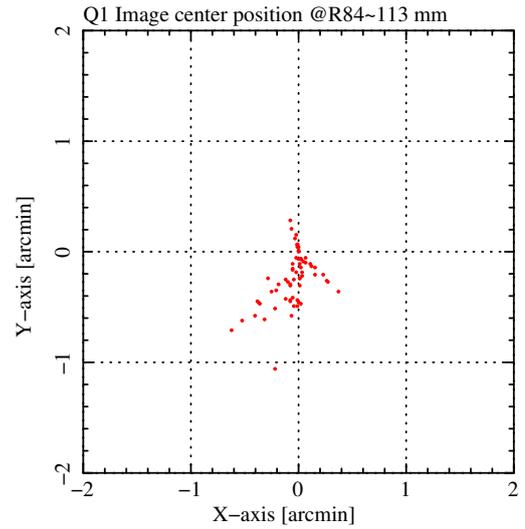
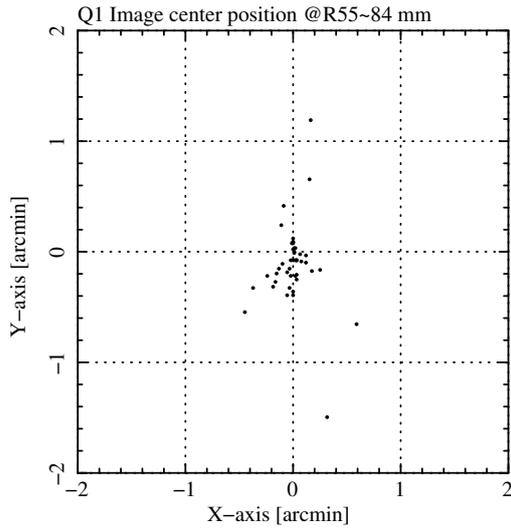


図 7.15: 半径 55 mm ~ 84 mm にある各スポットの結像位置。 図 7.16: 半径 84 mm ~ 113 mm にある各スポットの結像位置。

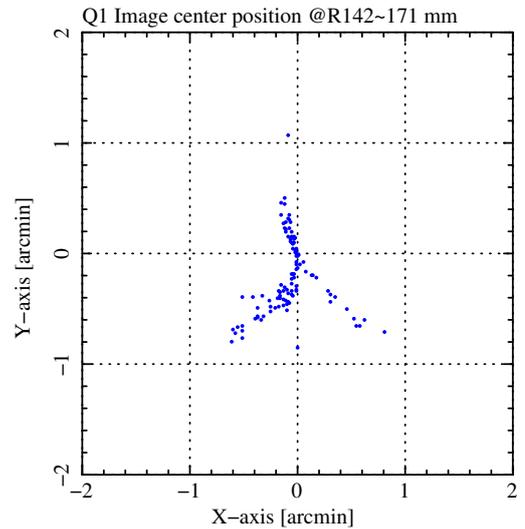
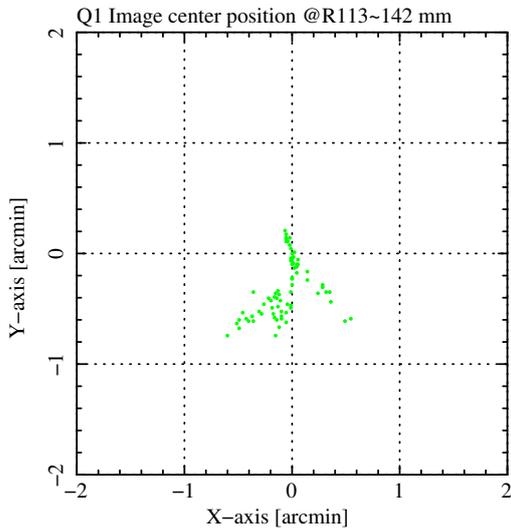


図 7.17: 半径 113 mm ~ 142 mm にある各スポットの結像位置。 図 7.18: 半径 142 mm ~ 171 mm にある各スポットの結像位置。

7.2 結像性能劣化要因の分離

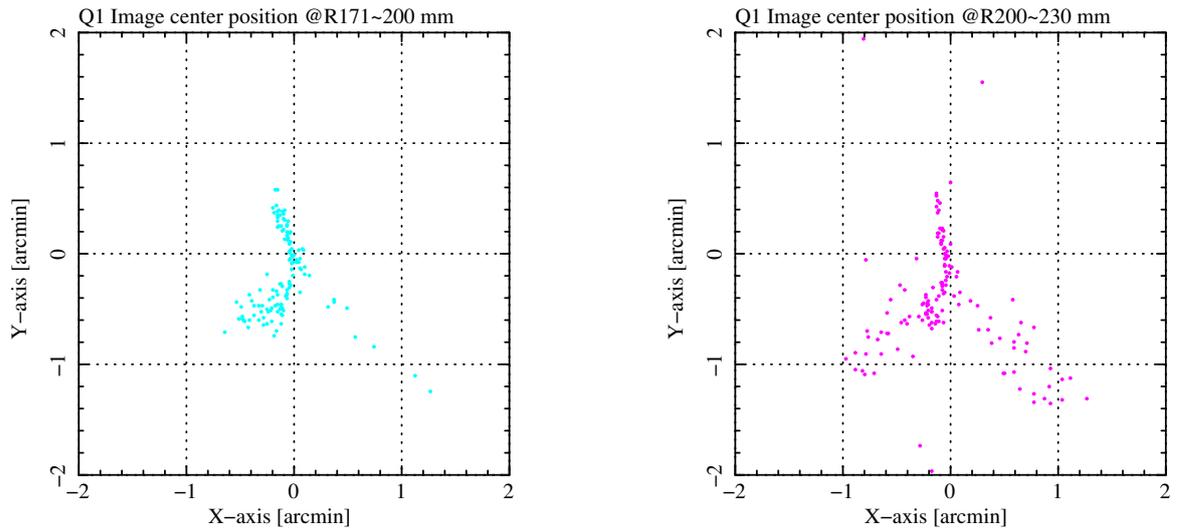


図 7.19: 半径 171 mm ~ 200 mm にある各スポットの結像位置。
図 7.20: 半径 200 mm ~ 230 mm にある各スポットの結像位置。

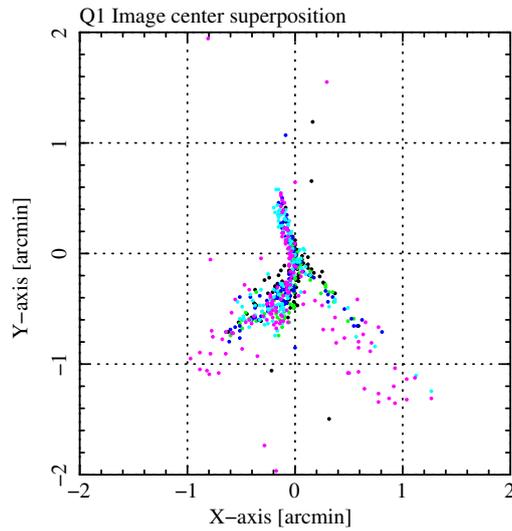


図 7.21: 各半径毎の結像位置を重ね合わせたもの。

7.2 結像性能劣化要因の分離

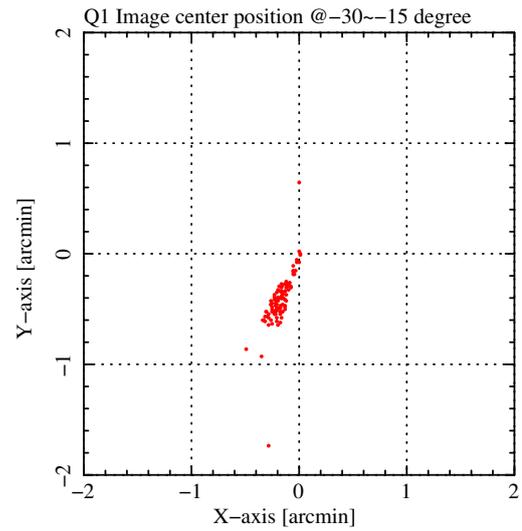
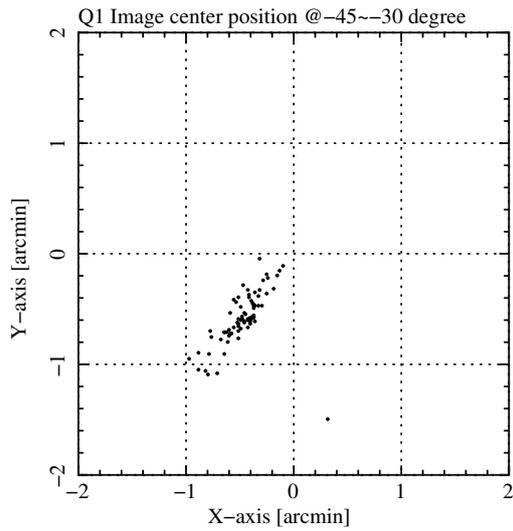


図 7.22: -45 ° ~ -30 ° にある各スポットの結像位置。

図 7.23: -30 ° ~ -15 ° にある各スポットの結像位置。

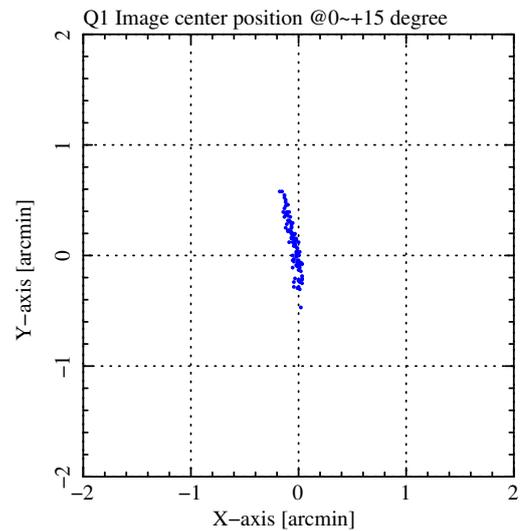
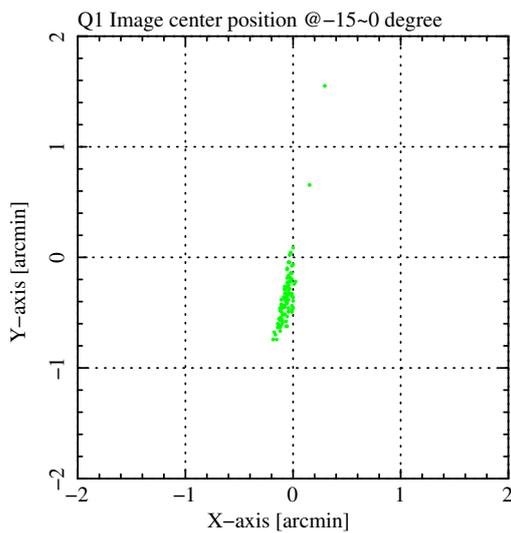


図 7.24: -15 ° ~ 0 ° にある各スポットの結像位置。

図 7.25: 0 ° ~ +15 ° にある各スポットの結像位置。

7.2 結像性能劣化要因の分離

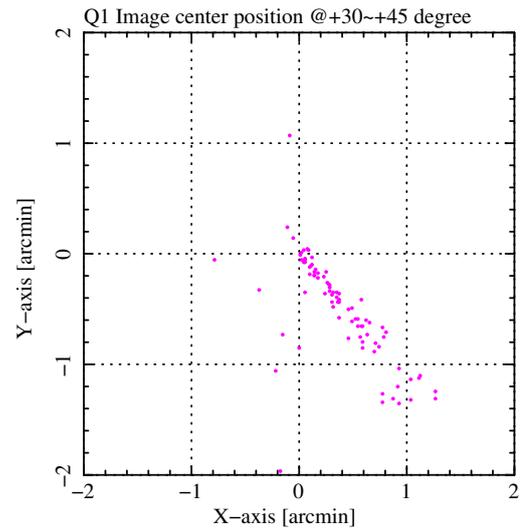
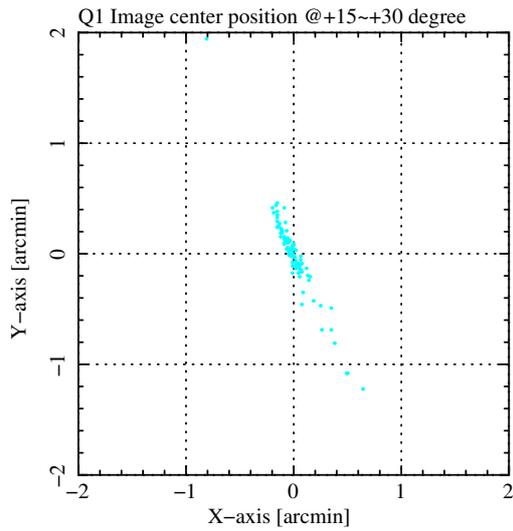


