

SUZAKU 衛星搭載 XIS の軌道上較正

大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻
博士前期課程 2年

宮内 智文

概要

SUZAKU 衛星は、2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた日本で第 5 番目の X 線天文衛星である。衛星には 4 台の X 線 CCD カメラ (XIS) が搭載されており、現在全てが正常に動作し、既に 60 を越える天体を観測している。

我々はこの XIS の低エネルギー側 (0.2-2.2keV) の地上較正試験を行ない、検出効率やエネルギー線形性等の応答関数構築に努めてきた。しかし、軌道上では地上での較正結果がそのまま全て使用できるわけではない。例えば、衛星軌道に分布する荷電粒子による放射線損傷によって、CCD の電荷転送効率が徐々に低下する現象は避けられない。この点に関して、XIS に搭載されている較正用 X 線源のデータを解析し、CCD の読み出し口からの距離、打ち上げ後の時間の関数として信号波高値の変化を追跡した。その上で、データ解析の中で、この電荷転送非効率を補正するパラメータを決定した。本論文では、パラメータを決定する方法、補正の精度を検査し、実際に天体を観測したデータに適用、補正の精度を検査した。

これ以外にも、多くの軌道上較正の項目がある中で、本研究では、1) 地球大気の散乱 X 線の混入、2) 検出効率の時間変化に関しても調査した。

目次

第 1 章 SUZAKU 衛星	4
1.1 SUZAKU 衛星	4
1.1.1 X線望遠鏡 (XRT)	5
1.1.2 X線カロリメータ (XRS)	5
1.1.3 硬 X線検出器 (HXD)	5
1.1.4 X線 CCD カメラ (XIS)	6
第 2 章 SUZAKU 衛星搭載 XIS	7
2.1 XIS システム	7
2.1.1 Base	7
2.1.2 Bonnet	10
2.1.3 XIS 回路部	11
2.1.4 XIS-AE/TCE	11
2.1.5 XIS-DE	11
2.2 XIS-CCD の駆動モード	11
2.3 表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD	13
2.4 XIS のデータ処理の概要	14
2.4.1 機上でのデータ処理	14
2.4.2 ダークレベル (ピクセル毎の) 補正	14
2.4.3 光洩れ (ダークレベルの時間変化) 補正	15
2.4.4 イベント抽出	16
2.4.5 Edit Mode	16
2.4.6 地上でのデータ処理	16
2.4.7 XIS Grade	18
2.4.8 較正実験のデータ処理	18
2.5 XIS の基本性能	20
2.5.1 読みだしノイズ	20
2.5.2 暗電流	20
2.5.3 電荷転送非効率 (Charge Transfer Inefficiency:CTI)	21
2.5.4 ホットピクセル・フリッカリングピクセル	21
2.6 応答関数	22
第 3 章 ゲイン較正	24
3.1 電荷洩れ	24

3.1.1	グレード分岐比	24
3.1.2	電荷洩れ	26
3.2	電荷洩れ補正の方法	29
3.2.1	転送回数と電荷洩れ量	29
3.2.2	中心パルスハイトと電荷洩れ量	33
3.2.3	電荷洩れの補正	34
3.3	軌道上データでの確認	40
3.3.1	キャリブレーションソース (^{55}Fe)	40
3.3.2	RXJ1856・M82	52
3.4	CTI補正	61
3.5	CTI補正の検証	80
3.5.1	銀河中心	80
3.5.2	CygnusLoop北東端	82
3.5.3	CTI補正の精度について	83
第4章	地球大気による	
	酸素・窒素輝線バックグラウンド	85
4.1	データセレクション	85
4.2	データ・リダクション	86
4.2.1	テレメトリ飽和時間帯の除去	86
4.2.2	光漏れ補正量の制限	86
4.3	地球の縁と視野方向の角度 (DYE_ELV,NTE_ELVによるデータの分類)	86
4.4	NGC 4388	87
4.4.1	イメージ	87
4.4.2	ライトカーブ	91
4.4.3	EHK	91
4.5	NGC 4945	92
4.5.1	イメージ	92
4.5.2	ライトカーブ	92
4.6	NGC 720	98
4.6.1	イメージ	98
4.6.2	ライトカーブ	98
4.7	地球大気バックグラウンドの長期変動	104
4.7.1	窒素	104
4.7.2	酸素	104
4.7.3	コンタミネーション評価へ利用	106
第5章	まとめ	109

付録 A	XIS 検出効率の時間変化	110
A.1	XIS+XRT の有効面積を決めている構成要素とその地上較正	110
A.2	XIS+XRT の有効面積の軌道上での検証	111
A.2.1	RXJ1856.5-3754 の観測	111
A.2.2	E0102 の観測	111
A.2.3	Cyg Loop の観測	113
A.3	原因の追究と対策	113
付録 B	地球大気による酸素・窒素輝線バックグラウンド	117
B.1	DYE_ELV 毎のスペクトル	117
B.2	DYE_ELV 毎の Light Curve	120
B.3	全データを重ね合わせ	133
B.4	窒素蛍光輝線バンドのイメージ	134
B.5	酸素蛍光輝線バンドのイメージ	146

第1章 SUZAKU衛星

SUZAKU(すざく)衛星 (Astro-E2) は、はくちょう (1979 年打ち上げ)、てんま (1983 年打ち上げ)、ぎんが (1987 年打ち上げ)、あすか (1993 年打ち上げ) に続き、2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた日本で第 5 番目の X 線天文衛星である。2000 年 2 月、打ち上げロケットの不具合により軌道投入できなかった Astro-E 衛星の 2 号機である。衛星は JAXA の M-V-6 号ロケットにより、近地点高度 250km、遠地点高度 550km の楕円軌道に投入、その後、搭載二次推進系により、高度約 550km の略円軌道へ修正された。

本章では SUZAKU 衛星について紹介する。

1.1 SUZAKU衛星

SUZAKU 衛星は直径 2.1m、全長 6.5m(軌道上で鏡筒伸展後) の大きさを持ち、太陽パドルを広げると 5.4m の幅になる。衛星の重量は 1700kg にもなり、日本の科学衛星としてはこれまでにない大型衛星である。



図 1.1: M-V ロケットに結合された SUZAKU 衛星。[12]

SUZAKU 衛星には、5 台の X 線望遠鏡 (XRT) が搭載されており、その焦点面には 4 台の X 線 CCD カメラ (XIS) と 1 台の X 線カロリメータ (XRS) が置かれる。さらに、10eV-700keV という硬 X 線帯域での世界最高感度を持つ硬 X 線検出器 (HXD) が搭載され、他検出器とあわせると 0.2-700keV という広帯域の観測能力を持つ。

これらの X 線観測機器の開発は宇宙科学研究所を中心として、大阪大学・東京大学・東京都立大学・理化学研究所・名古屋大学・京都大学等の国内の研究機関・大学及び NASA ゴダードスペースフライトセンター・マサチューセッツ工科大学・ウィスコンシン大学等のアメリカの研究機関・大学と協力して行なわれた。

SUZAKU 衛星は、2005 年 7 月 10 日 12 時 30 分に、鹿児島県にある内之浦宇宙空間観測所 (USC) から M-V-6 号ロケットに搭載され、打ち上げられた。打ち上げ後も正常に飛行し、近地点高度約 250km、遠地点高度約 550km、軌道傾斜角 31.4 度の所定の軌道に無事投入された。残念ながら、打ち上げ後、XRS を冷却する液体ヘリウムが洩れだしてしまい XRS での観測はできなくなってしまった。しかし、XIS、HXD は正常に動作しており、すでに 60 を越える天体を観測している。

1.1.1 X 線望遠鏡 (XRT)

SUZAKU 衛星搭載の X 線望遠鏡 (XRT:X-ray Telescope) は ASCA(あすか) 衛星に搭載されていた XRT を改良した多重薄板 X 線望遠鏡である。搭載されている 5 台のうち、4 台 (XRT-I) の焦点面には XIS、1 台 (XRT-S) の焦点面には XRS が搭載される。

口径は 40cm で、焦点距離は、XRT-I が 4.75m、XRT-S が 4.5m である。

厚さ 178 μ m の薄板型反射鏡を同心円上に約 170 枚並べることで、小型超軽量だが高い効率の X 線望遠鏡を実現している。また、ASCA 衛星 XRT に比べて、平均の斜入射角が小さく、エネルギーの高い側での反射率は 2 倍 (@6keV) 程度高い。

SUZAKU 衛星 XRT は、11keV を超える X 線に対しては現行の NEWTON 衛星や CHANDRA 衛星を凌ぐ有効面積を有している。

1.1.2 X 線カロリメータ (XRS)

XRS(X-ray Spectrometer) は、X 線マイクロカロリメータを使った検出器である。X 線マイクロカロリメータは、素子を極低温に冷やし、入射 X 線のエネルギーを素子の温度上昇として測定する。極めて精度よく入射 X 線のエネルギーを決めることができ、6-7eV のエネルギー分解能を達成している。

軌道上で極低温を実現するために、断熱消磁型冷凍機、液体ヘリウム容器、固体ネオン容器、機械式冷凍機の冷却システムが導入されている。XRS の寿命は冷媒である個体ネオンの量で決まり、2.5 年となっている。

残念ながら、軌道上で液体ヘリウムが洩れ出してしまい、素子を冷却することができなくなってしまった。現在 XRS による観測は行なわれていない。

1.1.3 硬 X 線検出器 (HXD)

HXD(Hard X-ray Detector) は、井戸型複眼フォスウィッチ結晶シンチレータに、シリコン PIN フォトダイオードを加えることで、10-600keV という広帯域に感度を持つ硬 X 線検出器である。SUZAKU 衛星で唯一 X 線反射鏡を用いない非イメージング装置として、硬 X 線の観測を行なう。

井戸型フォスウィッチ構成及びアンチカウンターにより低バックグラウンドを実現している。特に10-200keVでは、過去にない高い検出感度をもつ。

大面積のアンチカウンターは、ガンマ線バーストの検出器を兼ねるとともに、明るいX線源の長時間モニターや、X線新星の発見にも利用することができる。

1.1.4 X線 CCD カメラ (XIS)

XIS(X-ray Imaging Spectrometry) はSUZAKU衛星で唯一撮像可能なX線 CCD カメラである。

3台の表面照射型 CCD(FI-CCD) と1台の裏面照射型 CCD(BI-CCD) から成る。BI-CCD は素子表面の吸収層がほとんどないために、低エネルギー側の感度が高く、FI-CCD は空乏層が厚いので高エネルギー側の感度が高い。この2種類の素子によって0.2-12keVのX線帯域で広い視野をもっている。4台をあわせると、高エネルギーX線に対して世界でも最大級の有効面積をもつ。

XISについては、2章でより具体的に紹介する。

表 1.1 に各検出器の諸性能を示す。

	XRS	HXD	XIS
感度帯域	0.5-10keV	10-600keV	0.2-12keV
有効面積 (cm ²)	150@6keV	160@2keV 330@100keV	300@1keV
視野	2.9'×2.9'	0.56°×0.56°(<100keV) 4.5°×4.5°(>100keV)	18'×18'
素子数	30	4×4(Well) 20(Anti)	1024×1024
素子サイズ	29"×29"		1.1"×1.1"
エネルギー分解能	6-7eV	3keV@20keV 10%@550keV	130eV@6keV
時間分解能	100 μs	61 μs	8ms - 8s
寿命	~2.5年	-	-

表 1.1: 各検出器の諸性能

第2章 SUZAKU衛星搭載XIS

XIS(X-ray Imaging Spectrometers) は、X線天文衛星SUZAKU衛星搭載用のX線CCDカメラで、宇宙科学研究所(ISAS)、京都大学、大阪大学、マサチューセッツ工科大学(MIT)が中心となり、富士通、日本電気の協力で開発された。

SUZAKU衛星には、4台のXISが各々X線望遠鏡(XRT)の焦点面に搭載される。XISはカメラ本体(センサーと呼ばれる)の他に、XIS-CCDのドライブや出力信号のA/D変換、CCD温度制御のための回路系であるXIS-AE/TCE(Analog Electronics / Thermal Controller Electronics)、XIS-AE/TCEから出力される信号からX線イベントを抽出処理し、地上送信用のデータに編集するXIS-DE(Digital Electronics)から構成される。なお、この章は[1]の内容を多く引用させていただいた。