図 7.26: +15 ° ~ +30 ° にある各スポットの結像位置。 図 7.27: +30 ° ~ +45 ° にある各スポットの結像位置。

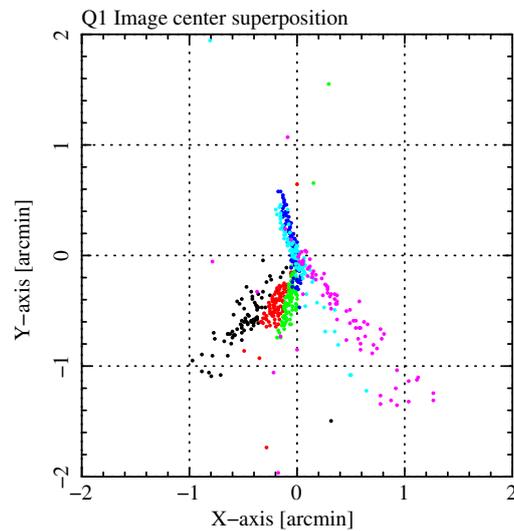


図 7.28: 各角度毎の結像位置を重ね合わせたもの。

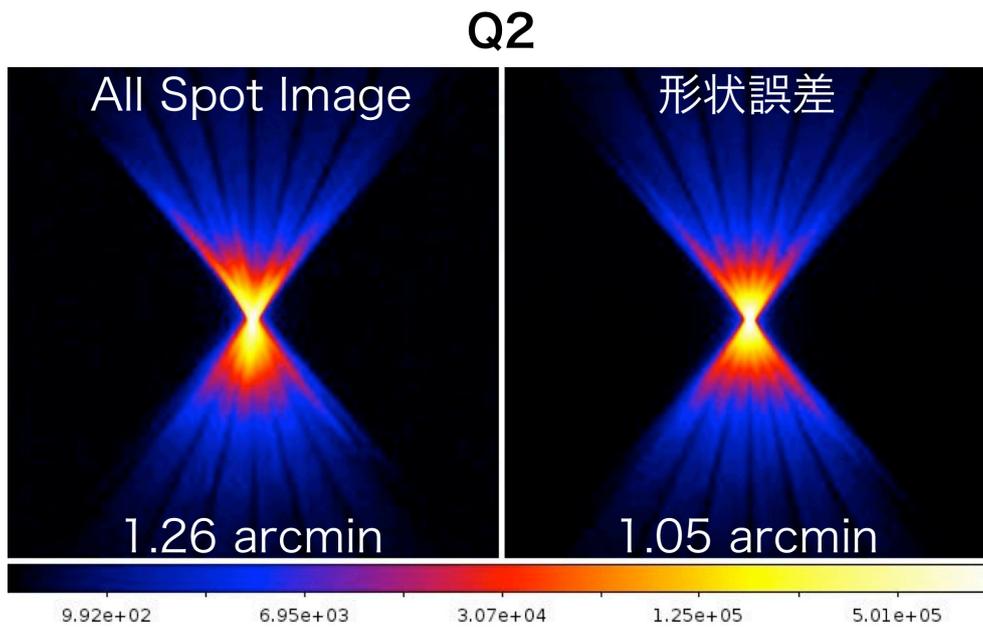


図 7.29: 左: Q2のスポットイメージ、右: 各スポットでの結像位置を一点に合わせたイメージ。

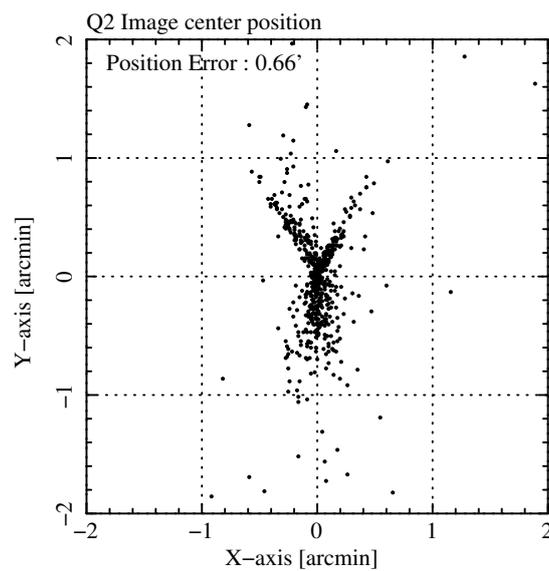


図 7.30: 各スポットにおける結像位置のばらつきの分布。

7.2 結像性能劣化要因の分離

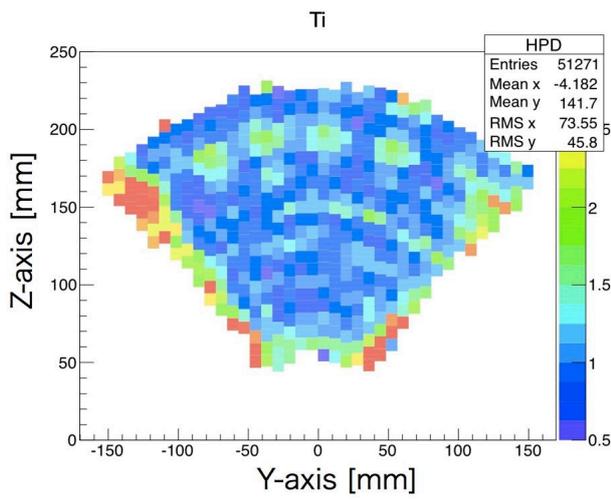


図 7.31: 各スポットの HPD マップ。

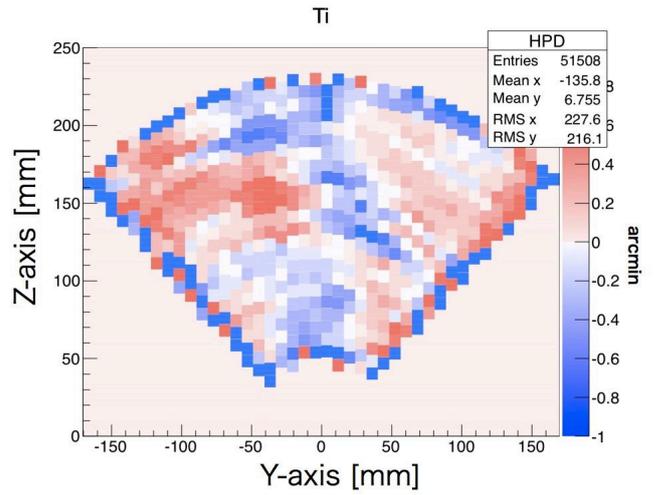


図 7.32: Quadrant の結像位置から各スポットの結像中心のずれ。

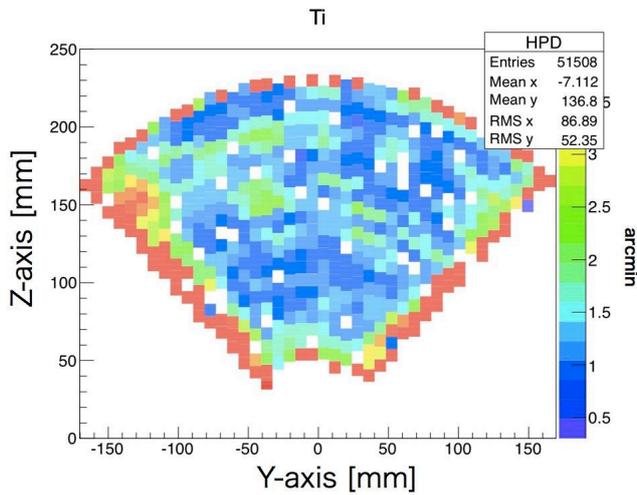


図 7.33: Quadrant の結像位置を中心にして求めた各 spot の HPD マップ。

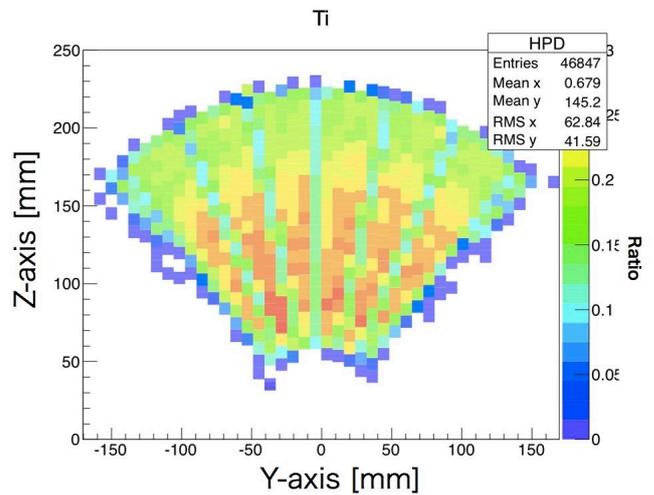


図 7.34: 各スポットが反射する光量の度合い。Direct の光量を 1 としている。

7.2 結像性能劣化要因の分離

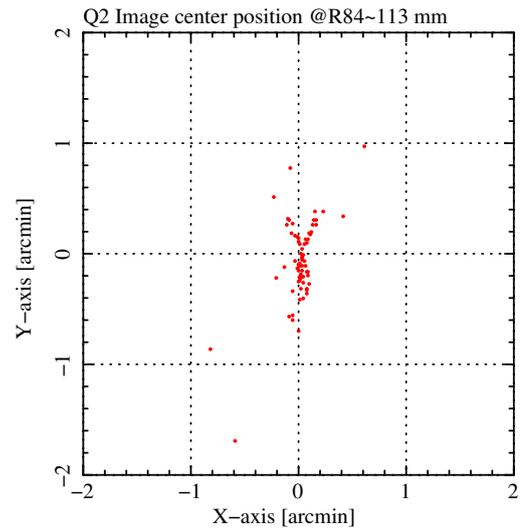
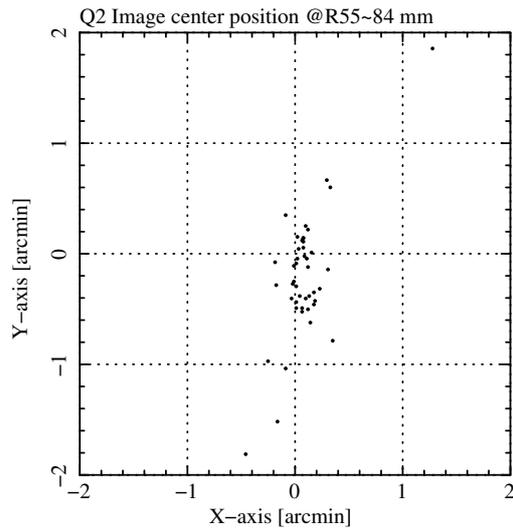


図 7.35: 半径 55 mm ~ 84 mm にある各スポットの結像位置。 図 7.36: 半径 84 mm ~ 113 mm にある各スポットの結像位置。

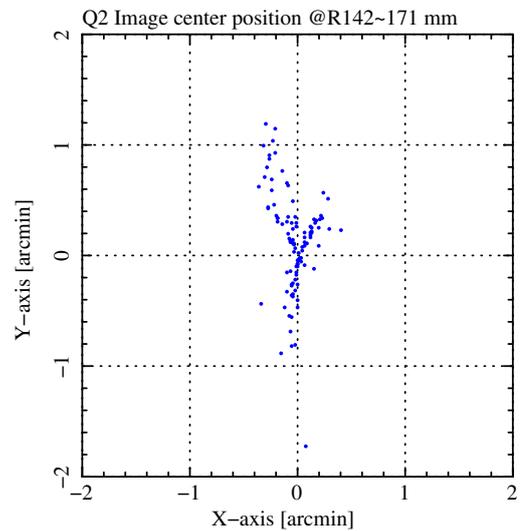
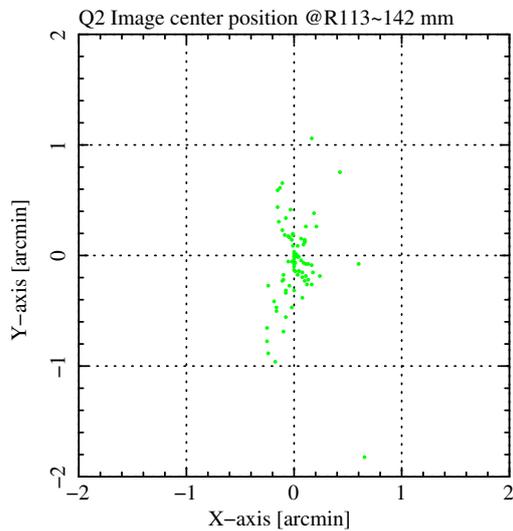


図 7.37: 半径 113 mm ~ 142 mm にある各スポットの結像位置。 図 7.38: 半径 142 mm ~ 171 mm にある各スポットの結像位置。

7.2 結像性能劣化要因の分離

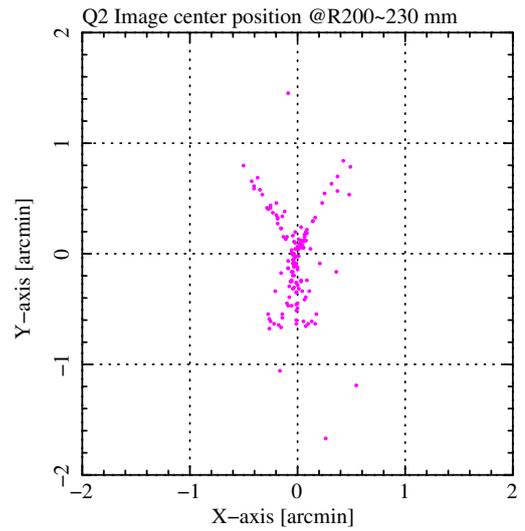
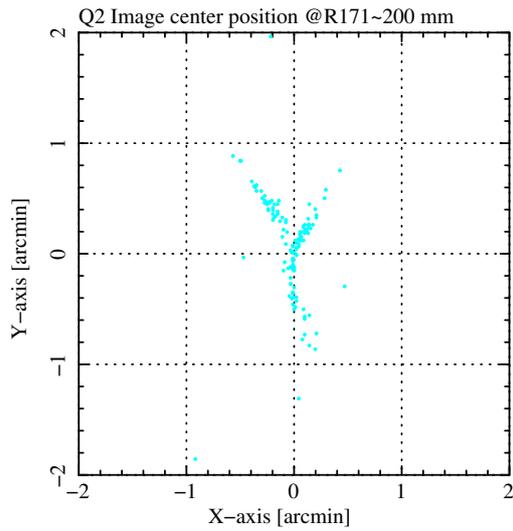


図 7.39: 半径 171 mm ~ 200 mm にある各スポットの結像位置。 図 7.40: 半径 200 mm ~ 230 mm にある各スポットの結像位置。

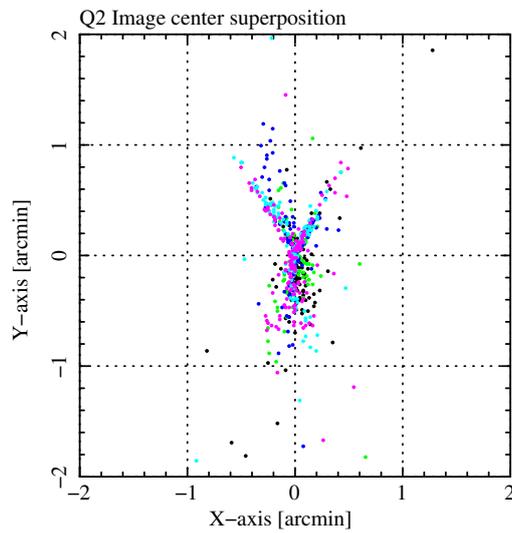


図 7.41: 各半径毎の結像位置を重ね合わせたもの。

7.2 結像性能劣化要因の分離

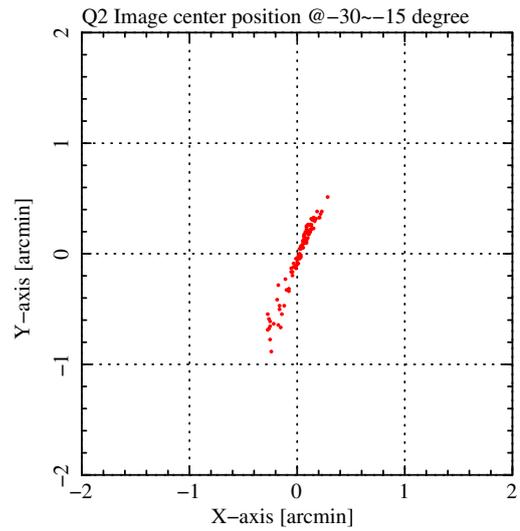
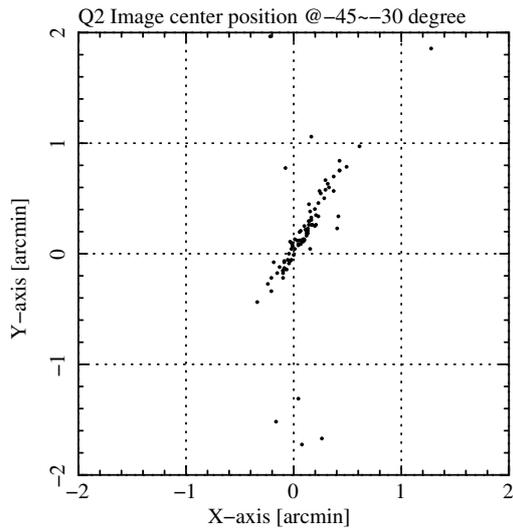