2.1 XISシステム

2.1.1 Base

XISセンサーはCCD素子が納められているBase部と、可視光遮断フィルタや較正線源を含む上部構造Bonnet部からなる。

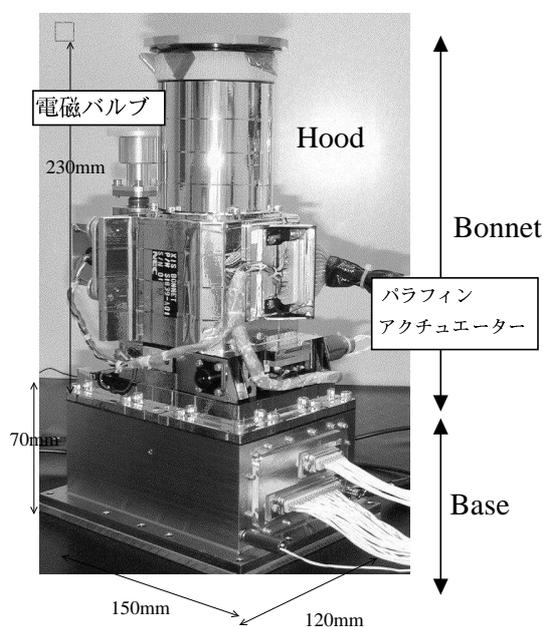


図 2.1: XIS センサー外観図 [4]

CCD 素子

CCD 素子 (図 2.2、図 2.3) は、MIT Lincoln Laboratory で開発された CCID41 で、3 相クロックのフレームトランスファー方式を採用している。撮像領域の 1 画素の大きさは $24 \times 24 \mu\text{m}$ で、有効画素数は 1024×1024 である (物理的な画素数は $1024(\text{H}) \times 1026(\text{V})$ であるが、XIS では転送領域に近い 2 列を読み飛ばすようなマイクロコード (後述) にしている)。各 CCD 素子は高速化をはかるため 4 つの読みだしノードをもつ。各ノードで読み出される領域 ($256(\text{H}) \times 1024(\text{V})$) を、セグメント (A,B,C,D) と呼んでいる。これら 4 つの部分は同じウエハー上で作られているおり、セグメント間に物理的な隙間 (ギャップ) は無いが、CCD に内蔵された読みだし FET は独立でゲインは異なる。

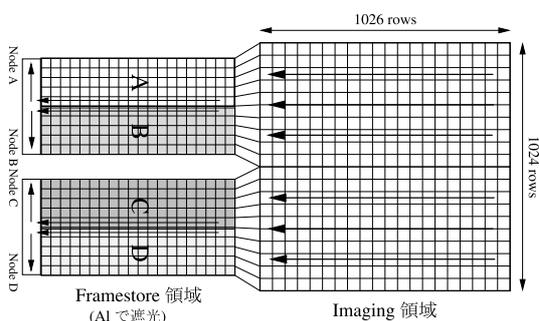


図 2.2: XIS-CCD の模式図

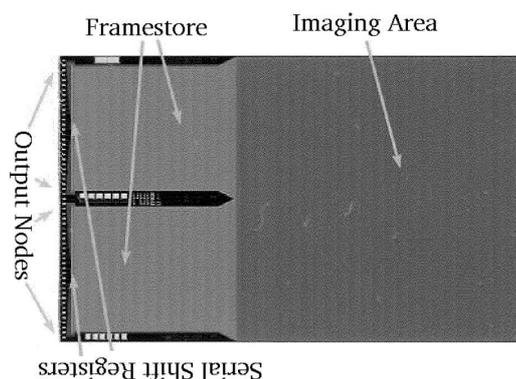


図 2.3: XIS-CCD

XIS には表面照射型 CCD 素子 (FI-CCD) と裏面照射型 CCD 素子 (BI-CCD) の二種類が搭載される (図 2.13、図 2.14)。FI-CCD の断面の SEM 写真を図 2.5、図 2.7 に示す。電荷を転送する為の電極は、ゲートと呼ばれ (図 2.4)、CCID41 では 3 つのゲートに与える電圧を変化させて電荷を転送する (図 2.8)。一方転送方向と垂直な方向には、隣のピクセルに電荷が洩れ出すのを防ぐ為にチャンネルストップと呼ばれる構造を持つ (図 2.6)。チャンネルストップではアクセプターイオンを集中してドーピングし p^+ 型にすることでポテンシャル障壁を作っている。

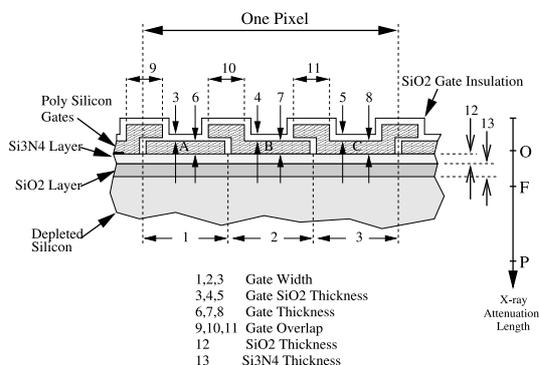


図 2.4: ゲート構造の模式図 FI-CCD[3]

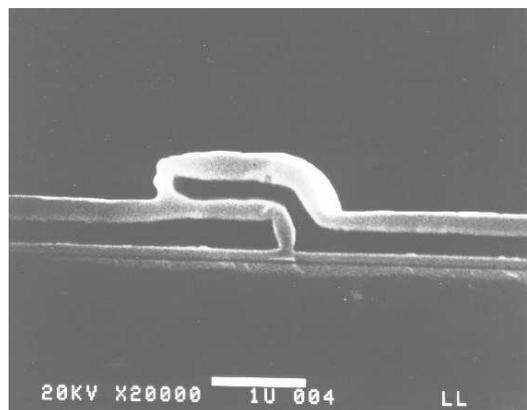


図 2.5: ゲート構造 (SEM 写真) FI-CCD[3]

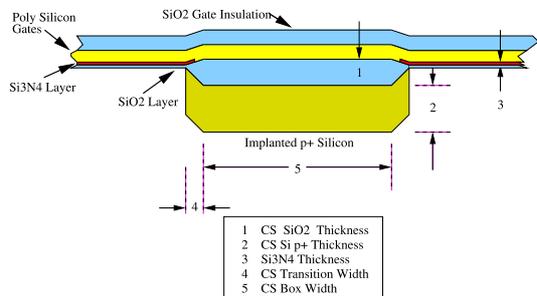


図 2.6: チャンネルストップの模式図 FI-CCD[3]

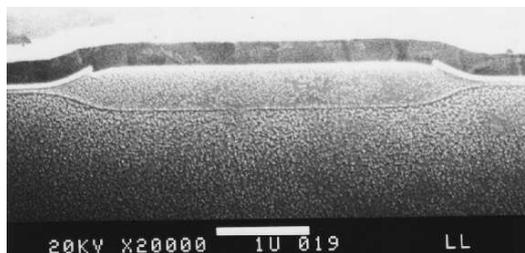


図 2.7: チャンネルストップ (SEM写真) FI-CCD[3]

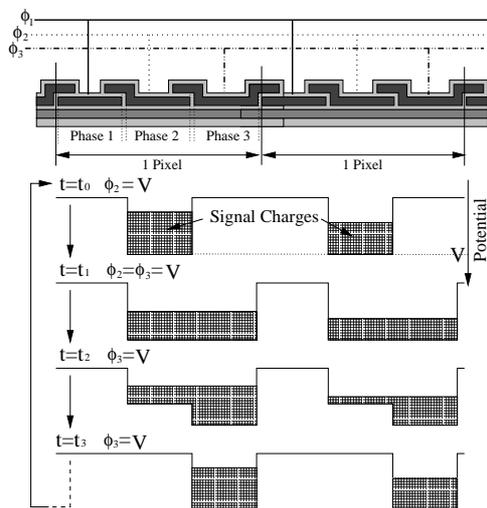


図 2.8: 三相クロック方式での電荷転送とポテンシャルの変化。[4]

Thermo Electric Coolers (TEC)

XISは暗電流を減らし、放射線による性能劣化を抑えることを目的に -90°C に冷却して運用される。XISセンサーの取り付けられるコールドプレートは、ヒートパイプを通じて、衛星側面の放射冷却パネルにつながっており、 -40°C 以下に冷却される。この温度からCCD素子のみを -90°C に冷却するために、Thermo Electric Coolers(TEC)が使われる。各CCD素子あたり3台のTEC (Be_2Te_3 のペルチェ素子を3段に積み重ねたもの)が、ベース内部の金属ブロック(ヒートシンク)とCCD素子ではさみこまれるように装着されており、TECに電流を流すことでTEC両面の温度差をつくりCCDを冷却する。

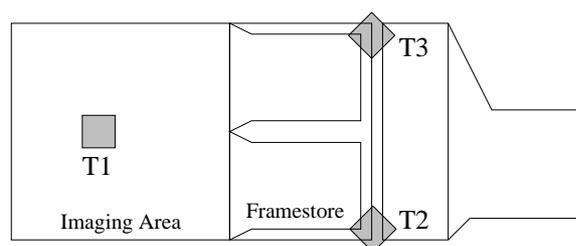


図 2.9: XIS-CCD の上面。TEC は、図のような配置で CCD チップと金属ブロックの間に 3 台取り付けられている。[4]

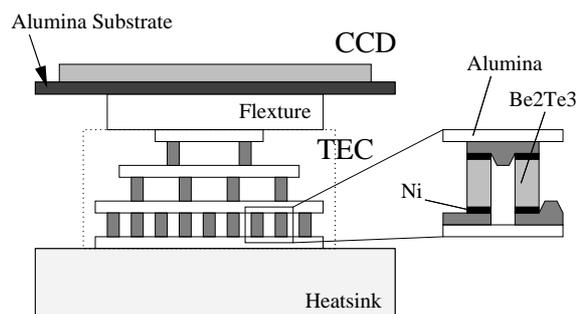


図 2.10: TEC 素子の断面図。 Be_2Te_3 を使ったペルチェ素子が 3 段に積み重なった構造をしている。

2.1.2 Bonnet

Bonnet は、可視光遮断フィルター (OBF)、較正線源、パラフィンアクチュエータで動作するドア、電磁バルブ、圧力センサー等からなり、観測光路を確保しつつ、CCD 素子への迷光及び熱外乱を低減する働きを持つ。また、打ち上げ時における OBF への負担軽減と、打ち上げ直後のアウトガスの素子への付着を防ぐ為、衛星組み上げ後から軌道に上がるまで内部を真空に保つ働きもある。

Hood

フードは 5 段のバッフルを持ち X 線や可視光はフード内壁で 1 回の反射や散乱では決して CCD 側へ向かわない構造になっている。フード内部、及び、ボンネット内部は黒色アルマイト処理により可視光の反射を防止している。外側は、外部からの熱入力を避けるために、MLI (半球反射率 0.05) で覆われている。

Calibration Source

較正線源は、軌道上でのエネルギーの絶対精度の測定の為に使用される。XIS ではセグメント D の読みだしに遠い側の一部に ^{55}Fe (半減期 2.7 年) からの X 線が照射される。これにより、 Mn-K_α (5.8988keV) と Mn-K_β (6.4905keV) の特性 X 線によるエネルギーの絶対較正を行うことが出来る。

Optical Blocking Filter(OBF)

CCDはX線以外にも可視光や、紫外線に対しても感度がある為、素子の上面に可視光遮断用のフィルターが取り付けられている。これが、Optical Blocking Filter(OBF)である。OBFは、Luxel社製で、約1000Åの厚さのポリイミド薄膜の両面に、合計約1200Åのアルミニウムを蒸着している。両面に蒸着するのは、アルミニウムに空いた小さい穴から光洩れが起こるのを防ぐ為である。OBFの可視光の透過率は、 10^{-5} 以下に抑えられ、そのX線透過率も実測されている。

2.1.3 XIS回路部

2.1.4 XIS-AE/TCE

Analog Electronics / Thermal Controller Electronics (AE/TCE)は、CCDの制御、信号処理系の電気回路と、温度制御の電気回路の総称である。各センサーごとに1台のAE/TCEが対応するが、AE/TCE 0と1、2と3は各々同じ回路箱に納められている。AEは、さらにControl Card, Driver Card, Video Cardで構成される。Control Cardは、CCDの駆動のタイミング信号を発生するSequencer回路、DEから送られる制御信号を受け取る回路、逆にAE内部の電圧や温度などのHK情報を取得する回路などからなる。XIS-CCDの1ピクセルを読み出す時間は24.414 μsec で、CCD駆動のタイミング等も全てこの時間を単位にして制御されている。Driver Cardは、Control Cardで発生したタイミング信号をもとに実際にCCDに印加するドライブ信号を発生する回路である。ドライブ信号の電圧はDAC¹により設定できる。一方、Video Cardは、CCDからのアナログ信号を読みだし、A/D変換を行う回路で、読みだしには電流積分方式がとられている。デジタル信号に変換された各ピクセルの信号はDEに送られる。

TCEは、CCD素子の温度と、ヒートシンクの温度計のデータを取得し、CCDを設定温度に保ようにTECに流す電流を制御する役目を果たす。

2.1.5 XIS-DE

Digital Electronics (DE)は、4台のPixel Processing Unit (PPU)と1台のMain Processing Unit (MPU)から構成されるデジタル処理回路である。PPUは、AEから送られてくる各ピクセルの信号を受け取り、設定されたモードに応じてX線のイベントデータを抽出したり、ダークレベルを決定する等の処理を行う。MPUは、PPUにより処理されたイベントデータを編集し、衛星のデータ処理装置を通して地上へ送り出す。データ処理装置には、イベントデータの他XIS各部分の温度や電圧などのHK情報も送られる。MPUはまた、地上から衛星に送られる指令コマンドを解釈し、DE, AEの制御を行う役目も果たす。図2.11にこれらの関係を示す。

2.2 XIS-CCDの駆動モード

XISのCCDは、Normal, Burst, Parallel-sum (P-sum)の3通りの駆動モードがある。NormalモードはCCDの全てのピクセルを(通常は)8秒周期で読み出す。この場合、露出時間は8秒ということになる。Burstモードの場合も読み出しの周期は8秒であるが、撮像領域の電荷を一度転送してクリアする操作が入るので実効的な露出時間は8秒より短くなる。Burstモードは、明るいソースに対してパイルアップが起こるのを防ぐために利用する。NormalモードとBurstモード

¹Digital Analog Converter

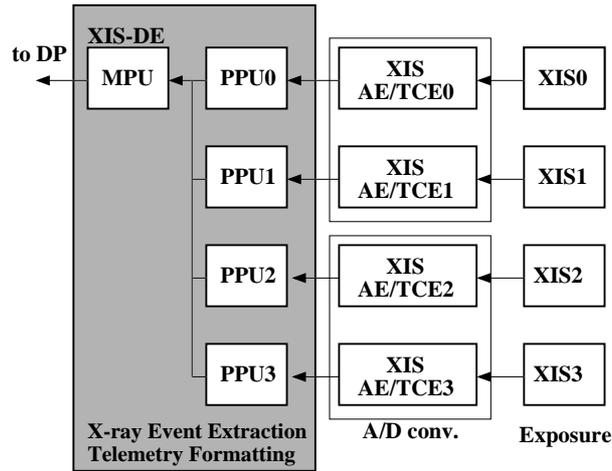


図 2.11: 各センサーと AE、DE の関係 [4]

には、Window オプションという機能を持たせることができる。この Window オプションでは、CCD の指定した範囲にあるピクセルのみを短い周期で何度も読み出すことができる (図 2.12)。範囲の指定は垂直方向のみで、ラインのサイズは、1024 ピクセルのうちの 1/4、1/8、および 1/16 に限定される。このオプションは、明るくかつ空間的なひろがりの小さいソースに対して、パイルアップを避けつつ効率的な観測を行うために利用する。

P-sum モードは、撮像領域において縦方向に 64/128/256 列を加算し、転送領域に 1 列ずつ送りデータを 1 列分読み出すという操作を連続的に繰り返すモードである。この操作により CCD の縦方向の位置情報を失うことになるが、その代わりに (ソースが点源であった場合) 時間情報を得ることができる。時間分解能は、加算列数にかかわらず、 $8/1024[\text{sec}]$ (~ 8 ミリ秒) である。このモードはまた、実効的な露出時間が短くなるのでパイルアップの影響も受けにくい。実際には早い時間情報が重要なパルサーなどのコンパクト星の観測に活用されることが期待される。

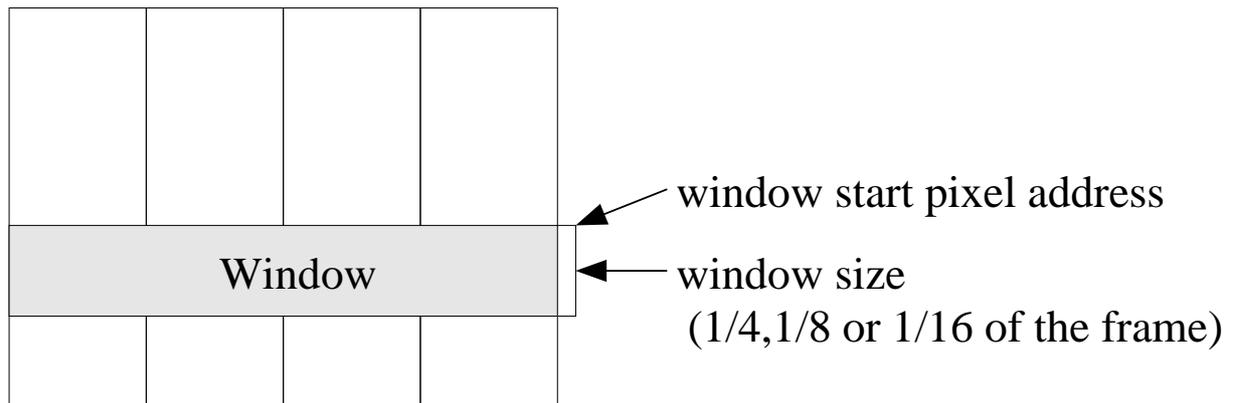


図 2.12: Window Option [4]

これらのモードの切替えは、AE の Control Card 上の Sequencer の RAM にかかれるマイクロコードと呼ばれる情報を変更することで行う。CCD の駆動では、ある電圧 (Low/High) パターンの繰り返しを多用するので、電圧パターンとそのパターンの繰り返し制御を書き込む二つの RAM が用意されている。ただし、後述の DE による処理を正常に行うためには、各セグメントの各列

のデータについて 256(Active Pixels)+16(H-Over Pixels) 個のデータの連続がなければいけない。

XIS に用いられている CCD 素子はフレーム転送型で 1024×1026 画素 (約 25mm 四角) の受光領域と同画素数の蓄積領域を持つ。蓄積領域には信号の読みだしノードを 4 つ持つ。各ノードに読み出される領域をセグメント 0、1、2、3 と呼び、それぞれ独立の読みだし回路をもっている。読みだしモードは大別すると Normal Mode と P-sum Mode の 2 つがあり、Normal Mode はユニット時間 (8 秒) 内に全画面を 1 回読み出す。P-sum Mode は CCD の各画素の電荷量を縦転送方向に指定された数 (64、128、256) だけ加算して読み出すモードで受光した 1 次元の位置情報を失うかわりに光速 (最高 8 ミリ秒) で読み出すことが可能となる。

2.3 表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD

SUZAKU 衛星では、Astro-E1 には搭載していなかった裏面照射型 CCD (Backside Illuminated: BI) を搭載する。表面照射型 CCD (Frontside Illuminated: FI) では、X 線を電極側から入射するため、低エネルギーの X 線は電極や絶縁層で吸収されてしまう。裏面照射型 CCD では、X 線を電極の逆側から入射するため、低エネルギーの X 線に対して高い検出効率を得ることができる。

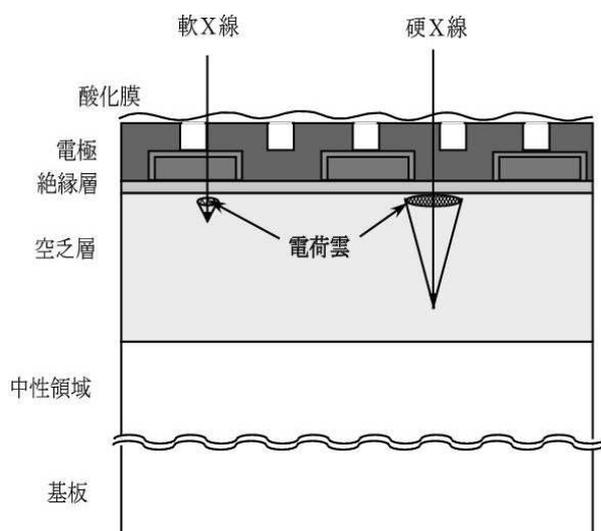


図 2.13: 表面照射型 CCD の断面図 [8]

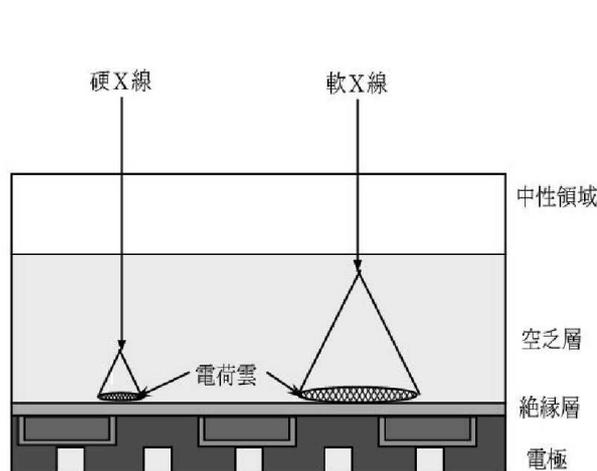


図 2.14: 裏面照射型 CCD の断面図 [8]

2.4 XIS のデータ処理の概要

XIS の X 線イベントに対するデータ処理は、機上で行なう解析と地上で行なう解析の 2 段階がある。それぞれのデータ処理について簡単に述べる。

2.4.1 機上でのデータ処理

CCD のデータは 1 フレームで 100 万画素と言う膨大な量であるため、通常の観測においては、フレームデータをそのまま地上に送付するのではなく、衛星上でデータ処理を行い、セレクションを掛けたデータのみを地上に送付することになる。そのための処理は、

1. ダークレベル (ピクセル毎の) 補正
2. 光洩れ (ダークレベルの時間変化) の補正
3. イベント抽出

の 3 つに分けられる。機上では DE がこれらのデータ処理を行なう。ここでは、DE の 3 つの処理について簡単に述べる。

2.4.2 ダークレベル (ピクセル毎の) 補正

CCD の出力する信号波高値 (ピクセルレベル) は、オフセットが付加されているため、X 線の信号のみを取り出すためには、このオフセットを決める必要がある。このオフセットの値がダークレベルである。

DE は、ダークレベルの初期化コマンドが地上から与えられると決められた撮像回数 (darkinitFrame: デフォルトは 8 フレーム) で全ピクセルのダークレベルを決定する。このような処理が必要なのは XIS-CCD にはシャッタ等の機構がなく²、信号が在るピクセルを判定、除外しなければいけないためである。ダークレベルの初期化のために、darkUpper、darkLower の 2 つの閾値が用意され、次のような論理によって各ピクセルのダークレベルが決定される。

- (i) 1 回目の撮像

撮像したデータ $PH_{raw}(1)$ を基に ダークレベル決定用のバッファ $Dark(1)$ を初期化。³

$$Dark(1) = PH_{raw}(1)$$

- (ii) 2 回目 ~ darkinitFrame

- $PH_{raw}(n) - Dark(n-1) > darkUpper \Rightarrow$
X 線か宇宙線が当たったピクセルなので何もしない

$$Dark(n) = Dark(n-1)$$

- $PH_{raw}(n) - Dark(n-1) < darkLower \Rightarrow$
 $Dark(n-1)$ の値が X 線か宇宙線が当たった時の値なので、Dark を再度初期化する。

²仮にあって宇宙線等のイベントは CCD に入ってくる。

³Dark(n) は n 回目の撮像という意味。

$$\text{Dark}(n) = \text{PH}_{\text{raw}}(n)$$

- $\text{darkLower} \leq \text{PH}_{\text{raw}}(n) - \text{Dark}(n-1) \leq \text{darkUpper}$ の場合 \Rightarrow
以下の式で Dark の精度を上げる

$$\text{Dark}(n) = \text{Dark}(n-1) + (\text{PH}_{\text{raw}}(n) - \text{Dark}(n-1))$$