図 7.42: $-45^\circ \sim -30^\circ$ にある各スポットの結像位置。 図 7.43: $-30^\circ \sim -15^\circ$ にある各スポットの結像位置。

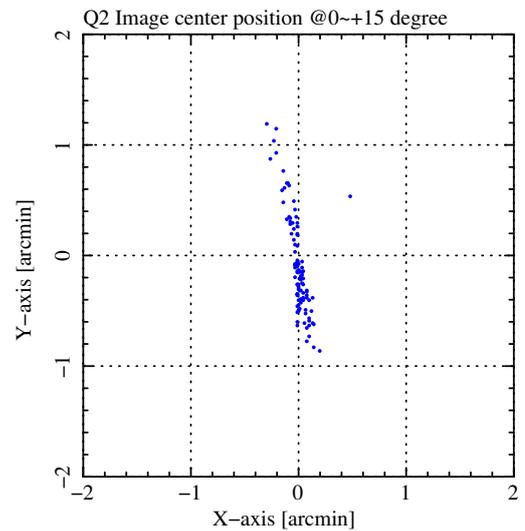
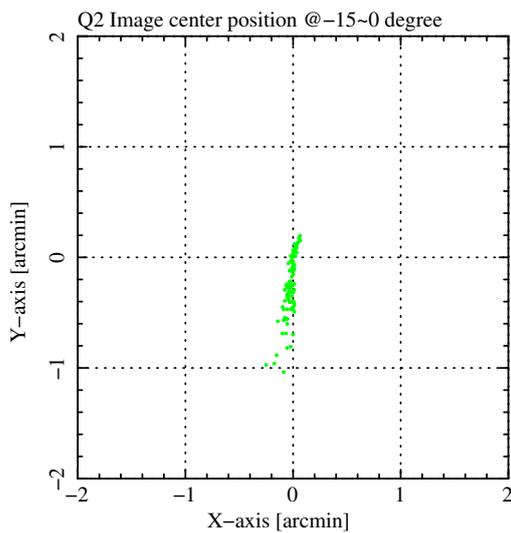


図 7.44: $-15^\circ \sim 0^\circ$ にある各スポットの結像位置。 図 7.45: $0^\circ \sim +15^\circ$ にある各スポットの結像位置。

7.2 結像性能劣化要因の分離

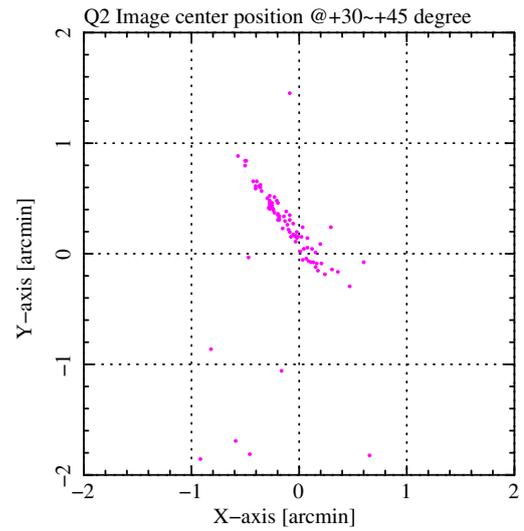
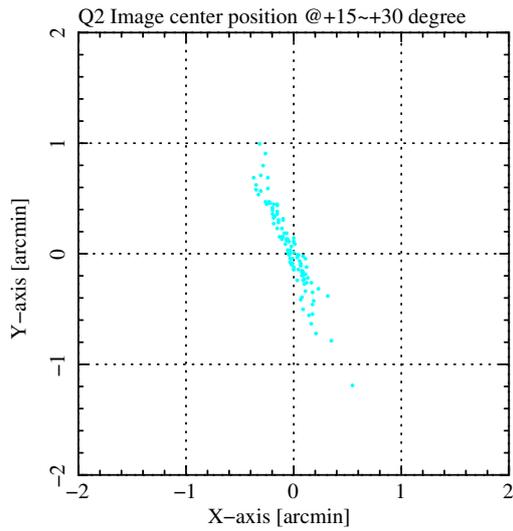


図 7.46: +15 ° ~ +30 ° にある各スポットの結像位置。 図 7.47: +30 ° ~ +45 ° にある各スポットの結像位置。

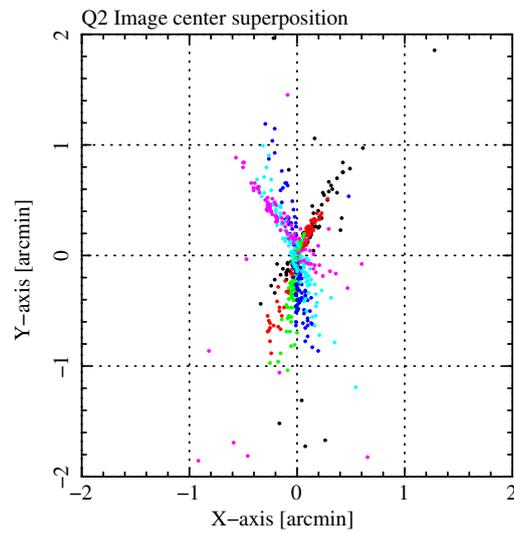


図 7.48: 各角度毎の結像位置を重ね合わせたもの。

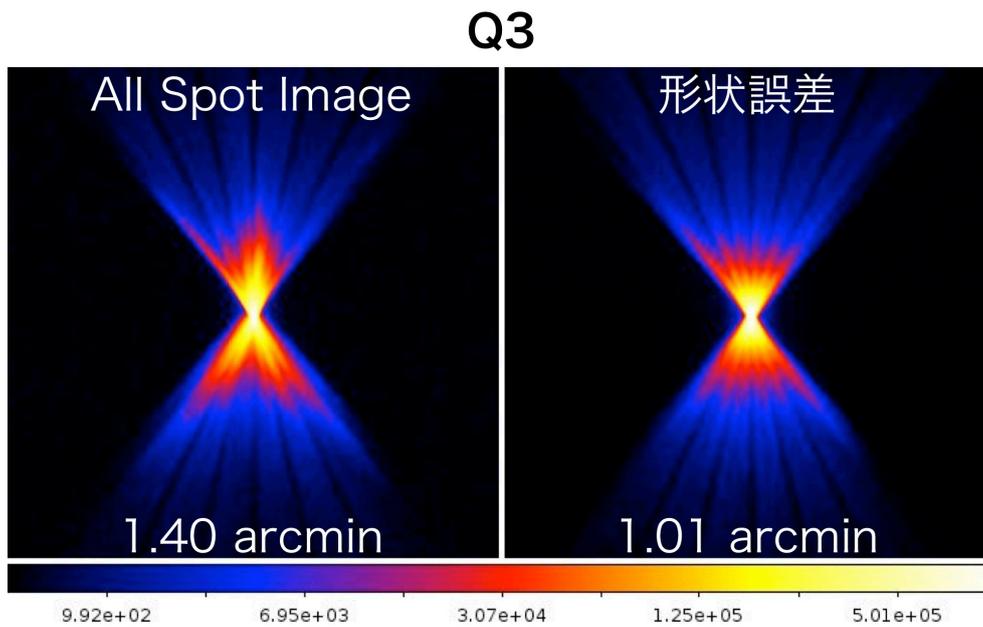


図 7.49: 左: Q3のスポットイメージ、右: 各スポットでの結像位置を一点に合わせたイメージ。

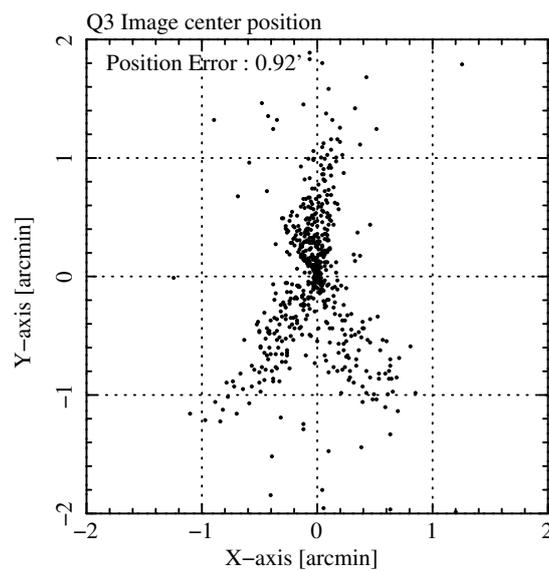


図 7.50: 各スポットにおける結像位置のばらつきの分布。

7.2 結像性能劣化要因の分離

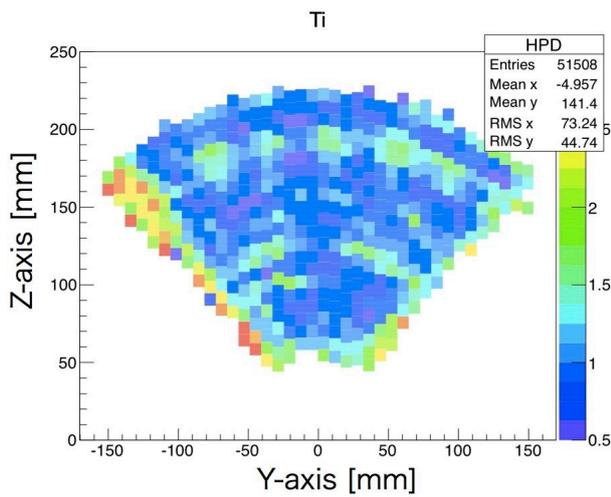


図 7.51: 各スポットの HPD マップ。

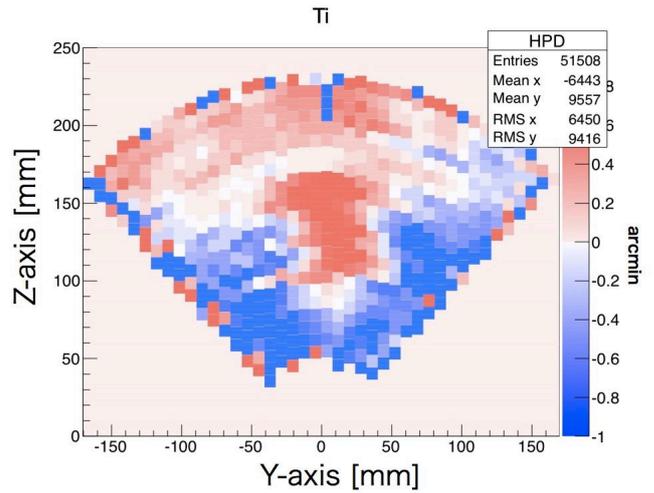


図 7.52: Quadrant の結像位置から各スポットの結像中心のずれ。

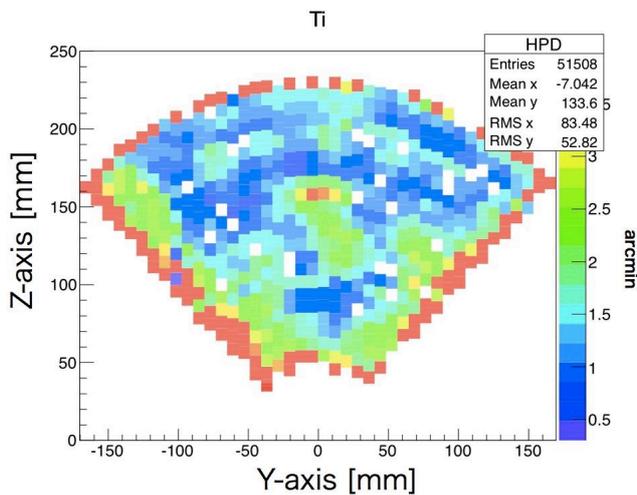


図 7.53: Quadrant の結像位置を中心にして求めた各 spot の HPD マップ。

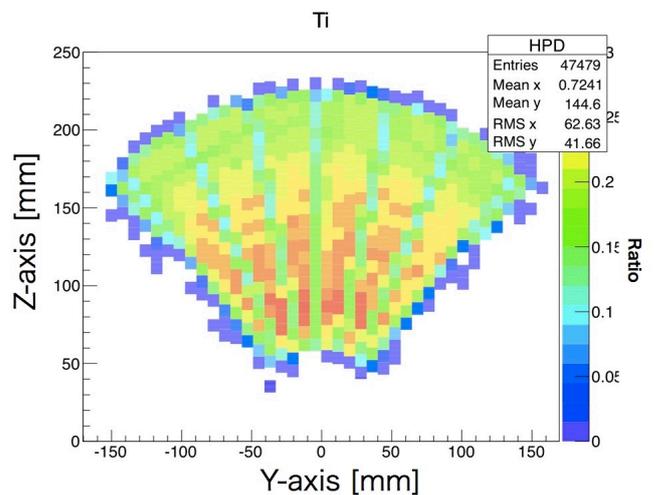


図 7.54: 各スポットが反射する光量の度合い。Direct の光量を 1 としている。

7.2 結像性能劣化要因の分離

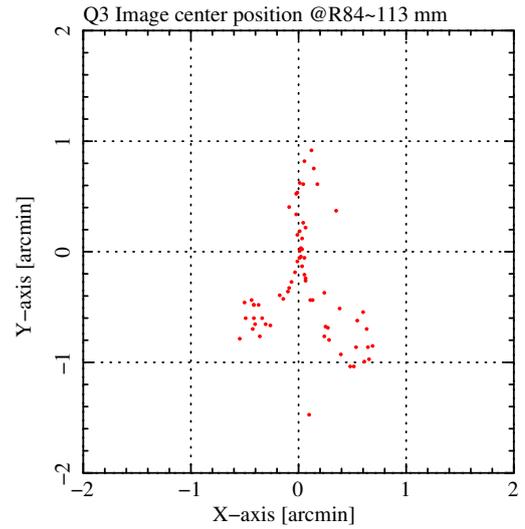
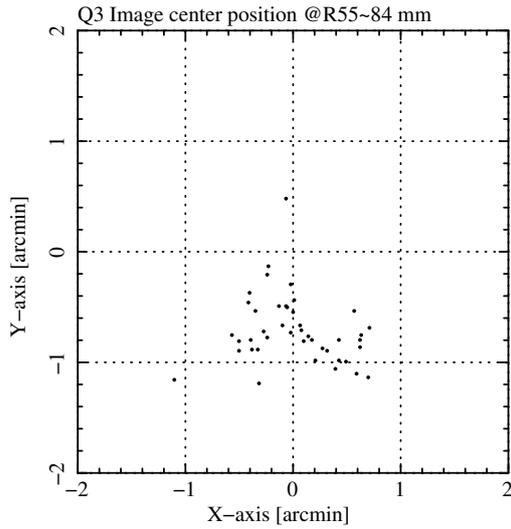