これらを darkinitFrame 分繰り返すことで ダークレベルを決定する。darkinitFrame、darkUpper、darkLower といった値は、地上からのコマンドによって与えられる。XIS のダークレベルはピクセル毎に決定され次に DarkInit、DarkUpdate 処理をするまで保持される。ダークレベルを決定後、DE は、ホットピクセル判定閾値より高いダークレベルを持つピクセルをテレメトリに出力する。(ホットピクセルについては後程触れる。)

2.4.3 光洩れ (ダークレベルの時間変化) 補正

「あすか」 SIS では衛星が日陰から日照、日照から日陰に入る時には、Dark の値が急激に変化するため、ダークレベルの補正が追いつかなくなってしまう現象があった。これは、カメラ内部にどこかのパスを通して可視光が入射したためと考えられている。XIS では、センサーはもちろん排気用パイプ等の設計に関して十分な配慮がなされているが、ダークレベルの時間変化に対応するための補正を導入した。光洩れ補正は次のような手順で行われる。

1つのセグメントを 4×16 分割した領域⁴を光洩れパーティションと定義する。ある光洩れパーティションに対し、 $n-1$ 回目の Exposure で決定した光洩れ量 (ダークレベルの時間変化量) を $\text{Light}(n-1)$ と書くと、イベントセレクションで用いられるピクセルレベル $\text{PH}(n)$ は、

$$\text{PH}(n) = \text{PH}_{\text{raw}}(n) - \text{Dark}(n) - \text{Light}(n-1)$$

となる。 n 回目の Exposure で決定する光洩れ量 $\text{Light}(n)$ は、光洩れパーティション内で

$$\text{LightLow} \leq \text{PH}(n) \leq \text{LightUpper}$$

を満たす Pixel のみについて Pixel レベルの平均 ($\langle \text{PH}(n) \rangle$) を取り、それを $\text{Light}(n-1)$ に加えた量で定義される。つまり、

$$\text{Light}(n) \equiv \text{Light}(n-1) + \langle \text{PH}(n) \rangle$$

である。こうして計算した光洩れ量が、

$$\text{maxLight} \leq \text{Light}(n)$$

を越えた場合、 $\text{Light}(n)$ を光洩れ量として採用し、それ以外の時は、 maxLight を光洩れ量とする。ダークレベルがピクセル毎に定義されていて DarkInit、DarkUpdate 処理をするまで保持されるのに対し、光洩れ量はその時点でダークレベルがどの程度オフセットしたかを表す。ただし、ピクセル毎ではなくパーティションあたりにひとつの値が定義される。

⁴光り洩れパーティションの分割の仕方は、 1×1 から 4×16 の分割数を選択できる。デフォルトは 4×16 である。

2.4.4 イベント抽出

CCD フレーム上で、一定の条件を満たすピクセルの集まりをイベントと定義する。DE は抽出したイベントの情報のみを地上に送る。イベントの抽出には、ダークレベル、光洩れ量の補正を行ったピクセルレベル (PH) が用いられる。

Normal/Burst モードに関しては、 3×3 ピクセルの領域で、中心ピクセルのピクセルレベルがイベント閾値を越え、かつ周囲の 8 つのピクセルレベルがこのピクセルより小さい場合がイベントとして定義される条件である。

一方 P-Sum モードでは、縦横 1×3 ピクセルの領域で中心ピクセルのピクセルレベルがイベント閾値を越え、かつ両脇のピクセルレベルがこのピクセルより小さい場合がイベントとして定義される条件である。

Normal/Burst モード

PH(1)	PH(2)	PH(3)
PH(4)	PH(E)	PH(5)
PH(6)	PH(7)	PH(8)

$$PH(E) > Evth$$

$$PH(E) > PH(1-4)$$

$$PH(E) \geq PH(5-8)$$

P-sum モード

PH(1)	PH(E)	PH(2)
-------	-------	-------

$$PH(E) > Evth$$

$$PH(E) > PH(1-2)$$

図 2.15: DE で定義されているイベント。補正を行った後のピクセルレベルに対しイベントの抽出が行われる。[4]

2.4.5 Edit Mode

DE は、撮像データを指定されたイベントフォーマットに加工して地上に送付する。CCD の駆動方式に対し、可能なイベントフォーマットを表 2.1 に、各 Edit Mode でテレメトリに出力される情報を表 2.2 に示しておく。

2.4.6 地上でのデータ処理

P-Sum Clocking で Edit Mode を Timing にした場合を除いて、機上処理で出力される X 線イベントには直接 X 線のエネルギー情報に対応する 1 個の波高 (PH) 情報は、あえて含まれていない。これを抽出する処理は地上で行う。現状では、「あすか」 SIS のために導入された グレードという概念をベースにした方法で PH を合成する。

Edit Mode	Clocking Mode	
	Normal/Burst	P-sum
5 × 5	◎	×
3 × 3	◎	×
2 × 2	◎	×
Timing	×	○
DarkInit	◎	○
DarkUpdate	◎	×
Frame	◎	○
Dark Frame	—	—

表 2.1: Clocking Mode と可能な Edit Mode の関係。◎ は Window Option × が可能。○ は Window Option は不可。[4]

Edit Mode	テレメトリ情報
5 × 5	1) イベント中心の座標 2) イベント中心とそれを取り巻く 24 Pixel の合わせて 25 Pixel の全 PH
3 × 3	1) イベント中心の座標 2) イベント中心とそれを取り巻く 8 Pixel の合わせて 9 Pixel の全 PH 3) 3 × 3 の周囲 16 Pixel のうち、Split 閾値を越えた PH を持つ位置とその PH、Split 閾値を下まわった Pixel の PH 合計
2 × 2	1) イベント中心の座標 2) コーナーを除いてイベント中心と隣接する 4 Pixel のうち波高値が最も高い Pixel、それと対称の Pixel を除いた 2 Pixel のうち高い方の Pixel、その 2 つの間のコーナーの Pixel の計 4 つの Pixel の PH 3) 上記 4 Pixel が 3 × 3 で 4 つのコーナーのうちどれに偏っているか 4) 上記 4 Pixel のコーナーを除き隣接する 8 Pixel でそれぞれ Split 閾値を超えたか
Timing	1) イベント中心の座標 2) グレード 3) 補正済み PH
DarkInit	1) Hot Pixel の座標とそのダークレベル
DarkUpdate	
Frame	1) 全 Pixel の波高値 (Exposure Time は、8/32/128 sec から選ぶことができる)
Dark Frame	1) PPU の DarkLevelRAM の全 Pixel のダークレベル

表 2.2: 各 Edit Mode のテレメトリ情報 [4]

2.4.7 XIS Grade

X線の入射により生成された電子の固まり(電子雲)は、電極付近に集められる間に拡散等により広がるため、数 μm 程度の広がりを持っている。ピクセルの境界付近にX線が入射すると、電子雲は境界で分けられるため、信号も2つ以上のピクセルにまたがることになる。したがってこのように電荷が2ピクセル以上にまたがった場合洩れだした電荷の分を足しあわせてやる必要がある。しかし、各ピクセルごとのダークレベルにも揺らぎがあるため、すべてのピクセルを足しあわせてしまうとエネルギー分解能を悪くしてしまう。したがって、2ピクセル以上にまたがったイベントの場合、ある閾値を越えたピクセルのピクセルレベルのみを足しあわせる。この閾値がスプリット閾値である。

また近隣のピクセルに別のX線のイベントが入るパイルアップが起こった場合や、X線以外の宇宙線がCCDに入射した場合は、入射X線のエネルギーを見誤ってしまう。この2つを防ぐために用いられるのが、グレード選別である。XIS-DEがグレードづけを行うのは、P-sumモードのみで、Normal/Burstモードに対しては地上のソフトでグレード付けがなされる。Normal/BurstモードおよびP-sumモードでのグレードの分類を、図2.16、図2.17に示す。Normal/Burstモードで用いられるグレードは、「あすか」で用いられていたグレードとほぼ同じものである⁵。これらのグレードのうち解析に用いられるのは、Normal/Burstモードで、グレード0,2,3,4,6、P-sumモードでは、グレード0,1,2が用いられる。較正実験においてもこれらのグレードを使用して解析を行った。

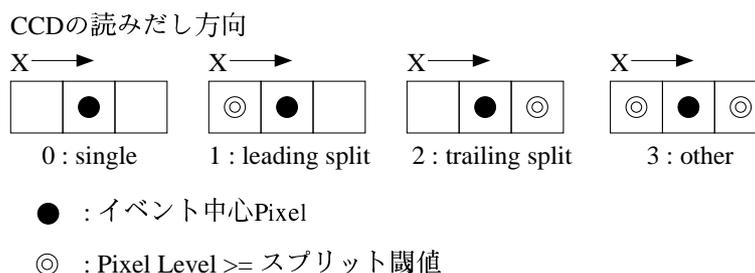


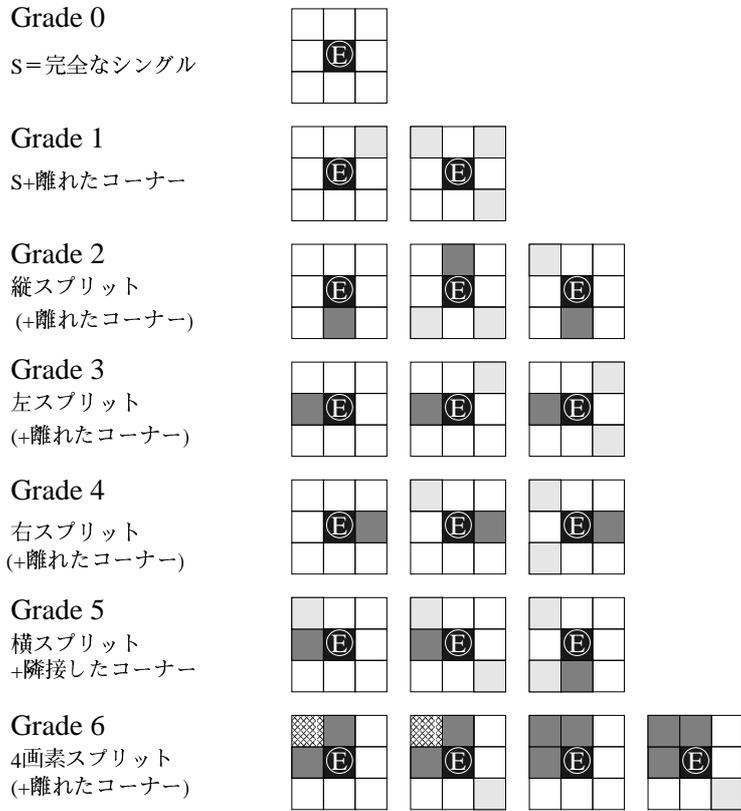
図 2.16: P-sum モードでのグレードの定義 [4]

2.4.8 較正実験のデータ処理

本論文の中心になっている大阪大学での較正試験では、DEの処理を通さずにFrame Modeのデータを全てハードディスクに保存している。ダークレベルの決定、イベントの抽出等はUNIX-WS上のソフトで行う。ただし、このソフトウェアは衛星搭載のDEのソフトウェアと、同じ結果がでることを各種試験によってチェックされている。なお、2004年宇宙研で行った熱真空試験においては、実際のDEを使ってデータ処理をしている。

地上ソフトウェアのうちグレードづけの操作を行う部分は、両者のデータ、さらには軌道上で取得されたデータに対して共通に使われる。

⁵グレード6の定義が若干異なる



- イベント閾値(低) 以上で最大の Pixel levelのピクセル
- スプリット閾値 以上で イベント のパルス高に含めるピクセル
- スプリット閾値 以上で イベント のパルス高に含めないピクセル
- スプリット閾値 以下で イベント のパルス高に含めるピクセル

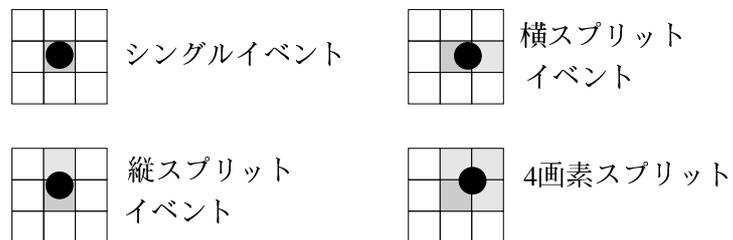


図 2.17: Normal/Burst モード のグレード の定義 [6]

2.5 XISの基本性能

CCDの基本性能は、読みだし回路からの電気的なノイズ (Readout Noise)、X線の入射していない時の暗電流 (Dark Current)、エネルギー分解能等で示される。以下にはXISの各センサーの基本性能を示す。

2.5.1 読みだしノイズ

CCDのエネルギー分解能は、単色のX線を入射させたときのPH分布のひろがり (FWHM) で定義される。その値は、主に光電吸収等の過程により生成される電子の数と読みだし回路系のノイズにより決まっており、以下のような式で表現できる。

$$\begin{aligned}\Delta E(\text{FWHM}) &= w \times \sqrt{8\log 2} \times \sqrt{N^2 + \frac{FE}{w}} \text{ (eV)} & (5.1) \\ E &= \text{入射 X 線のエネルギー} \\ N &= \text{読みだしノイズ} \\ F &= \text{ファノ因子} \\ w &= \text{シリコンの平均解離エネルギー} (\sim 3.65\text{eV})\end{aligned}$$

w は、電子正孔対を作るのに必要なエネルギーで、エネルギー E の X 線の作る電子正孔対は約 E/w 個になる。この過程は完全なポアソン過程ではないのでその揺らぎは、ファノ因子 F を用いて $\sqrt{FE/w}$ で表せる。これと読みだし回路系のノイズ N を合わせたものが CCD の分解能となる。読みだしノイズ N は、通常、Horizontal Over Clock 領域 (CCD のフレーム上のピクセルを読みだした後に水平方向に空読みした領域) の波高分布の root mean square を電子数換算したもので評価される。

2.5.2 暗電流

CCDはX線のあたっていない時でも、格子欠陥などの存在により微弱な電流が生じる。これが暗電流である。通常、Active Pixel と H-Over Pixel のレベルの差から評価される。

CCDの暗電流は、シリコン中の価電子帯と伝導帯との間のバンドギャップ(約1.15eV)を越えた電子により微弱な電流が流れることにより生じる。格子欠陥が存在すると、価電子帯と伝導帯との間にトラップ準位ができ、伝導帯へ電子が励起されやすくなる。空乏層中でのキャリアの発生率 p は、真性半導体中のキャリア濃度 n_i と、少数キャリアがトラップに捕獲されるタイムスケール τ_n より、

$$p = \frac{n_i}{\tau_n}$$

と表せる。 τ_n と n_i は、

$$\tau_n = \frac{1}{\sigma_t v_{th} N_t} \quad (5.2)$$

σ_t トラップの捕獲断面積
 v_{th} 電子の熱速度の平均
 N_t トラップの密度

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right) \quad (5.3)$$

N_c 伝導帯に於ける有効状態密度 k_b ボルツマン定数
 N_v 価電子帯に於ける有効状態密度 E_g バンドギャップのエネルギー
 T 絶対温度

と表せる。したがって暗電流 I_t は、キャリアの電荷 q を用いて、

$$I_t = qp = \frac{1}{2} q \sigma_t v_{th} N_t \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right) \quad (5.4)$$

となる。したがって暗電流は温度依存性を持つことが期待される。XIS の動作温度は $-85 \sim 90^\circ\text{C}$ であり、この温度で 8 秒間露光した場合の暗電流は、約 $0.3 \sim 0.5 e^- \text{ r.m.s}$ と測定されている。

2.5.3 電荷転送非効率 (Charge Transfer Inefficiency:CTI)

CCD ではゲートの電圧を変化させる事で、電荷をバケツリレーのように隣のピクセルに渡していく (図 (2.8))。転送中に何らかの形で電荷をトラップするピクセルがあると、転送回数の多いピクセルからの信号程、低波高側に引かれる事になる。このような電荷損失を電荷転送非効率 (CTI) と呼ぶ。CTI は、

$$CTI \equiv \frac{\text{失われる電荷量}}{\text{全電荷量}} = \frac{1}{\text{転送回数}} \quad (5.5)$$

$$= \frac{PH_A - PH_B}{PH_A} \frac{1}{N} \quad (5.6)$$

PH_A : ある転送回数のピクセル A における信号波高値

PH_B : ピクセル A より N 回転送の多いピクセル B からの信号波高値

で定義される。XIS の場合、Vertical, Horizontal の 2 方向の電荷転送が行なわれるので、CTI は VCTI (Vertical Transfer Inefficiency)、HCTI (Horizontal Transfer Inefficiency) の 2 つの量で定義される。

XIS の CTI について詳しく解析した結果については 4 章で述べる。

2.5.4 ホットピクセル・フリッカリングピクセル

X 線が入射していなくても、常にあるいは頻繁に高いあるいは低い信号波高値を出すピクセルが少なからず存在する。前者をホットピクセル、後者をフリッカリングピクセルと呼ぶ。このようなピクセルは製造行程でなんらかの原因でゲートの絶縁皮膜の抵抗が低い、あるいは格子欠陥が多いピクセルができてしまうことで生じると考えられる。

ホットピクセルは通常場所を特定できるので、データ処理の段階でソフトウェア的にホットピクセル起因のイベントがスペクトルに混入することを避けることができる。一方、フリッカリングピクセルの場合は、信号波高値が激しく上下するため、特定が難しい。

ホットピクセルやフリッカリングピクセルがあると、フレームトランスファー方式をとる CCD では、その列のホットピクセル以降の電荷はそのピクセルを通過するため、信号波高値がホットピクセルの場所以降おかしくなる場合がある。

ASCA SIS では、放射線損傷により格子欠陥が増加し、それともない暗電流とホットピクセルが増加し、問題となった。XIS は、軌道上においては、 -90°C 程度で動作させ、格子欠陥に起因する暗電流を抑え、格子欠陥起源のホットピクセルの増加を防ぐことになる。

2.6 応答関数

検出器で、天体からのスペクトルを得る場合、そのスペクトルは検出器固有の変換を受けることになる。すなわち、天体からのスペクトル $S(E)$ と、検出器を通して得るスペクトル情報 $D(PH)$ の間には、

$$D(PH) = R(E, PH) \otimes S(E) \quad (6.1)$$

の関係がある。

図 2.18 は、 ^{55}Fe のからの X 線を、XIS により測定したスペクトルである。 ^{55}Fe の放射する X 線は、 $\text{MnK}\alpha$, $\text{MnK}\beta$ のみであるので、元のスペクトルは、図 2.19 のようになっていると考えられる。 $S(E)$ が十分単色な X 線であれば、検出器を通して得るスペクトル $D(PH)$ が、あるエネルギーの X 線に対する応答を示すことになる。様々なエネルギーに対する応答関数 $R(E, PH)$ は、そのようなスペクトル (=ベクトル) を並べた行列で表現できることになる。

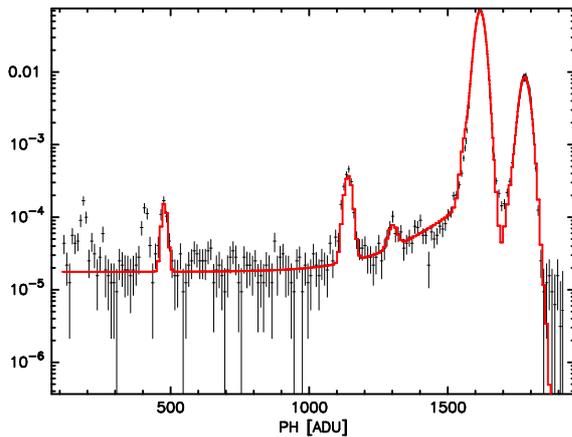


図 2.18: ^{55}Fe からの X 線を XIS で取得したデータ。 $(D(PH))$ 実線はデータを最も良く表す関数形。[4]

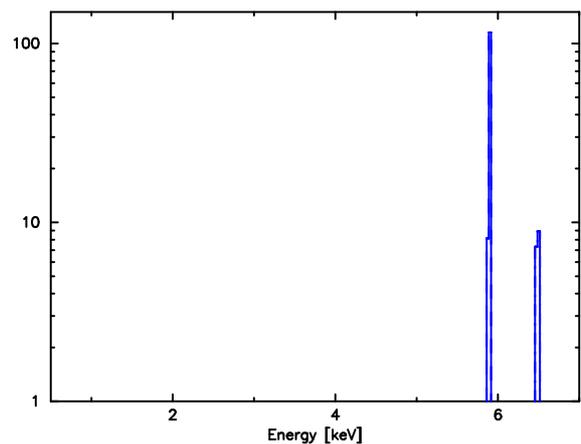


図 2.19: $^{55}\text{Fe}(\text{MnK}\alpha, \text{K}\beta)$ からの X 線。 $(S(E))$ [4]

このような応答関数を構築する場合、必要な要素は大きく 3 つに分けることができる。

- エネルギー (E) とパルスハイト (PH) の関係 (エネルギースケール)
- 応答のプロファイル (応答関数の形)

- 検出効率 (量子効率)

較正実験では、これらの要素に関するデータを取得し、シミュレーション、物理的なモデルの助けをかりて、任意のエネルギーで XIS の応答を再現する応答関数を作成する事が最終的な目標である。

第3章 ゲイン較正

現在、XISは地上較正試験結果を用いデータ処理を行なっている。しかし、地上の結果がそのまま使用できるわけではなく、軌道上での較正が必要になってくる。本章ではデータ処理の内、ゲインに関係する事柄について調査する。

前半では、初搭載の裏面照射型 CCD のために開発された電荷洩れ補正について検査する。これは電荷転送方向と逆方向のピクセルに電荷が洩れ出している現象に対して、洩れ出した電荷を元のピクセルに戻す補正である。この補正のパラメータは地上較正試験のデータから求められており、軌道上のデータに対して有効なものであるかを確認する。後半では、電荷転送時に電荷が失われてしまう電荷転送非効率 (CTI) について調べる。現在、CTI 補正は行なわれていないが、荷電粒子による放射線損傷により避けられない現象である。軌道上での較正用に取り付けられている壁キャリブレーションソース ^{55}Fe に注目し、失われた電荷量を推定することで、この補正を計る。

電荷洩れ補正に関しては [1] の内容を多く引用させていただいた。

3.1 電荷洩れ

3.1.1 グレード分岐比

Astro-E1 では X 線イベント検出方法に、イベントをグレード 0,1,2,3,4,5,6,7 の 8 個に分類する XIS8 方式を用い、解析にはグレード 0,2,3,4,6 のイベントを使用した。本論文では、グレード 0 からグレード 6 までの定義はこれまでと同様だが、グレード 7 をさらに 5 パターンに分類し、グレード 7,8,9,10,11 とした XIS12 方式を採用する。SUZAKU 衛星には BI-CCD が搭載されているので、イベント情報を詳細に調べるためである。

まず ^{55}Fe (半減期 2.7 年) からの特性 X 線に対するグレード分岐比を FI-CCD, BI-CCD について調べた (図 3.1, 図 3.2)。

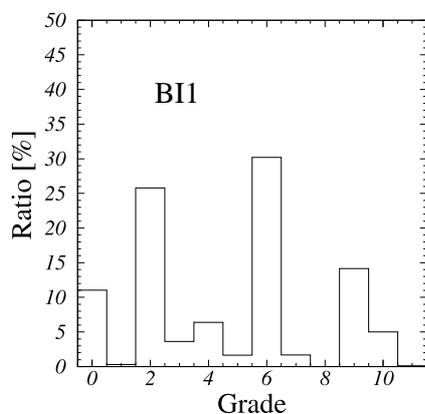


図 3.1: BI のグレード分岐比 (^{55}Fe)

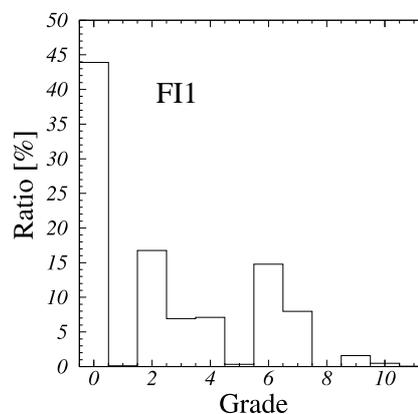


図 3.2: FI のグレード分岐比 (^{55}Fe)

パラメーターと全イベントに対するグレード0,2,3,4,6のイベントの比率は表3.1の通りである。

	BI	FI
イベント閾値	20	50
スプリット閾値	7	20
全イベントに対するグレード0,2,3,4,6の比率 [1/全イベント]	77.06%	89.43%