図 7.55: 半径 55 mm ~ 84 mm にある各スポットの結像位置。 図 7.56: 半径 84 mm ~ 113 mm にある各スポットの結像位置。

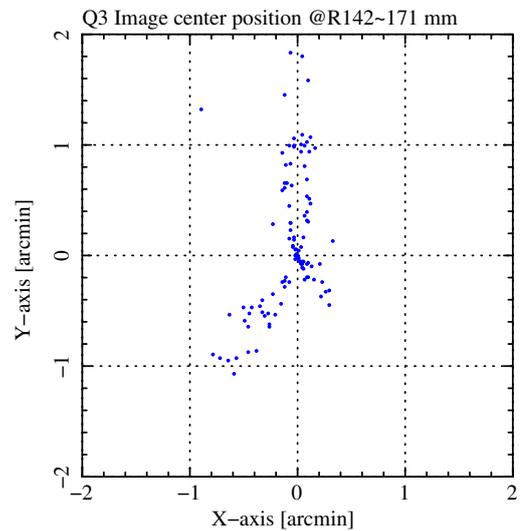
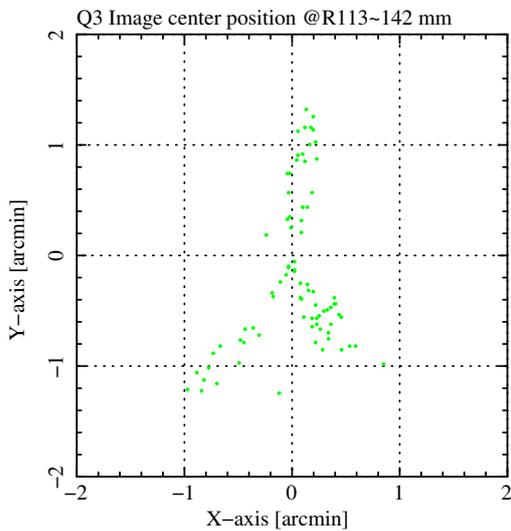


図 7.57: 半径 113 mm ~ 142 mm にある各スポットの結像位置。 図 7.58: 半径 142 mm ~ 171 mm にある各スポットの結像位置。

7.2 結像性能劣化要因の分離

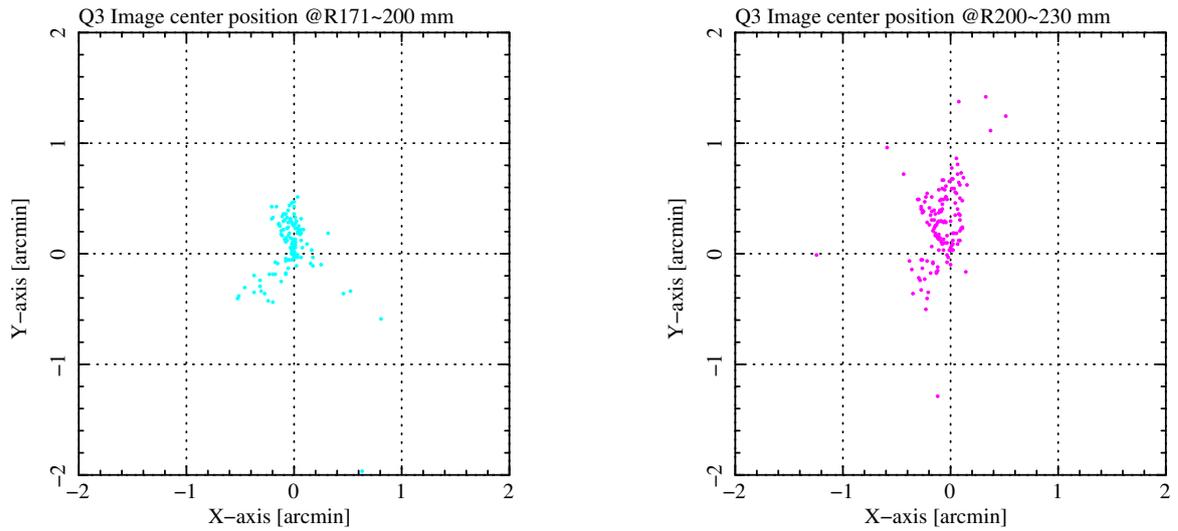


図 7.59: 半径 171 mm ~ 200 mm にある各スポットの結像位置。
図 7.60: 半径 200 mm ~ 230 mm にある各スポットの結像位置。

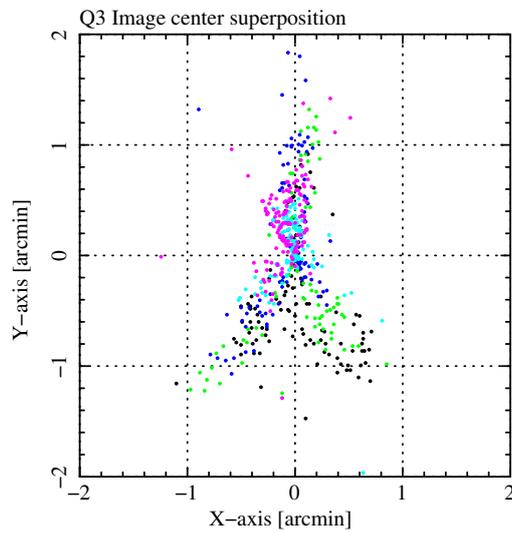


図 7.61: 各半径毎の結像位置を重ね合わせたもの。

7.2 結像性能劣化要因の分離

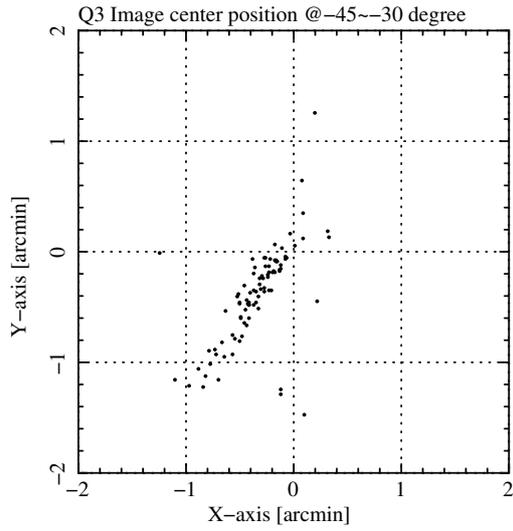


図 7.62: -45 ° ~ -30 ° にある各スポットの結像位置。

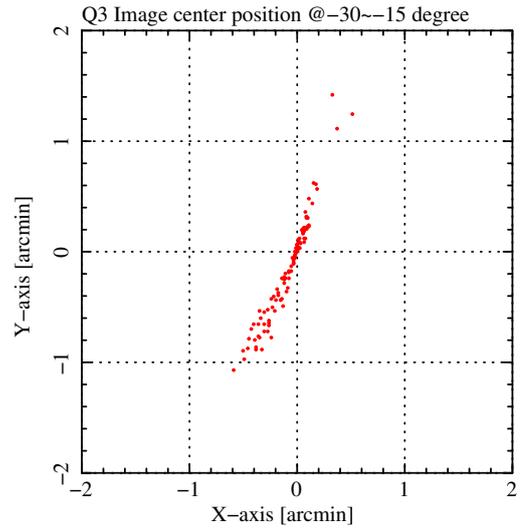


図 7.63: -30 ° ~ -15 ° にある各スポットの結像位置。

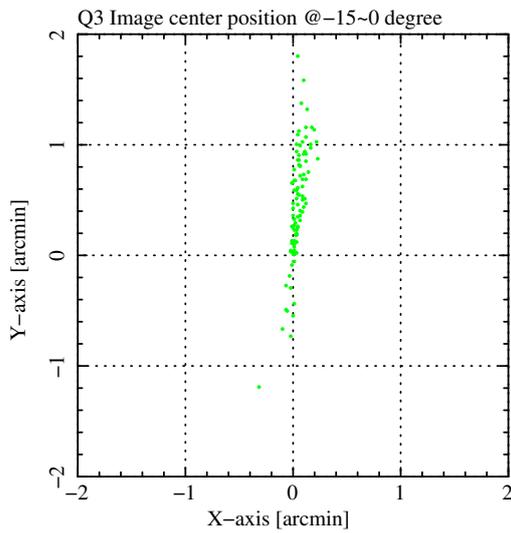


図 7.64: -15 ° ~ 0 ° にある各スポットの結像位置。

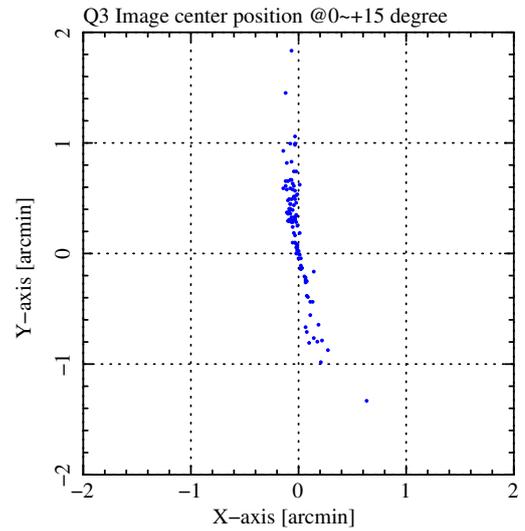


図 7.65: 0 ° ~ +15 ° にある各スポットの結像位置。

7.2 結像性能劣化要因の分離

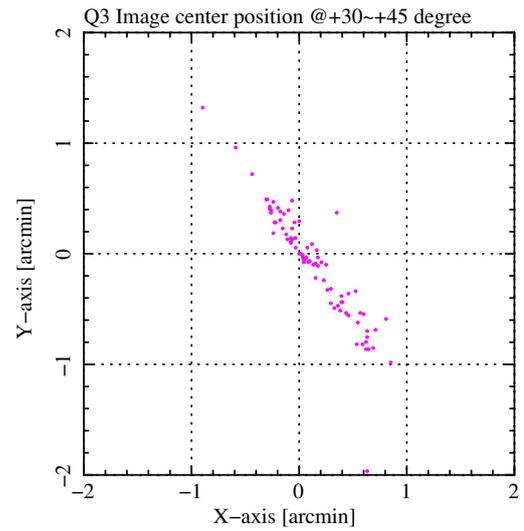
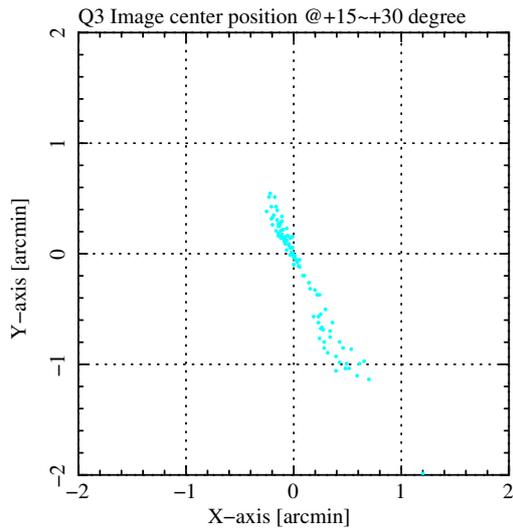