表 3.1: BI,FIのパラメーター。BIは低エネルギーに感度があるため、イベント閾値、スプリット閾値を低く設定している。

BIは、FIと比べて次のような特徴がある。

1. BIはFIより、グレード0のような広がらないイベントが少ない。逆にグレード6,9,10のような広がったイベントは、BIが多い。
2. BIでは、グレード3と4の比率に偏りがある。

実は、この2つの問題は独立ではない。このことをこれから調べる。まず、2.の問題を考える。確率的に考えれば、グレード3,4の割合はほぼ等しくなるべきなのに、実際には差がある(表3.2。)

	BI	FI
グレード4/(グレード3+4)	63.64%	50.62%

表 3.2: グレード3+4に対するグレード4の割合。

FIでは、ほぼグレード3,4の割合が等しいが、BIよりスプリット閾値を高く設定していることが原因かもしれない。このことを確かめるために、FIをBIと同じくスプリット閾値を7で解析し、グレード分岐比を調べた(表3.3)。

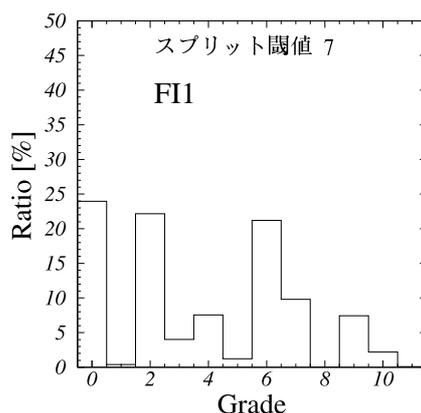


図 3.3: FIのグレード分岐比(^{55}Fe)。スプリット閾値は7である。

図3.3は、図3.2とは大分異なり、図3.1に近い傾向にあることが分かる。グレード3,4の偏りも生じている。

これまでのことより、グレード3,4のイベントの偏りはFI-CCD,BI-CCDのようなセンサーの違いが原因ではないことが分かる。

3.1.2 電荷洩れ

3.1.1 節で FI-CCD、BI-CCD によらず、グレード 3,4 でイベントの偏りがあることが分かった。この節では、この問題を考察していく。

我々は、グレード 3 とグレード 4 の非対称性の原因を、電荷転送時に電荷転送と逆方向の読み出し口から遠いピクセルに、中心ピクセルから電荷が洩れ出すためだと考えた。

FI の解析では、スプリット閾値を 20 と高く設定しているため電荷が洩れ出し量も、洩れ出し量がそれほど多くなく、グレード 3,4 の割合に影響を与えなかったと考えられる。

この考えでは、グレード 3 とグレード 4 の非対称性、つまり左右の非対称性だけでなく、上下にも非対称性があるはずである。さらに、非対称性は電荷転送回数が多いほど、大きくなると予想される。そこで、イベント中心の縦横 4 ピクセルに注目した。イベント中心 3×3 領域の各ピクセルとそのピクセルレベルを次の図のようにあらわす。

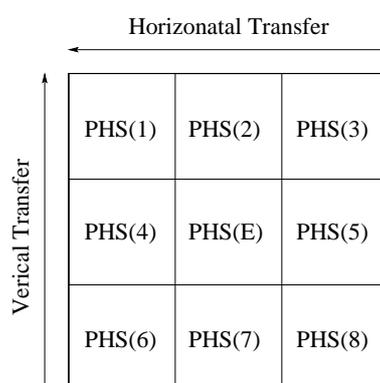


図 3.4: イベント中心 (PHAS(E))3x3 領域のピクセルレベル。

図 3.4 の名前を使うと、左右の非対称性とは PHAS(4) と PHAS(5) のこと、上下の非対称性とは PHAS(2) と PHAS(7) のことを指す。

電荷転送には、縦転送 (Vertical Transfer) と横転送 (Horizonatal Transfer) の 2 つがある。縦転送回数に比例して PHAS(2) と PHAS(7) の非対称性が大きくなり、横転送回数に比例して、PHAS(4) と PHAS(5) の非対称性が大きくなるはずである。そこで、それぞれの転送回数に差がでるようにして、非対称性があるかを調べた。具体的に、次のような解析を行った。

- 縦転送回数に比例する電荷の洩れ出し量を調べるために、CCD を図 3.5 のように横に 4 分割し、各領域ごとに PHAS(2),PHAS(7) のヒストグラムを作成する。作成したヒストグラムから PHAS(7) のピークのシフト量を調べる。
- 横転送回数に比例する電荷の洩れ出し量を調べるために、ここでは CCD のセグメント A を図 3.6 のように縦に 4 分割し、各領域ごとに PHAS(4),PHAS(5) のヒストグラムを作成する。作成したヒストグラムから PHAS(7) のピークのシフト量を調べる。

この方法は単一エネルギーの X 線が CCD 全面に等しく照射されていることが前提となるが、我々の実験室で CCD 全面に照射した単一エネルギーの X 線のデータは、⁵⁵Fe から照射される Mn-K α (5.89keV) のみである。エネルギーによる電荷洩れ出し量の違いも考慮したいため、京都大学から、Al K(1.49keV),Cl K(2.62keV),Mn K(5.89keV),Zn K(8.64keV) のイベントファイルを頂いた (表 3.3 参照)。PHS(2),PHS(7),PHS(4),PHS(5) のヒストグラムは以下ようになった。

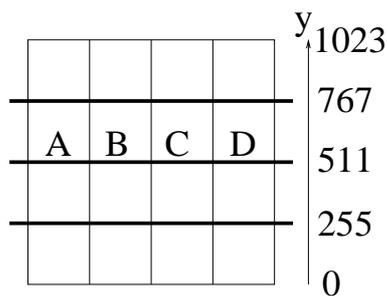


図 3.5: 縦転送回数に差をつける CCD の分割。)

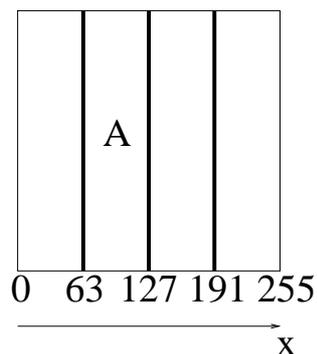


図 3.6: 横転送回数に差をつける CCD の分割。

		イベントファイル
BI0	Al	20040617_0859-0945_xis0_5x5.fff
	Cl	20040617_0608-0655_xis0_5x5.fff
	Mn	20040616_0242-0329_xis0_5x5.fff
	Zn	20040616_0548-0635_xis0_5x5.fff
BI1 (XIS1)	Al	20040609_1108-1128_xis0_5x5.fff
	Cl	20040609_1002-1022_xis0_5x5.fff
	Mn	20040609_0152-0239_xis0_5x5.fff
	Zn	20040608_0620-0707_xis0_5x5.fff
FI0 (XIS0)	Al	
	Cl	
	Mn	20031228_0752-0832_xis0_5x5.fff
	Zn	
FI1	Al	20040115_0612-0653_xis0_5x5.fff
	Cl	20040115_0839-0919_xis0_5x5.fff
	Mn	20040114_0526-0606_xis0_5x5.fff
	Zn	20040116_0440-0520_xis0_5x5.fff
FI2 (XIS2)	Al	20040226_1105-1119_xis0_5x5.fff
	Cl	20040226_1032-1046_xis0_5x5.fff
	Mn	20040221_0712-0752_xis0_5x5.fff
	Zn	20040222_0523-0603_xis0_5x5.fff
FI3 (XIS3)	Al	20040309_1103-1117_xis0_5x5.fff
	Cl	20040309_1005-1018_xis0_5x5.fff
	Mn	20040309_0407-0447_xis0_5x5.fff
	Zn	20040310_0427-0506_xis0_5x5.fff

表 3.3: 京都大学から頂いた各センサーのイベントファイル。

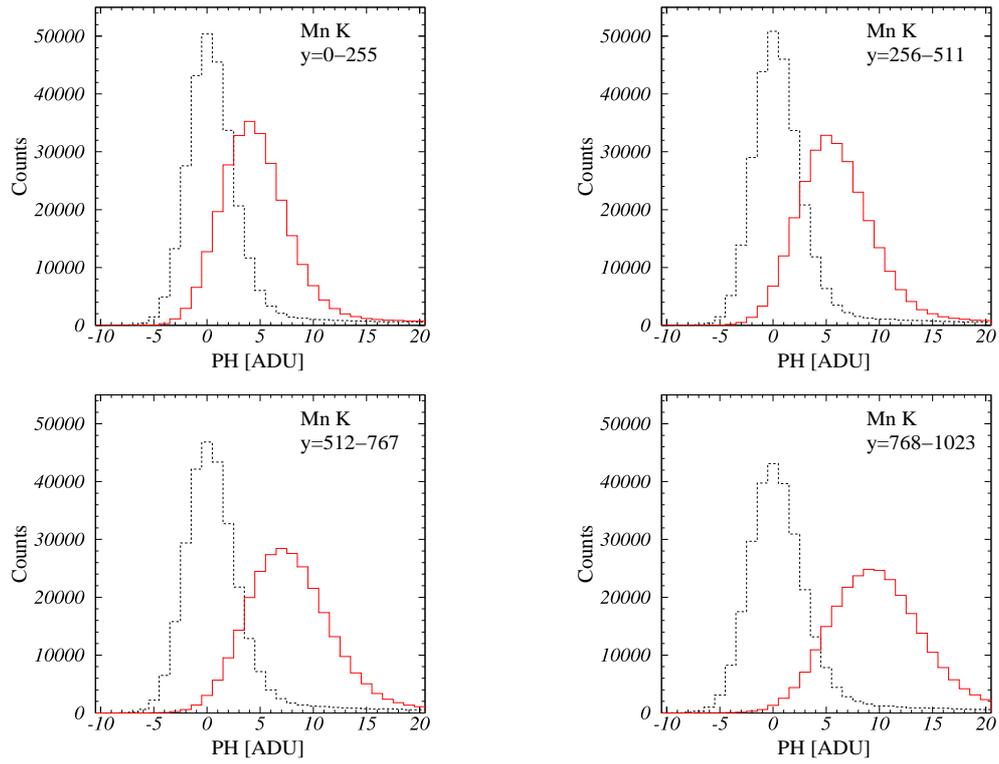


図 3.7: Mn K の PHAS(2)(点線),PHAS(7)(実線) のヒストグラム

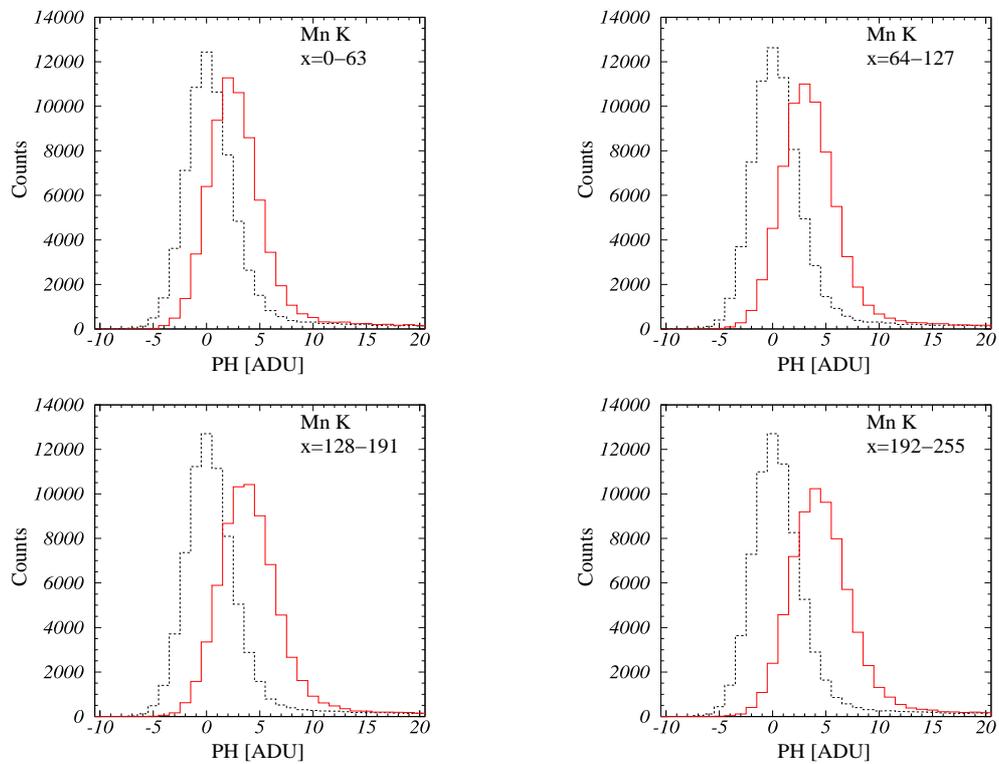


図 3.8: Mn の PHAS(4)(点線),PHAS(5)(実線) のヒストグラム。

図 3.7、図 3.8 より、PHAS(2)、PHAS(4) のヒストグラムは CCD の領域の違い、つまり電荷転送回数の違いによる影響をほとんど受けていない。一方、PHAS(5)、PHAS(7) のヒストグラムは、電荷転送回数の増加に伴い、顕著にピークとなるパルスハイト [ADU] の値が高い値にシフトしている。シフトする大きさもエネルギーに依存しており、エネルギーが高いほど、シフトも大きくなる。

よって、PHAS(5)、PHAS(7) のヒストグラムのピークがシフトする原因は、中心ピクセルから洩れ出す電荷転送非効率 (CTI) であることが明らかになった。

このままでは、同じエネルギーの X 線であっても、検出されたピクセルの位置により、スペクトルのピークの位置が系統的にずれることになる。そのため洩れ出す電荷量を見積もり、中心ピクセルに戻す補正を行なう必要がある。

3.2 電荷洩れ補正の方法

3.2.1 転送回数と電荷洩れ量

4.1 節で電荷転送中に中心ピクセルから電荷が洩れ出し、CTI が原因であることを見た。この節では、Al K, Cl K, Mn K, Zn K について、1 転送あたりに洩れ込む電荷量を求める。

4.1.2 節の図 3.7、図 3.8 の PHAS(5)、PHAS(7) のヒストグラムをフィッティングし、ピークチャンネルの移動量と転送回数の関係を 1 次関数でモデル化する。電荷洩れ込み量は、ポアソン分布に従うとする。電荷読み出し回路系に起因する電氣的ノイズ (読み出しノイズ) は、ガウス分布に従うとする。PHAS(5)、PHAS(7) のヒストグラムはこの 2 つの分布の畳み込みの和でモデル化できるとした。BI について、PHAS(5)、PHAS(7) のフィッティング結果 (図 3.9、図 3.10) とピークチャンネルとなるポアソン分布の平均 (Poisson mean) のベストフィット (表 3.4) についてまとめる。

表 3.4 の Poisson mean の値は、PHAS(5) は RAWX の 1 次関数、PHAS(7) は RAWY の 1 次関数でモデル化できるはずである (式 (2.1))。

$$\text{Poissonmean}[\text{ch}] = \text{slope} \times (\text{RAWX または RAWY}[\text{pixel}]) + \text{offset}[\text{ch}] \quad (2.1)$$

しかし、Poisson mean の誤差が小さいため、1 次関数でフィッティングした結果の reduced χ^2 の値が 1 より大きくなる。表 3.4 の Poisson mean の値の誤差もフィッティングが完全に正しいわけではなく、もっと大きいだろう。そこで、1 次関数でフィットしたとき reduced χ^2 の値が 1 になるように、Poisson mean の誤差を定数倍するを行なった。slope の値は、1 転送に中心ピクセルが失う電荷量をあらわす。フィッティング結果 (図 3.11, 3.12) と slope、offset の値のベストフィット (表 3.5) を以下に示す。

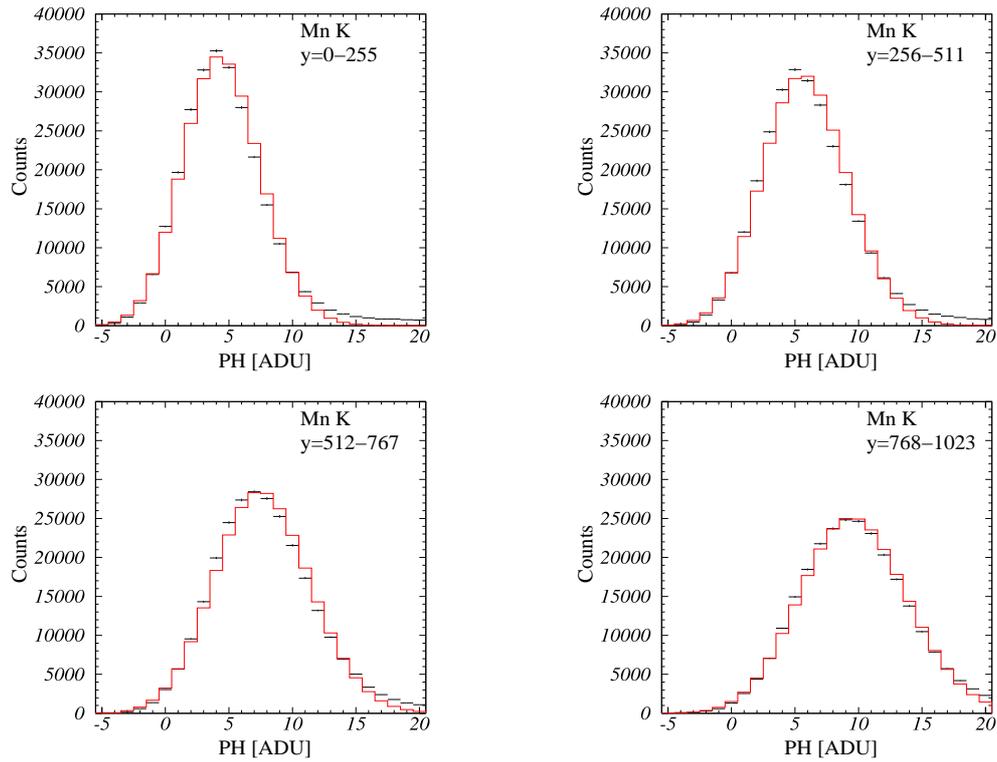


図 3.9: Mn K の PHS(7) のフィッティング結果。実線はモデル。

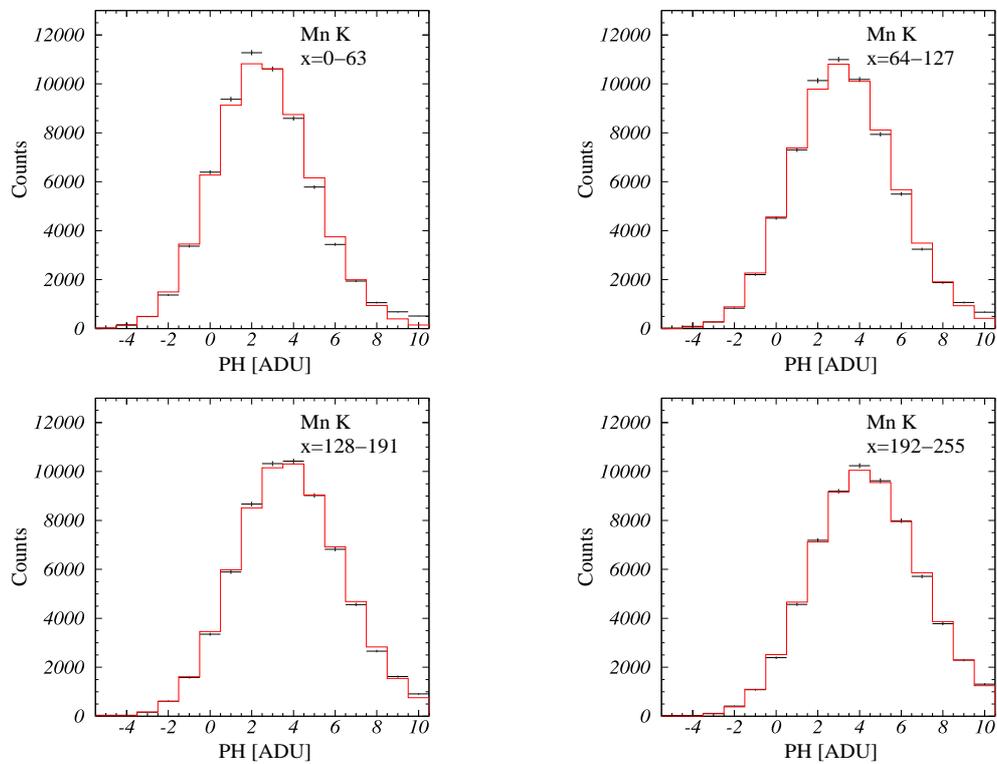


図 3.10: Mn K の PHS(5) のフィッティング結果。実線はモデル。

	Poisson mean [ch]	
	PHAS(7)	PHAS(5)
Al	2.295±0.008	1.03±0.01
	2.992±0.008	1.56±0.01
	3.797±0.009	1.79±0.01
	4.867±0.009	2.08±0.01
Cl	2.894±0.009	1.71±0.01
	3.775±0.009	2.28±0.01
	4.955±0.009	2.55±0.01
	6.24±0.01	2.94±0.02
Mn	4.494±0.006	2.62±0.01
	5.868±0.007	3.36±0.01
	7.727±0.008	3.89±0.01
	9.734±0.009	4.44±0.01
Zn	4.98±0.02	3.74±0.03
	6.63±0.02	4.54±0.03
	8.81±0.02	5.15±0.03
	11.31±0.02	5.68±0.03

表 3.4: BI について、PHAS(7) と PHAS(5) のヒストグラムをフィッティングして求めた Poisson mean。それぞれ、転送回数が少ない順に並んでいる。転送回数の増加に伴い Poisson mean の値が大きくなる。