図 7.66: +15 ° ~ +30 ° にある各スポットの結像位置。 図 7.67: +30 ° ~ +45 ° にある各スポットの結像位置。

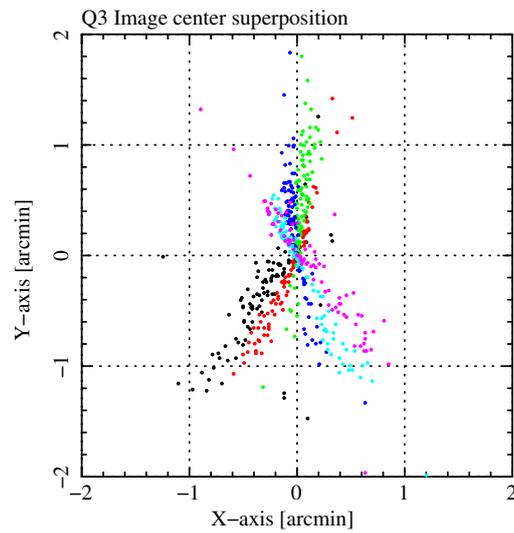


図 7.68: 各角度毎の結像位置を重ね合わせたもの。

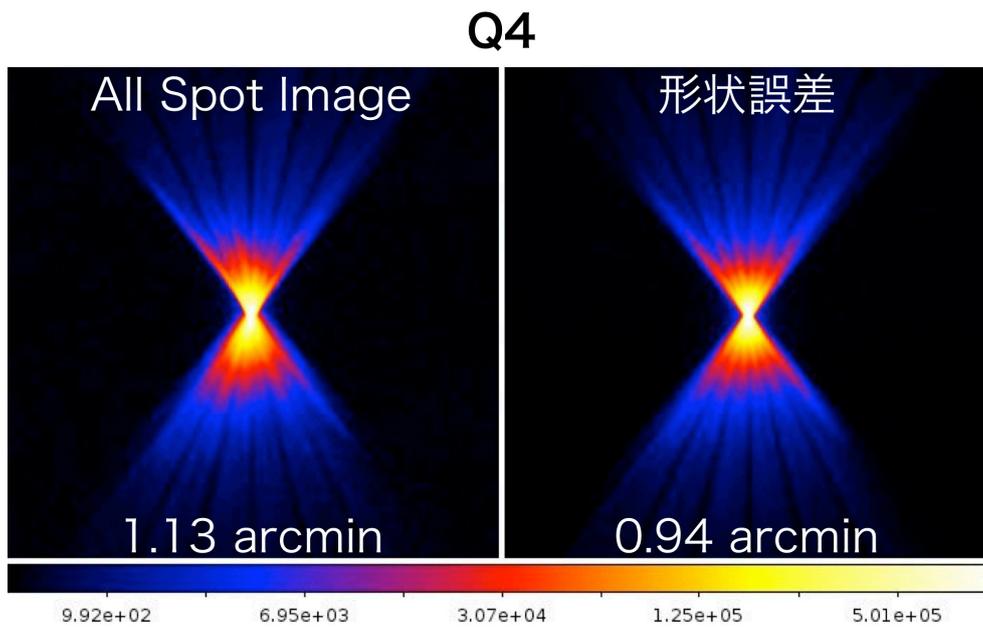


図 7.69: 左: Q4のスポットイメージ、右: 各スポットでの結像位置を一点に合わせたイメージ。

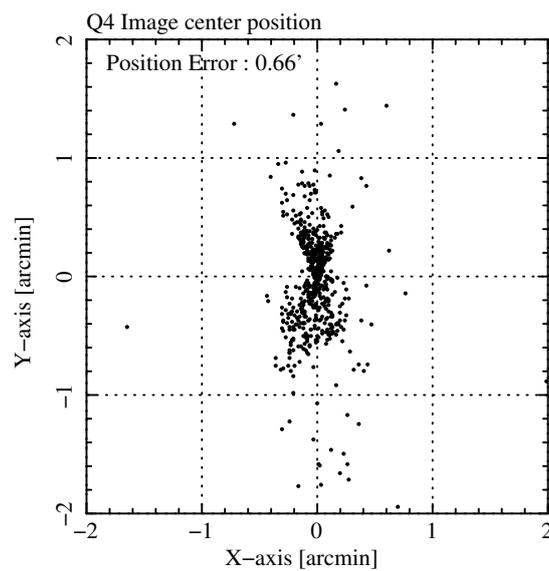


図 7.70: 各スポットにおける結像位置のばらつきの分布。

7.2 結像性能劣化要因の分離

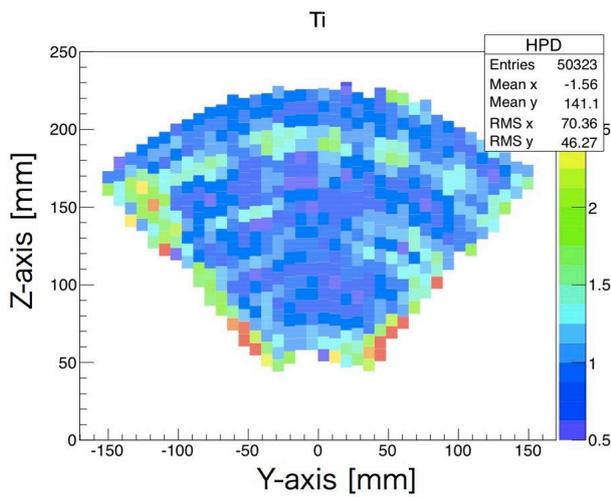


図 7.71: 各スポットの HPD マップ。

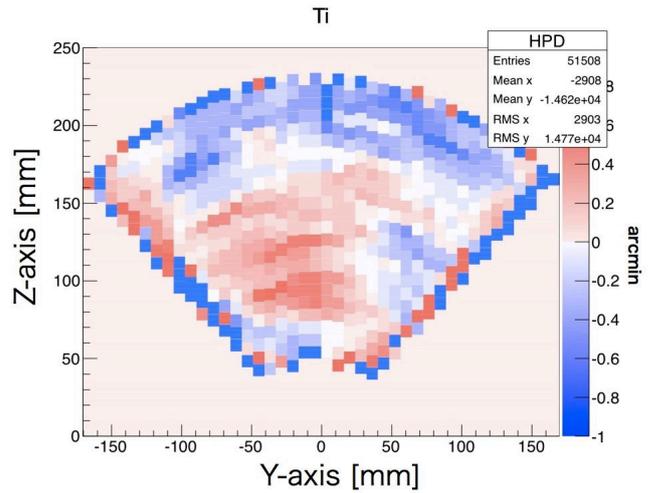


図 7.72: Quadrant の結像位置から各スポットの結像中心のずれ。

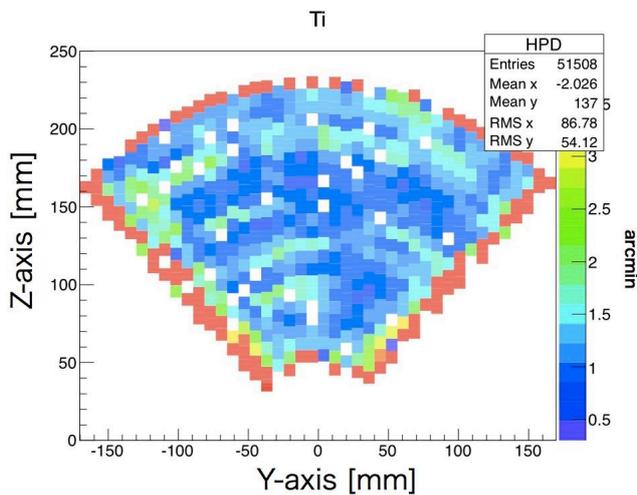


図 7.73: Quadrant の結像位置を中心にして求めた各 spot の HPD マップ。

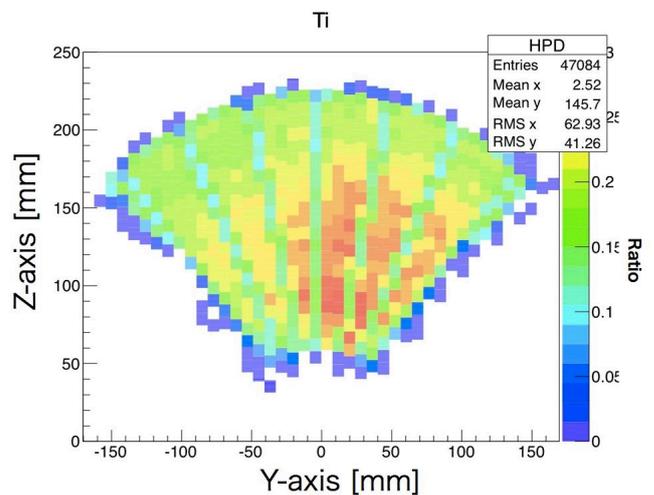


図 7.74: 各スポットが反射する光量の度合い。Direct の光量を 1 としている。

7.2 結像性能劣化要因の分離

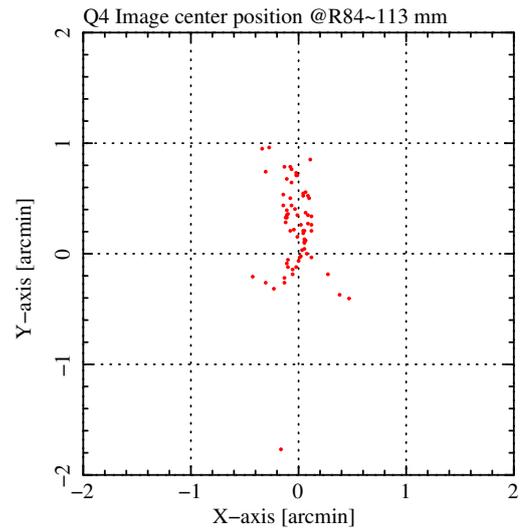
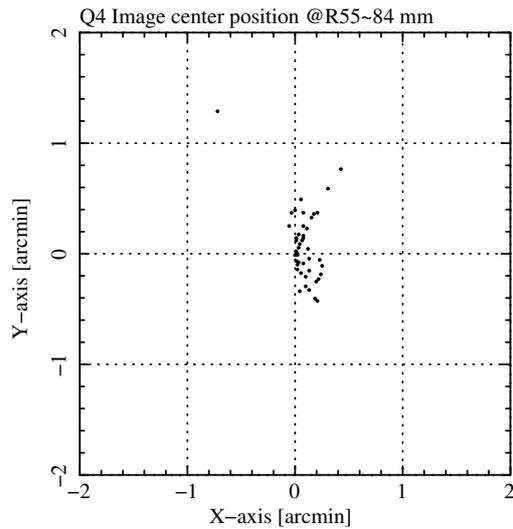


図 7.75: 半径 55 mm ~ 84 mm にある各スポットの結像位置。 図 7.76: 半径 84 mm ~ 113 mm にある各スポットの結像位置。

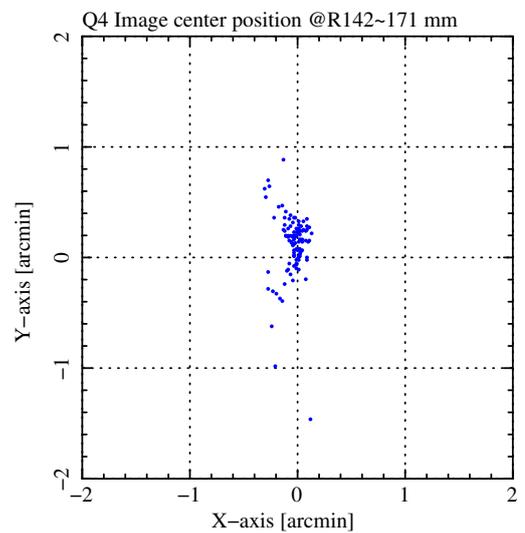
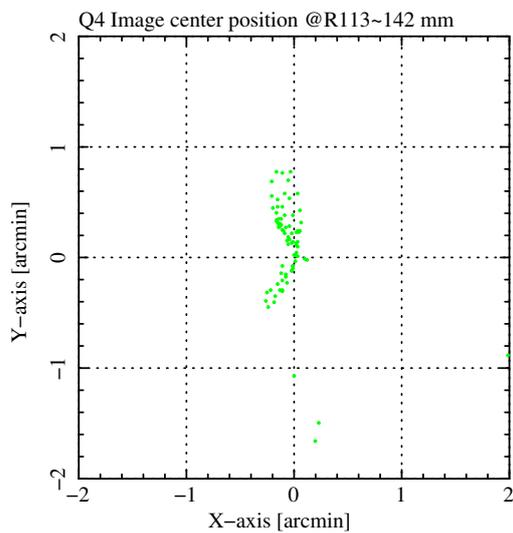


図 7.77: 半径 113 mm ~ 142 mm にある各スポットの結像位置。 図 7.78: 半径 142 mm ~ 171 mm にある各スポットの結像位置。

7.2 結像性能劣化要因の分離

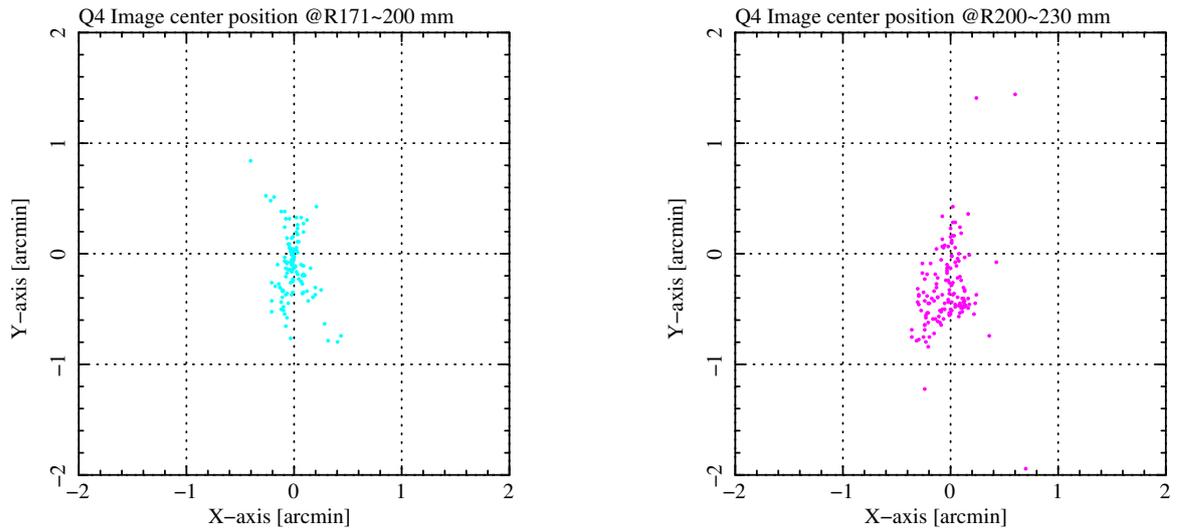


図 7.79: 半径 171 mm ~ 200 mm にある各スポットの結像位置。
図 7.80: 半径 200 mm ~ 230 mm にある各スポットの結像位置。

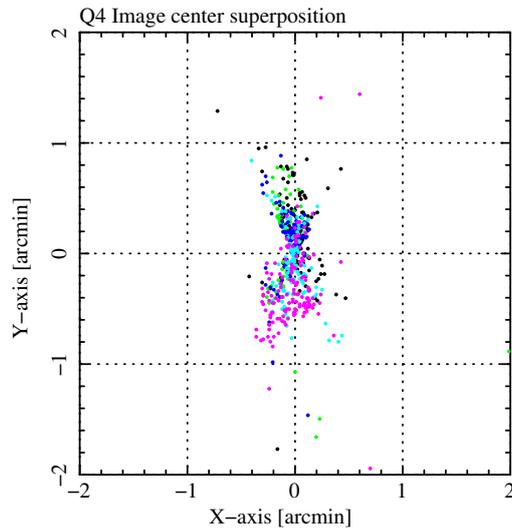


図 7.81: 各半径毎の結像位置を重ね合わせたもの。

7.2 結像性能劣化要因の分離

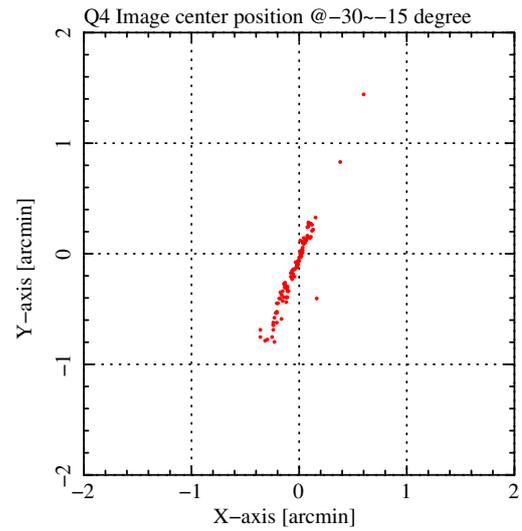
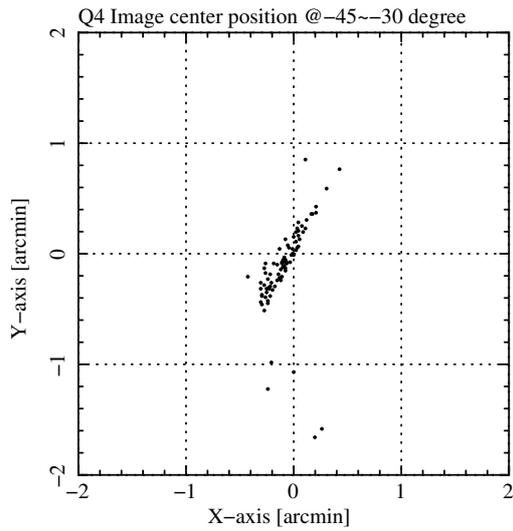


図 7.82: -45 ° ~ -30 ° にある各スポットの結像位置。

図 7.83: -30 ° ~ -15 ° にある各スポットの結像位置。

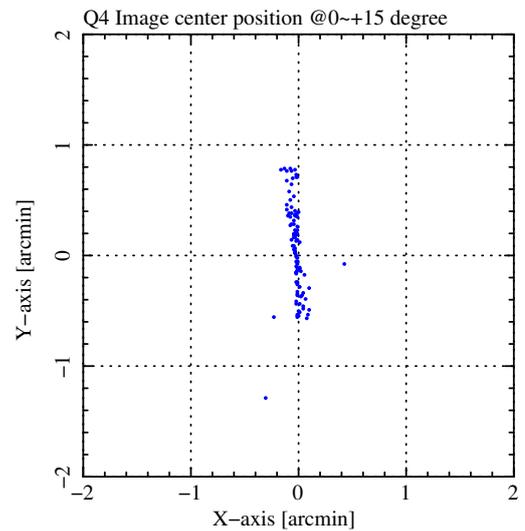
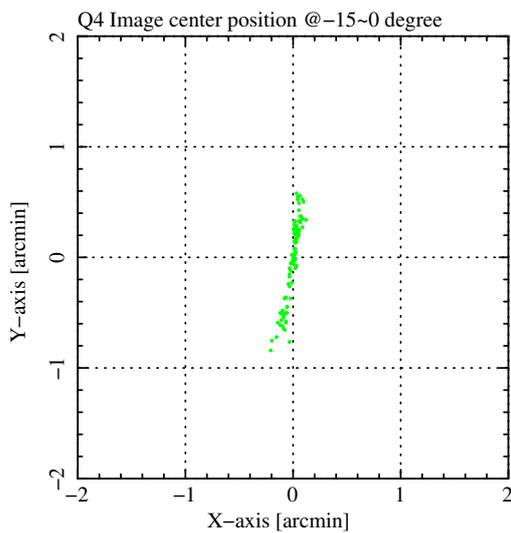


図 7.84: -15 ° ~ 0 ° にある各スポットの結像位置。

図 7.85: 0 ° ~ +15 ° にある各スポットの結像位置。

7.2 結像性能劣化要因の分離

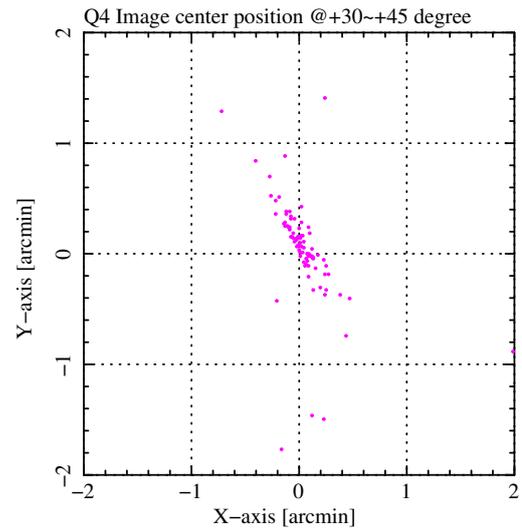
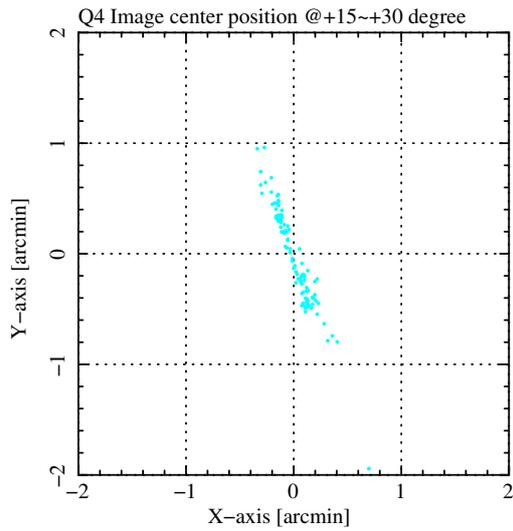


図 7.86: +15 ° ~ +30 ° にある各スポットの結像位置。
図 7.87: +30 ° ~ +45 ° にある各スポットの結像位置。

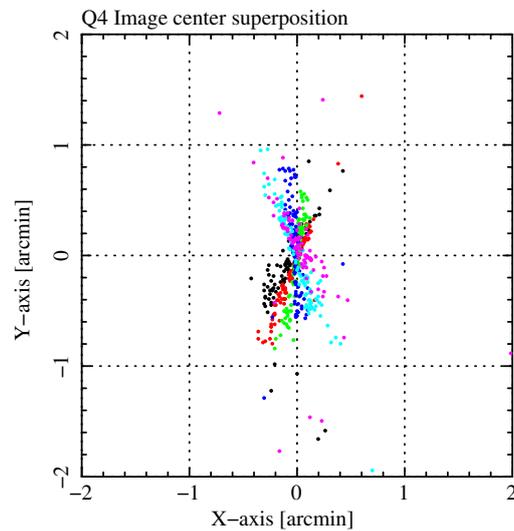


図 7.88: 各角度毎の結像位置を重ね合わせたもの。

7.2 結像性能劣化要因の分離

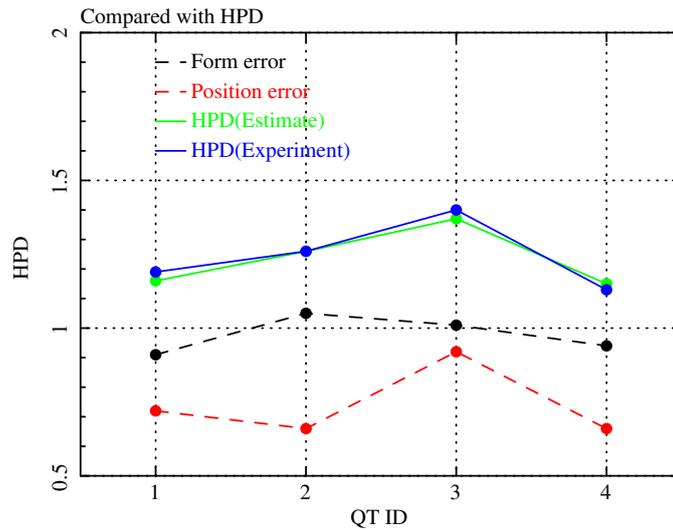


図 7.89: 各 Quadrant の形状誤差と位置決め誤差の比較。

表 7.2: 各 Quadrant の形状誤差と位置決め誤差。

	形状誤差	位置決め誤差	算出 HPD ¹	Quadrant の HPD
Q1	0.91'	0.72'	1.16'	1.19'
Q2	1.05'	0.66'	1.26'	1.26'
Q3	1.01'	0.92'	1.37'	1.40'
Q4	0.94'	0.66'	1.15'	1.13'

¹ $\sqrt{\text{HPD}_{\text{形状}}^2 + \text{HPD}_{\text{位置}}^2}$

第8章 考察

8.1 可視光と X 線の望遠鏡光軸の比較

第5章、第6章では、それぞれ可視光と X 線による望遠鏡光軸を測定した。また、縦置きにおいて、Quadrant 全面に可視光を当てた場合の望遠鏡光軸を追測定したので、その結果もまとめて考察する。各測定的主要測定条件を表 8.2 にまとめる。各測定の望遠鏡光軸をプロットすると図 8.1 のようになる。

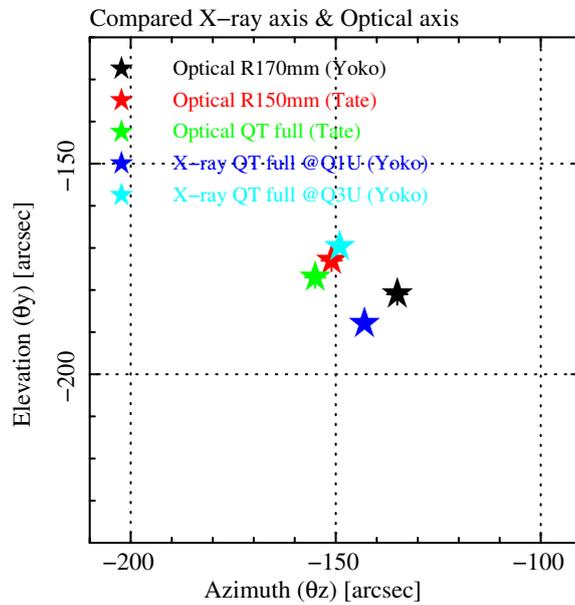


図 8.1: 可視光と X 線による望遠鏡光軸の比較。

表 8.1: 望遠鏡光軸の測定条件。

領域			望遠鏡光軸	Config.
			(Azimuth(θ_z), Elevation(θ_y))	
可視光	横置き	望遠鏡の内側 R170 mm の領域	($-135''$, $-181''$)	Q1U ~ Q4U
	縦置き	望遠鏡の内側 R150 mm の領域	($-151''$, $-173''$)	Q1S ~ Q4S
	縦置き	Quadrant 全域	($-155''$, $-177''$)	Q1S ~ Q4S
X 線	横置き (Q1U)	Quadrant 全域	($-143''$, $-188''$)	Q1U
	横置き (Q3U)	Quadrant 全域	($-149''$, $-170''$)	Q3U

8.1 可視光と X 線の望遠鏡光軸の比較

可視光の横置き（黒）と X 線の横置き（青）の望遠鏡光軸を比較すると、10 秒角で一致している。しかし、上記二つの望遠鏡光軸と 180 ° 回したときの望遠鏡光軸（青）は 20 秒角ずれている。一方で、可視光の縦置き（赤と緑）と 180 ° 回したときの望遠鏡光軸（青）の望遠鏡光軸を比較すると、6 秒角程度で一致している。

また、図 8.2 に Quadrant の光軸のプロットを示す。 は Q1U における X 線の Quadrant 光軸、 は Q3U における X 線の Quadrant 光軸、 は縦置きにおける可視光の Quadrant 光軸である。第 6.9.1 章でも議論したが、Q1U における X 線の Quadrant 光軸が Q3U における X 線の Quadrant 光軸に対して全体的に 18 秒角右下へシフトしていた。さらに縦置きにおける可視光の Quadrant 光軸に対しても右下に 16 秒角シフトしている。以上より、Q1U における X 線光軸は他の configuration に対して有意にシフトしており、原因は不明だが、セオドライトと X 線軸の正対がずれていたと考えるのが自然である。また、縦置きの可視光光軸と Q3U の X 線光軸（横置き）は 10 秒以内で一致しているため、光軸は configuration に依らないと考え、縦置きにおける可視光光軸を衛星アライメントで採用する方向とする。

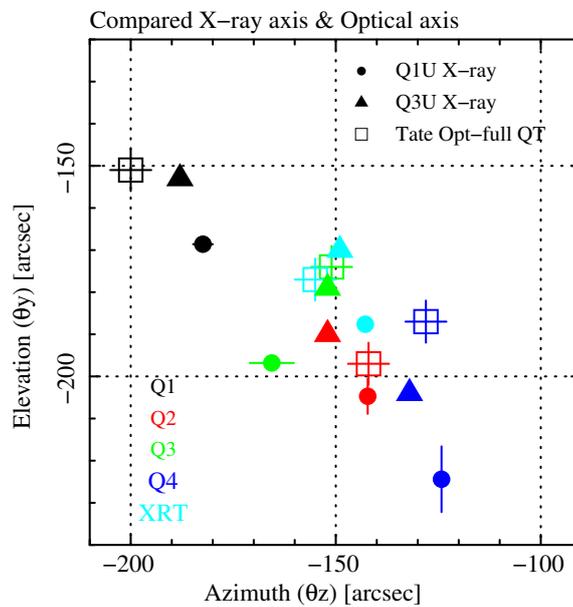


図 8.2: 可視光と X 線による Quadrant 光軸の比較。

表 8.2: 各 configuration における Quadrant 毎の光軸。括弧内は (Azimuth(θ_z), Elevation(θ_y)) を表す。

	Q1	Q2	Q3	Q4	XRT
可視光 縦置き	(-200'', -151'')	(-142'', -197'')	(-151'', -174'')	(-128'', -187'')	(-155'', -177'')
X 線 横置き (Q1U)	(-182'', -169'')	(-142'', -205'')	(-166'', -197'')	(-124'', -224'')	(-143'', -188'')
横置き (Q3U)	(-188'', -153'')	(-152'', -190'')	(-152'', -179'')	(-132'', -204'')	(-149'', -170'')

8.2 有効面積

本実験による SXT の有効面積の測定値は、反射鏡の表面粗さを 4\AA としたときの理想値の約 80% であることが分かった。測定値と理論値の値が異なる原因は、反射鏡の位置決めにおける幾何的な反射鏡の見込む面積の減少や反射鏡の表面粗さが考えられる。理想値の表面粗さは代表的な値 (4\AA) を入れて計算した。ただし本実験では表面粗さの測定は行っていないため、ここでは表面粗さのパラメータを変えて、実測値と最も合う理想値を算出し、実際の表面粗さを予想してみることにする。

望遠鏡全体の有効面積を表 8.3 にまとめる。以下、表面粗さの簡単な算出方法を説明する。

1. 表面粗さに対する有効面積の理想値を計算する。
2. 1 で求めた理想値と、本測定で得た実験値 (表 8.3) との比をエネルギー毎に計算する。
3. 2 で得られた比の平均をとり、平均の標準偏差を計算する。
4. 1 で計算した理想値を、表面粗さ 3.4\AA から 0.2\AA ずつ大きくして計算し、同様に標準偏差を計算する。
5. 横軸に表面粗さ、縦軸に平均の標準偏差をプロットし、二次関数でフィットする。このときの極小値を与える表面粗さを実際の反射鏡の表面粗さとする。

表 8.3: 望遠鏡光軸における望遠鏡全体の有効面積。

Al-K α [cm ²]	Ti-K α [cm ²]	Cu-K α [cm ²]	Pt-L α [cm ²]	Pt-L β [cm ²]	Pt-L γ [cm ²]
580.36 \pm 1.06	445.16 \pm 0.88	369.12 \pm 0.68	269.68 \pm 0.52	185.80 \pm 0.41	88.48 \pm 0.45

8.2 有効面積

表 8.4: 表面粗さに対する有効面積の実験値と理想値の比の標準偏差。

表面粗さ	Energy	比 (実験値/理想値) %	表面粗さ	Energy	比 (実験値/理想値) %
3.4 Å	Al-K α	79.69	4.4 Å	Al-K α	79.77
	Ti-K α	81.42		Ti-K α	82.08
	Cu-K α	78.49		Cu-K α	80.45
	Pt-L α	77.74		Pt-L α	80.17
	Pt-L β	77.66		Pt-L β	80.54
	Pt-L γ	74.03		Pt-L γ	77.07
比の平均		78.17	比の平均		80.01
比の平均の標準偏差 (except Pt-L γ)		1.11 (0.79)	比の平均の標準偏差 (except Pt-L γ)		0.73 (0.44)
3.6 Å	Al-K α	79.71	4.6 Å	Al-K α	79.79
	Ti-K α	81.54		Ti-K α	82.24
	Cu-K α	78.84		Cu-K α	80.90
	Pt-L α	78.17		Pt-L α	80.73
	Pt-L β	78.19		Pt-L β	81.22
	Pt-L γ	74.55		Pt-L γ	77.77
比の平均		78.50	比の平均		80.44
比の平均の標準偏差 (except Pt-L γ)		1.03 (0.70)	比の平均の標準偏差 (except Pt-L γ)		0.68 (0.44)
3.8 Å	Al-K α	79.72	4.8 Å	Al-K α	79.80
	Ti-K α	81.66		Ti-K α	82.39
	Cu-K α	79.20		Cu-K α	82.39
	Pt-L α	78.62		Pt-L α	81.34
	Pt-L β	78.72		Pt-L β	81.92
	Pt-L γ	75.14		Pt-L γ	78.55
比の平均		78.84	比の平均		80.90
平均の標準偏差 (except Pt-L γ)		0.95 (0.75)	平均の標準偏差 (except Pt-L γ)		0.65 (0.49)
4.0 Å	Al-K α	79.74	5.0 Å	Al-K α	79.82
	Ti-K α	81.79		Ti-K α	82.56
	Cu-K α	79.60		Cu-K α	81.90
	Pt-L α	79.10		Pt-L α	81.97
	Pt-L β	79.29		Pt-L β	82.68
	Pt-L γ	75.73		Pt-L γ	79.34
比の平均		79.21	比の平均		81.38
平均の標準偏差 (except Pt-L γ)		0.878 (0.54)	平均の標準偏差 (except Pt-L γ)		0.64 (0.58)
4.2 Å	Al-K α	79.75	5.2 Å	Al-K α	79.84
	Ti-K α	81.93		Ti-K α	82.74
	Cu-K α	80.01		Cu-K α	82.42
	Pt-L α	79.62		Pt-L α	82.62
	Pt-L β	79.91		Pt-L β	83.47
	Pt-L γ	76.38		Pt-L γ	80.17
比の平均		79.60	比の平均		81.88
平均の標準偏差 (except Pt-L γ)		0.802 (0.48)	平均の標準偏差 (except Pt-L γ)		0.67 (0.69)

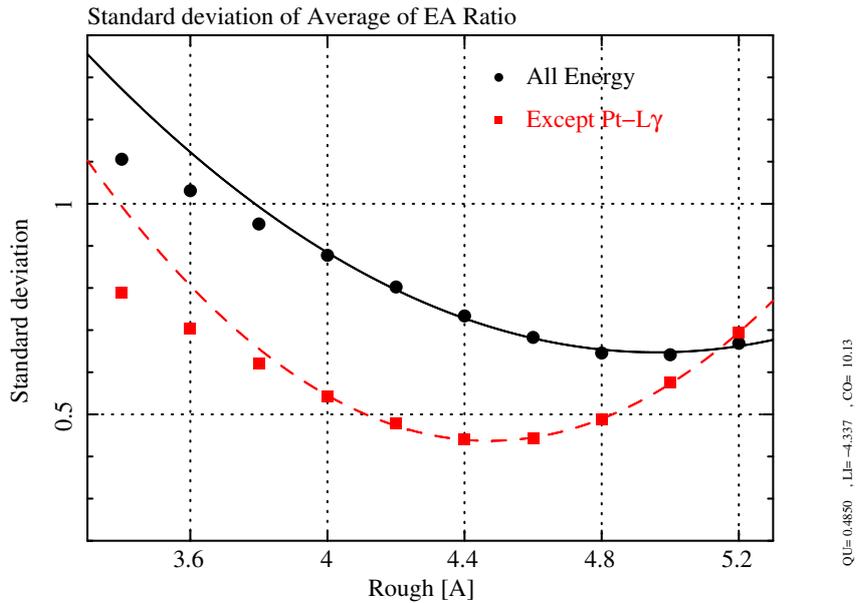


図 8.3: 理想値に対する実験値の比の平均の標準偏差の変化。

図 8.3 は、横軸に表面粗さ、横軸に平均値の標準偏差をプロットしたものである。は全エネルギーの比から求めた平均値の標準偏差で、は Pt-L γ のみ除外したときの平均値の標準偏差である¹。4 ~ 5.2Å の範囲を二次関数でフィットすると、全エネルギーの比をとった場合の表面粗さは ~ 5.0Å (81.38%) で、Pt-L γ を除いたエネルギーの比をとった場合では ~ 4.4Å (80.60%) となった。これらは ASTRO-E や ASTRO-EII と同程度の粗さである。

8.3 結像性能

第 6.8 章では各 Quadrant 毎の結像性能をエネルギー毎に評価した。図 6.78 を見ると、Quadrant に個性が現れており、特に Q3 は高エネルギーになるほど HPD が悪化しているのが明らかとなった。

第 7.2 章ではこれらの個性を調査するために、Quadrant をスポットスキャンで測定し、ローカルな領域の結像性能を評価した。どの Quadrant もスポット毎の HPD は 1 分角を切るものが多いが、Quadrant 全体 (あるいは望遠鏡全体) の結像性能はこれらのイメージのばらつきや反射鏡の形状により決まる。上述した Q3 の場合、図を見ると、その結像位置は他の Quadrant に比べて大きくばらついており、その位置決め誤差も大きい。これは反射鏡の位置を決めるアライメントバーのズレに起因していると推測される。特に結像性能の要求値を越えた Pt-L β 付近では半径 155 mm より内側でしか反射せず、その領域では各スポットの結像位置が下方に偏っている (図 7.55 ~ 7.57)。

ここでは Q3 の結像性能劣化の原因についてさらに詳しく考察する。まず、X 線のエネルギー E における臨界角 θ_c に着目する。 n 番目の反射鏡の傾斜角 θ_n は、望遠鏡の外側にいくほど大きくなる。つまり $\theta_n > \theta_c$ となる反射鏡では X 線は反射を起こさなくなる。さらに θ_c は $\frac{1}{E}$ に

¹Pt-L γ はエネルギーが高く SXT ではほとんど反射しない。そのため、測定の統計が少なく、有効面積が予想値より小さくなる傾向がある。

8.3 結像性能

比例する性質があるため、エネルギーが大きくなるほど θ_c は小さくなる。つまり高エネルギーになるほど望遠鏡の内側でしか反射を起こさなくなる。例えば、スポットスキャン時に用いた Ti-K α (4.51 keV) の場合は $\theta_c = 0.98^\circ$ であるが、反射鏡の傾斜角は $0.15^\circ \sim 0.57^\circ$ のため、X線は望遠鏡の全領域で反射する。一方、ラスタースキャン時に用いた Pt-L α (9.44 keV) の場合 $\theta_c = 0.47^\circ$ となり、X線は望遠鏡の半径 185 mm より内側の領域でのみ反射する。図 8.4 に反射鏡の傾斜角と臨界角の関係を示す。

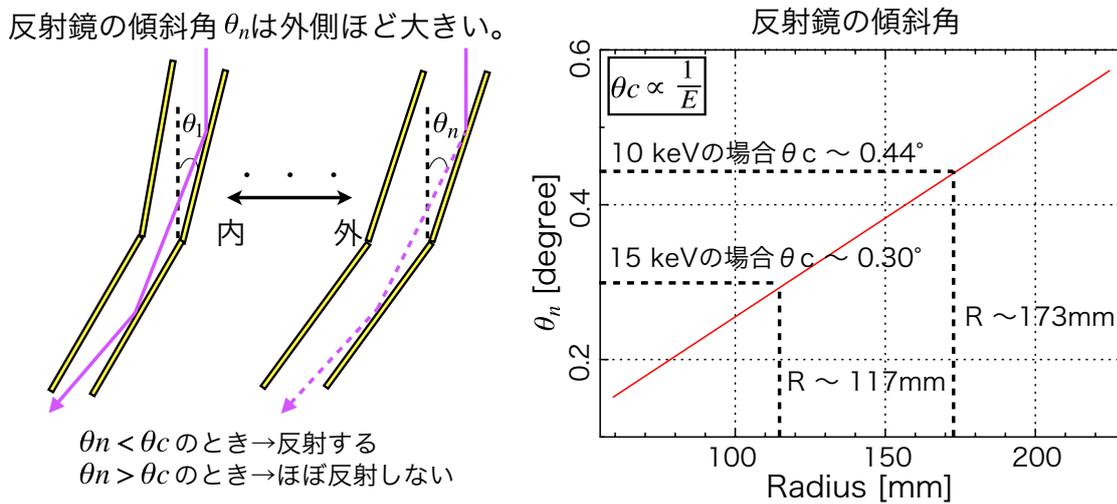


図 8.4: 反射鏡の傾斜角と臨界角の関係。

結像性能の要求値を越えた Pt-L β (11.07 keV) の臨界角は 0.39° であり、図 8.4 より X線が反射する領域は望遠鏡の半径 155 mm 付近より内側となる。これについて、実際に Ti-K α における Q3 のスポットスキャンのデータから半径 155 mm より内側のデータのみを使い、形状誤差 (図 8.5) と位置決め誤差 (図 8.6) を見積もってみる。結果を表 8.5 にまとめる。解析の結果、形状誤差は 1.08 分角となり、望遠鏡全面で反射した場合と比較して大きな変化は見られなかった。一方、位置決め誤差は 1.46 分角となり、望遠鏡全面で反射した場合と比較して約 60% 大きくなった。つまり高エネルギーになるほど結像性能が悪化する原因は、反射鏡の位置決め誤差に起因していると言える。また、形状誤差と位置決め誤差から算出した望遠鏡全体の HPD は 1.78 分角となり、ラスタースキャンで得られた HPD (1.77 分角) と consistent であることが示せた。

表 8.5: Q3 全体 (Ti-K α 相当) と Q3 の半径 155 mm 以内 (Pt-L β) の領域の反射鏡の形状誤差と位置決め誤差。

反射領域	HPD _{形状}	HPD _{位置}	HPD _{Q3}	HPD _{ラスタースキャン}
全面 (Ti-K α 相当)	1.01'	0.92'	1.37'	1.40'
半径 155 mm 以内 (Pt-L β 相当)	1.08'	1.46'	1.78'	1.78'

8.3 結像性能

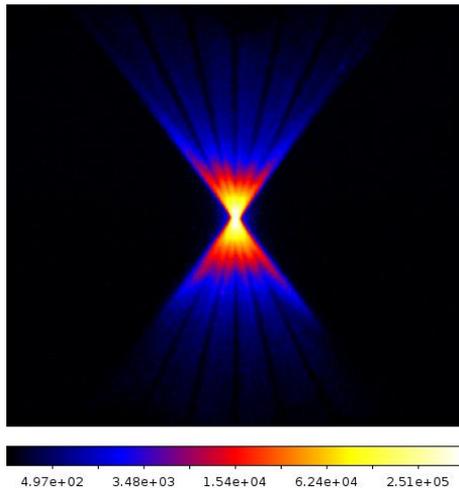


図 8.5: Q3 の半径 55 mm ~ 155 mm の領域における形状誤差。

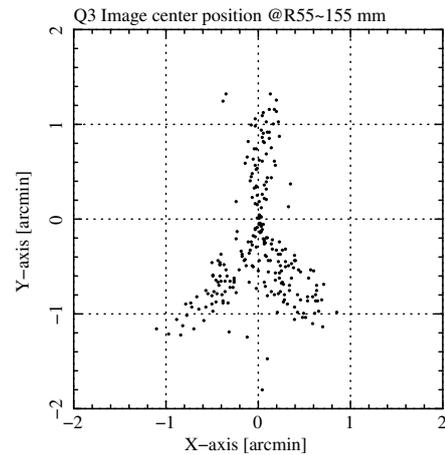


図 8.6: Q3 の半径 55 mm ~ 155 mm の領域に

における位置決め誤差。

図 8.7 ~ 8.10 に半径毎と位相角毎の、位置決め誤差と形状誤差の HPD の変化を示す。これらを見ても Q3 の HPD が最も悪いのが分かる。形状誤差はどの Quadrant も同じような傾向が見られ、個性はほとんど無い。反射鏡の端は製作の加工精度が悪いので、2 分角を超えるものもある (図 8.8)。

望遠鏡を 180 ° 回したときのイメージの形や HPD に関しては、回す前後で大きな違いは見られないため、重力による反射鏡の変形は小さいと思われる。

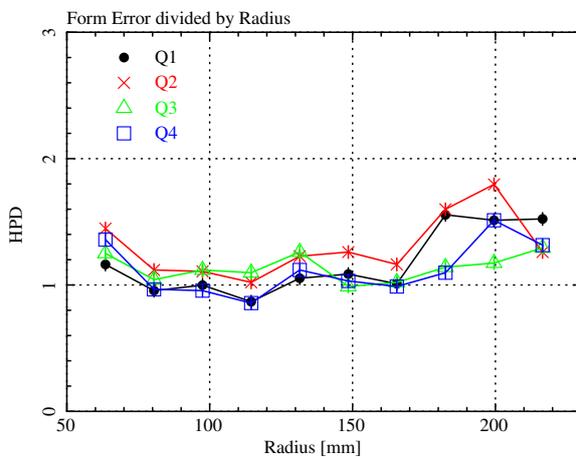


図 8.7: 半径毎の形状誤差。

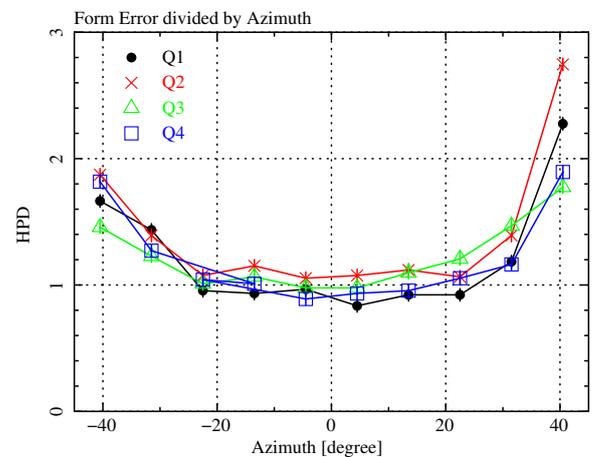


図 8.8: 位相角毎の形状誤差。

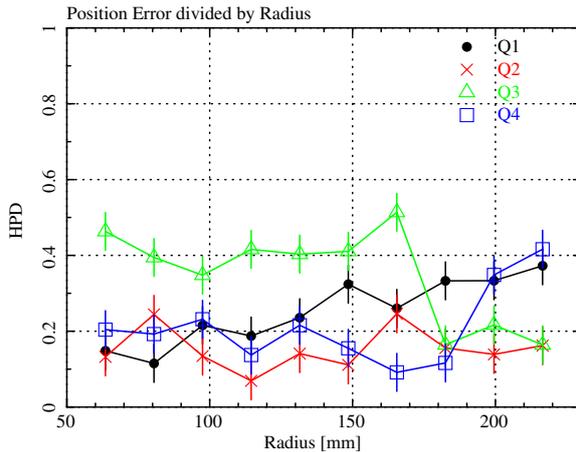


図 8.9: 半径毎の位置決め誤差。

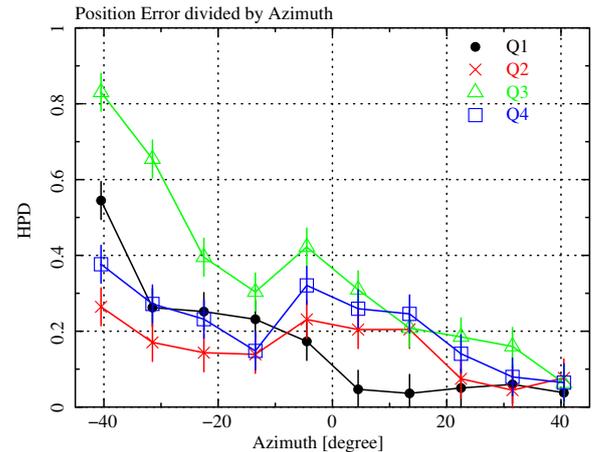


図 8.10: 位相角毎の位置決め誤差。

8.4 迷光

第 6.11 章では 3 つの測定方法で迷光の分布を調査した。一つ目は、off-axis 角が $\pm 30'$ のときの迷光分布パターンである。 $+30'$ では secondary only 成分が見え、No.1 の反射鏡とハウジングの間をすり抜ける direct 成分が弧状に現れているが、 $-30'$ 側では、シミュレーションで予想された No.1 の反射鏡による primary only 成分は確認されなかった。

二つ目は、最も内側の反射鏡 (No.1) の迷光分布パターン (off-axis 角 $-60' \sim +60'$) である。図 6.118 を見ると、 $-30'$ では見えなかった primary only が $-10'$ 付近で、また、secondary only 成分が $+10'$ 付近で現れていた。これらはどちらも No.1 の反射鏡に起因する成分であり、正常 2 回反射を含めた全ての No.1 の反射成分を遮れば上記の primary 成分、direct 成分はゼロにできる。すざくではプリコリメータのリテーナープレートの交換により No.1 からの secondary only を阻止した。一方、今回の SXT のプリコリメータはハウジングに固定されているため、リテーナープレートの交換はできない。代わりに、サーマルシールドのアルミフレームの内縁を大きくすることで No.1 の反射鏡を完全に隠し、primary 成分と direct 成分も同時に遮断するという対策が考えられる。しかしアルミフレームの構造を変えることでサーマルシールドが破ける等の懸念があるため、具体的な対策を今後慎重に検討する必要がある。

三つ目の測定はセクター毎の迷光分布パターン (off-axis 角 $-30', -15'0', +15', +30', +45', +60'$) である。 $+15'$ に見られるのが No.1 の secondary only 成分、 $+30'$ に見られるのが素通り成分と思われ、これらは上述した二つの測定でも確認されている。 $+60'$ に見える direct 成分のような迷光は、プリコリメータと primary の隙間を通り抜けてきた成分と推測される。Primary の反射鏡はアラインメントバーに、プリコリメータのブレードはアライメントプレートによって保持されているため、両者の間には隙間が生じる。この隙間はプリコリメータのブレードを厚くすることで遮ることができる。完全に遮られていないことから、プリコリメータがずれて搭載されていることが考えられるが、SXS の視野におけるこの成分は、on-axis に対する有効面積は 0.0005% と非常に小さくその影響は小さいと推測される。

第9章 まとめと今後の展望

9.1 まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

1. 望遠鏡光軸の特定

衛星アライメントに必要となる望遠鏡光軸の測定を行った。その結果、キューブミラー法線に対する望遠鏡光軸の離角（平置き時）は、 $(\theta_y, \theta_z) = (-151'', -173'')$ と決まった。また、Q1UにおけるX線の望遠鏡光軸は $(\theta_y, \theta_z) = (-143'', -188'')$ となり、Q3UにおけるX線の望遠鏡光軸と20秒角ずれていた。これはQuadrant毎の光軸を比較（図6.79）しても同じ方向（右下）にずれていた（ただしQ3のみ左下）。一方で、Q3UにおけるX線の望遠鏡光軸と平置きにおける可視光の望遠鏡光軸は10秒角以内で一致していた。

2. 有効面積

望遠鏡の基本単位であるQuadrantの有効面積は、どのエネルギーにおいてもQ4が低く、平均より4～5%小さいことがわかった。望遠鏡全体の有効面積は要求値を十分満たしていることが確認でき、すざくと比べて低エネルギー側では1.3倍、高エネルギー側では1.5倍大きくなり、望遠鏡としての性能が向上していることがわかった。また、Pt-L γ を除くこれらの有効面積の結果から、反射鏡の表面粗さを4.4Åと見積もった。

3. SXSの視野に入る有効面積

SXSの視野は一辺が5mm角（5.6mで3分角）であり、on-axisにおける有効面積の90%が入るようSXTのアライメントが要求されている。望遠鏡光軸を中心に行ったvignettingの結果、SXSの視野内に望遠鏡光軸が入っていれば90%以上の有効面積が得られることがわかった。

4. エネルギーの違いによるvignettingのモデル化

エネルギーの違いによるoff-axis角のvignettingをより定量的に評価するため、Lorentzianを用いてモデル化を試みた。測定の結果、Al-K α やTi-K α の低エネルギー側ではLorentzianでよく再現できた。一方、Pt-L α やPt-L β などの高エネルギー側では、大きいoff-axis角においてモデルよりデータの方が小さくなる傾向があり、再現よくモデル化するには大きいoff-axis角でcut-offを入れることなどが必要である。

5. 焦点距離

可視光とX線による焦点距離を、LR法を用いて算出した。その結果、可視光に比べてX線による焦点距離の方が～10mm短い結果となった。全体としてQ1, Q3は数十ミリ短く、Q2, Q4は数ミリで合っている。衛星に搭載する際は、望遠鏡の焦点距離を調整する

9.2 今後の展望

ことはない。理由は、衛星は全体で力学的に安定となる設計をしており、衛星最上部に置かれる望遠鏡の位置を変えるとこのバランスが崩れてしまうためである。

6. 結像性能

望遠鏡全体の結像性能は HPD で ~ 1.3 分角となり、要求値を十分満たしていることがわかった。ただし高エネルギーになるほど HPD が悪化する傾向にある。Quadrant 毎の結像性能を見てみると、Q3 は高エネルギーになるほど HPD が悪化しており、これが望遠鏡全体の HPD の悪化に寄与していると推測される。

スポットスキャンによる結像性能劣化の要因の切り分けでは、反射鏡の形状誤差はどの Quadrant も 1 分角程度だが、位置決め誤差は Quadrant 毎に個性が現れた。特に Q3 の結像位置のばらつきが大きく、要求値を越える Pt-L β (11.07 keV) における位置決め誤差は 1.46 分角となった。つまり高エネルギーになるほど結像性能が悪化する原因は、望遠鏡の内側の反射領域の位置決め誤差が原因であることがわかった。また、望遠鏡を 180° 回したときのイメージの形や HPD は、回す前後で大きな違いは見られなかった。

7. PSF の tail

SXI の視野内で、PSF の tail がどこまで伸びるかを調査した。その結果、Al-K α , Ti-K α , Cu-K α における散乱成分は一致しており、また、primary only 成分が SXI の視野外まで伸びていることが確認出来た。

8. 迷光

プリコリメータによって secondary only 成分が大幅に低減されていることが確認できた。一方で、迷光の主成分でなかった No.1 による primary 成分 (~ 0.2 cm 2) や direct 成分 (~ 0.05 cm 2) が相対的に目立つようになった。プリコリメータの構造上これらを遮断することはできず、その対策を施すことは非常に困難であるため、実際の観測では迷光が問題にならず運用できるよう、追測定を行い、迷光が出る場所を調査した。

9.2 今後の展望

9.2.1 SXT-2号機の地上性能評価

我々は 2013 年 12 月から SXT-2 号機の地上性能評価を行っており、1 号機同様、様々な測定を続けている。現在、2 号機の方が 1 号機より有効面積が $\sim 2\%$ 大きいことがわかったため、2 号機を SXT-S、1 号機を SXT-I とする方針である。

9.2.2 応答関数の構築

地上性能評価をした測定結果は応答関数の構築に利用される。応答関数は様々な測定機器に対して個別に用意しなければならず、天体からの正しい物理情報を得るために欠かせない最も重要な作業の一つである。

9.2.3 No.1 に起因した迷光成分の遮断

SXS の視野において、最も内側の反射鏡 (No.1) に起因した迷光成分は、on-axis に対して 0.1% と決して小さくない。望遠鏡の構造上、これらの迷光を防止する対策は困難である。今後はより詳細な迷光の分布パターンを調査するとともに、具体的な防止対策についても要検討する必要がある。

参考文献

- [1] 今村 晃介、修士論文、ASTRO-E 衛星搭載用 X 線望遠鏡の地上較正試験と応答関数の構築、神戸大学大学院、2000
- [2] 森 英之、修士論文、Astro-E2 搭載用 X 線望遠鏡の迷光防止用コリメータの開発、東京大学大学院、2002
- [3] 飯塚 亮、修士論文、Astro-E2X 線望遠鏡搭載用プリコリメータの開発と期待される効果、東京大学大学院、2003
- [4] 伊藤 昭治、修士論文、AstroE2 衛星搭載 X 線望遠鏡の地上較正試験と期待される性能、東京大学大学院、2004
- [5] 横山 裕士、修士論文、Astro-E2 搭載用 X 線望遠鏡の背面反射による迷光のモデル化とその検証、中央大学大学院、2004
- [6] 市原 昂、修士論文、X 線望遠鏡性能評価システムの高性能化とすざく型望遠鏡を用いた性能実証試験、首都大学東京大学院、2013
- [7] 富川 和紀、ビームライン週報 No.506、首都大学東京大学院、2013
- [8] 佐藤 寿紀、ビームライン週報 No.507、首都大学東京大学院、2013
- [9] 泉谷 喬則、ビームライン週報 No.508、中央大学大学院、2013
- [10] 飯塚 亮、ビームライン週報 No.510、ASTRO/ISAS/JAXA、2013
- [11] 佐藤 寿紀、ビームライン週報 No.512、首都大学東京大学院、2013
- [12] 富川 和紀、ビームライン週報 No.513、首都大学東京大学院、2013
- [13] 佐藤 寿紀、ビームライン週報 No.517、首都大学東京大学院、2013
- [14] 富川 和紀、ビームライン週報 No.518、首都大学東京大学院、2013
- [15] 菊地 直道、ビームライン週報 No.519、首都大学東京大学院、2013
- [16] 林 多佳由、ビームライン週報 No.522、ASTRO/ISAS/JAXA、2013
- [17] 富川 和紀、ビームライン週報 No.523、首都大学東京大学院、2013
- [18] 佐藤 寿紀、ビームライン週報 No.527、首都大学東京大学院、2013

謝辞

本論文を完成するにあたり大変多くの方々にお世話になりました。石田學先生には、実験への取り組み姿勢や物事を順序立てて考察する重要性を学びました。また、宇宙研に留まらず、他大学や外部の実験施設で実験をする多くの機会を与えて頂き、様々な知識や経験を得ることができました。宇宙研で3年間このような環境を提供して頂いたことに深く感謝致します。大橋隆哉先生には、当時まだ学部3年生だった私が研究室訪問をした際に、宇宙研で研究が出来ることを教えて頂きました。これが石田先生の下で研究をするきっかけとなりました。また、学会や卒論、修論等の発表練習に何度も付き合っ頂き大変お世話になりました。さらには大橋研20周年や大橋先生の還暦という大きな節目をお祝いできたことを大変喜ばしく思います。宇宙研で3年間研究出来る場を与えて頂き、この場を借りて改めてお礼申し上げます。前田良知先生には、主に実験面で大変お世話になりました。宇宙研の実験装置はスケールが大きく、何もかもが分からないことだらけだった私に、物理とは何かを交えながら丁寧に教えて頂きました。また、そのユニークな雰囲気ですべてを周りを楽しませてくれて、非常に充実した研究生生活を送ることができました。森英之さんには、Spring-8でのキャルやSXTの解析の面で大変お世話になりました。森さんのその的確な指摘にはいつも敬服するばかりでした。また、宇宙研に来られたときには一緒に夕食を食べ、他愛も無い話をするのがとても好きでした。修論執筆中は、森さんがモニタールームに置いた某漫画を読んで息抜きをしました。飯塚亮さんには、キャルの面で非常にお世話になりました。飯塚さんは私が修士2年のときに宇宙研にスタッフとして来られ、私の些細な疑問や解析結果の解釈など、ひとつひとつ丁寧に非常に分かりやすく教えて頂きました。また、関西弁で話すその口調とムードで周囲を穏やかな雰囲気に包んでくれました。林多佳由さんには、スタッフとしての仕事もあるにも関わらず、いつも夜遅くまで実験の面倒を見て頂きました。特にスクリプト関係では林さんがいなければできないものばかりでした。また、お酒の場では生活面についてもよく相談して頂きました。林さんからもらう言葉はどれも考えさせられることばかりでした。佐藤拓郎さんには、SXT-EMのキャルを通してご指導して頂きました。この時はまだ私が学部4年生時で、佐藤さんは最も身近な研究者の先輩として圧巻の存在でした。今では釣やスノーボードを一緒に楽しむ仲間になり、非常に充実した研究生生活を謳歌することができました。佐藤寿紀くんには、一つ下の後輩として2年間お世話になりました。佐藤くんは卒研生の頃から非常に理解度が高く、様々な実験を通して、自分の方が後輩なのでは？と勘違いするほど多くの事を教わりました。本修論は佐藤くん無しでは完成し得なかったです。心ばかりながら、これからの研究者としての今後を応援しています。菊地直道くんは、卒研生ながら非常にモチベーションが高く、研究面で1年間お世話になりました。菊地くんはキャルの途中から宇宙研に来たにも関わらず、実験の飲み込みが早く、即戦力として共に実験を行いました。また、誰とでも気兼ねなく話せるその性格で、いつも周囲を楽しい場にしてくれました。また、同期の垣内くんは卒研生の時から研究の面でお互い切磋琢磨してきました。生活面においても、研究の合間にくだらない話をしたりと大変お世話になりました。

本修論は私一人では到底完成できるものではありませんでした。また、宇宙研での3年間の研究生生活は私にとって非常に有意義で大切な経験となりました。社会人になっても機会があればモニタールームにコーヒーを飲みに行きたいと思います。最後になりますが、研究・生活面で関わった全ての方々に感謝致します。ありがとうございました。