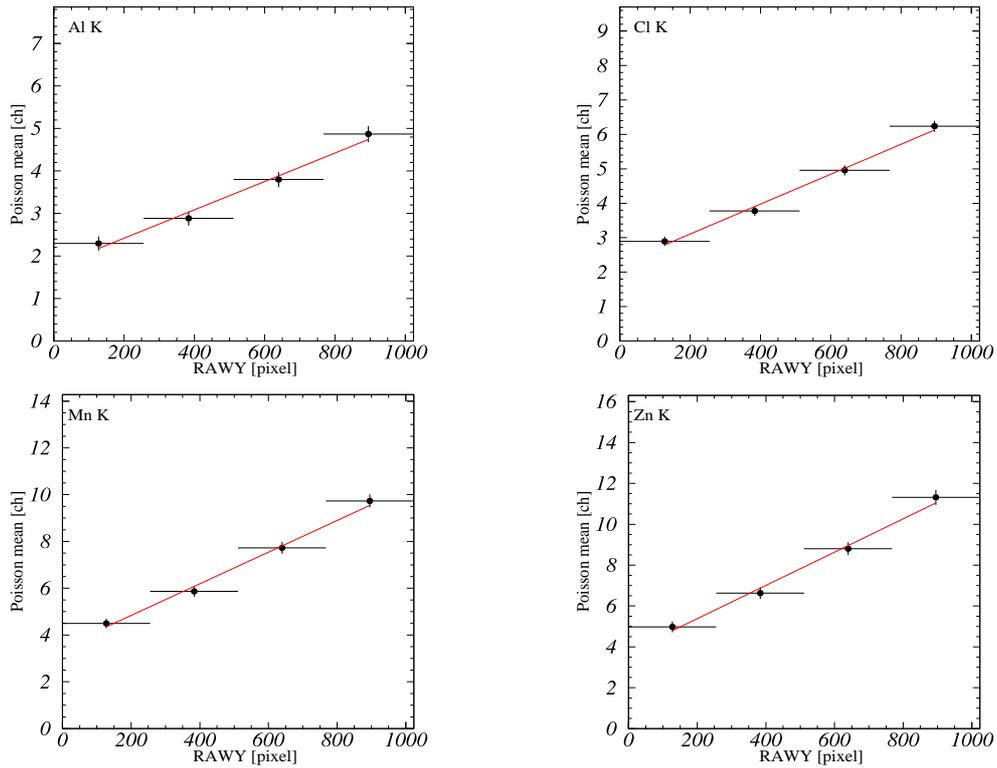


図 3.11: PHAS(7) の転送回数と電荷洩れ出し量の線形性。実線はモデル。

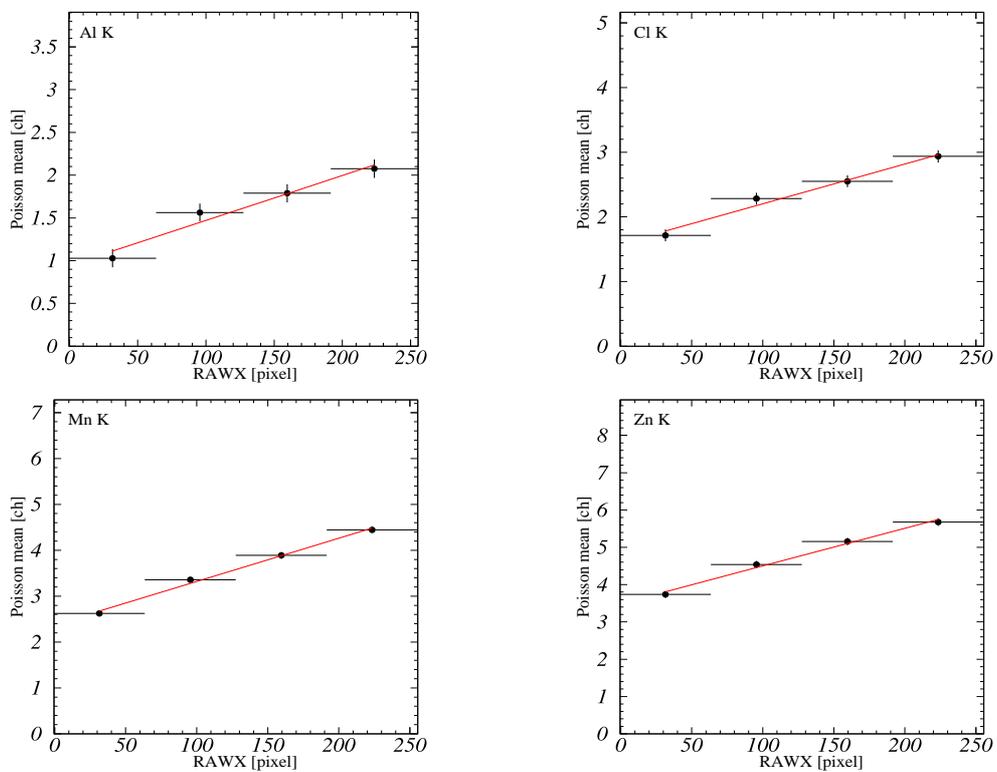


図 3.12: PHAS(5) の転送回数と電荷洩れ出し量の線形性。実線はモデル。

	PHAS(7)		PHAS(5)	
	slope[10 ⁻³ · pixel]	offset[ch]	slope[10 ⁻³ · pixel]	offset[ch]
Al (1.49k eV)	3.3 ±0.3	1.8±0.2	5.2±0.7	0.9±0.1
Cl (2.62k eV)	4.3 ±0.3	2.2±0.1	6.2±0.7	1.59±0.09
Mn (5.89k eV)	6.8±0.4	3.5±0.2	9.4 ±0.5	2.38±0.07
Zn (8.64k eV)	8.1±0.5	3.8 ±0.3	10.1±0.7	3.5±0.1

表 3.5: 1 次関数でフィットした結果。

表 3.5 の slope の値から、X 線のエネルギーが高いほど slope の値、つまり 1 転送あたりに中心ピクセルから洩れ出す電荷量が大きくなることがわかる。

3.2.2 中心パルスハイトと電荷洩れ量

Al K, Cl K, Mn K, Zn K について、それぞれ 1 転送あたりに洩れ込むパルスハイトが求められた。この値を中心パルスハイト (PHAS(E)) で割った値が、X 線のエネルギーごとの電荷転送非効率率 (CTI) である。

これから、Al K, Cl K, Mn K, Zn K の CTI を求め、PHAS(E) と CTI の関係をモデル化する。それぞれグレード 0, 2, 3, 4, 6 のスペクトルをガウシアンでフィッティングし、ピークとなるパルスハイトを求めた。この値を PHAS(E) の値だと考える。

	中心パルスハイト [ch]
Al K (1.49k eV)	376.14±0.02
Cl K (2.62k eV)	666.759±0.001
Mn K (5.89k eV)	1503.1838±0.0002
Zn K (8.64k eV)	2201.75±0.09

表 3.6: 各エネルギーのグレード 02346 のスペクトルの PHAS(E) [ch] の値。

表 3.5 の slope の値を表 3.6 の PHAS(E) の値で割れば、CTI となる。CTI の値をまとめる (表 3.7)。(縦転送 CTI と横転送 CTI を区別するために、VCTI (Vertical Transfer Inefficiency)、HCTI (Horizontal Transfer Inefficiency) と記述する。)

	PHAS(E) [ch]	VCTI[10 ⁻⁶ /Transfer]	HCTI[10 ⁻⁶ /Transfer]
Al K (1.49k eV)	376.14±0.02	8.9±0.8	14±2
Cl K (2.62k eV)	666.759±0.001	6.5±0.4	9.2±1.0
Mn K (5.89k eV)	1503.1838±0.0002	4.5±0.3	6.3±0.3
Zn K (8.64k eV)	2201.75±0.09	3.7±0.2	4.6±0.3

表 3.7: 各エネルギーの VCTI と HCTI の値

表 3.7 の値から、PHAS(E) と CTI の関係はべき関数

$$\text{CTI}[1/\text{Transfer}] = \text{norm} \times (\text{PHAS}(E))^{\gamma} \quad (2.2)$$

うまくフィットできることが分かった (図 3.13,3.14)。

Sensor	CTI[1/Transfer]	norm $\times 10^{-4}$	γ
BI1	VCTI	1.5 \pm 0.6	-0.48 \pm 0.06
	HCTI	5 \pm 2	-0.59 \pm 0.07

表 3.8: ベキ関数でフィットしたときのベストパラメーター。

VCTI, HCTI はともに PHAS(E) のベキ関数でモデル化できることを示した。ベキの値は誤差の範囲で、-0.5 程度である。CTI がモデル化できたので、X 線が CCD に入射した位置情報 (RAWX,RAWY) と PHAS(E) の値から、PHAS(7) と PHAS(5) に洩れ出したパルス高さを差し引き、中心ピクセルに戻すことで、電荷転送による電荷洩れの補正ができる。詳しくは、4.2.3 節で述べる。

3.2.3 電荷洩れの補正

この節では、洩れ出したパルス高さを中心ピクセルに戻す方法を示す。PHAS(7) を補正するには、イメージング領域だけでなく、フレームストア領域 (垂直方向の物理的ピクセル数は 1024pixel) についても考慮する必要がある。PHAS(5) については、横転送終了後から読み出し口に到達するまでに転送するピクセル数 (物理的ピクセル数は 4pixel) を考慮しなければならない。これらの領域は物理的構造が異なるため、物理的ピクセル数と実効的なピクセル数が一致する必要はない。そこで、CTI の値はこれらの領域でも同じ値と仮定し、実効的なピクセル数 (PHAS(E) に依存しない) を求めることにする。中心ピクセルから電荷が洩れ出さなければ、PHAS(7) は PHAS(2) のヒストグラムと一致し、PHAS(5) は PHAS(4) のヒストグラムと一致すると考えられる。よって、PHAS(7) の Poisson mean の値を PHAS(2) に、PHAS(5) の Poisson mean の値を PHAS(4) に一致させる実効的なピクセル数を求める。実効的なピクセル数は、Mn K のデータから決めることにした。図 3.7 の PHAS(2) のヒストグラム、図 3.8 の PHAS(4) のヒストグラムフィッティングし、それぞれ Poisson mean の値を出し、平均を求めた。結果を以下に示す。

	Poisson mean [ch]	
	PHAS(2)	PHAS(4)
Mn	0.425 \pm 0.005	0.313 \pm 0.009
	0.480 \pm 0.005	0.332 \pm 0.009
	0.411 \pm 0.005	0.336 \pm 0.009
	0.363 \pm 0.005	0.378 \pm 0.009
平均	0.402 \pm 0.002	0.340 \pm 0.005

表 3.9: BI1 について、PHAS(2) と PHAS(4) のヒストグラムをフィッティングして求めた Poisson mean とその平均。Poisson mean の値はほぼ一定である。転送回数が少ない順に並べている。

PHAS(2) の Poisson mean の平均値を図 3.7 の縦軸に取り、PHAS(4) の Poisson mean の平均値を図 3.8 の縦軸に取り、モデルの直線と交わる幅を求める (図 3.15, 図 3.16)。このようにしてもとめた実効的なピクセル数の結果を、表 3.10 にまとめる。

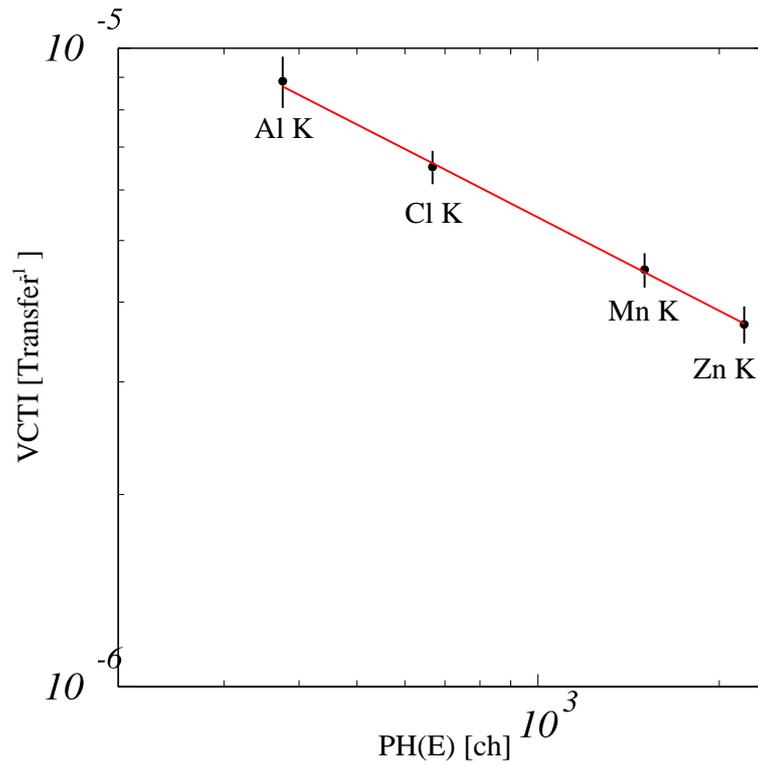


図 3.13: BI1 の VCTI をべき関数でフィットした結果。よくフィットできている。

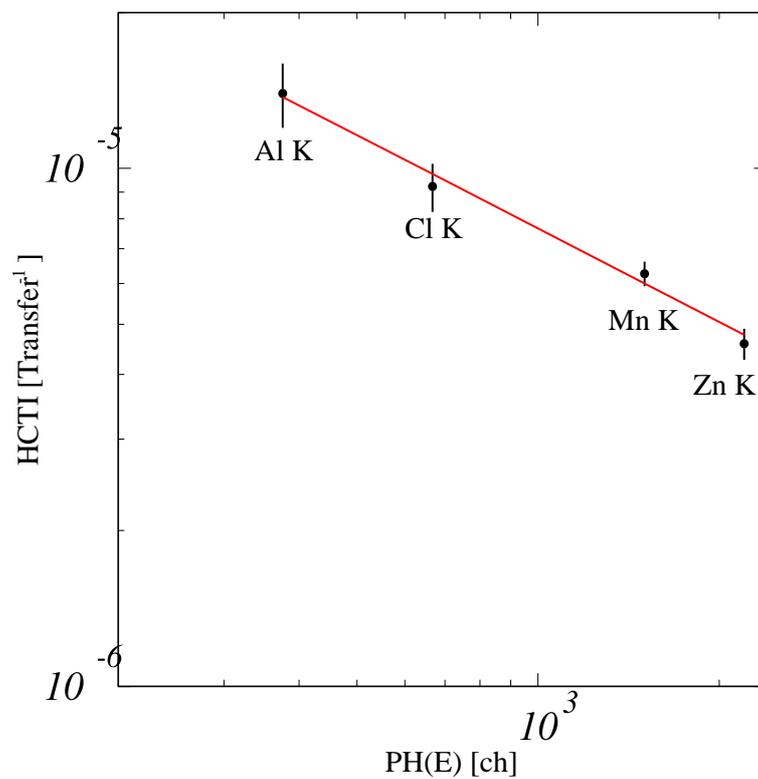


図 3.14: BI1 の HCTI をべき関数でフィットした結果。よくフィットできている。

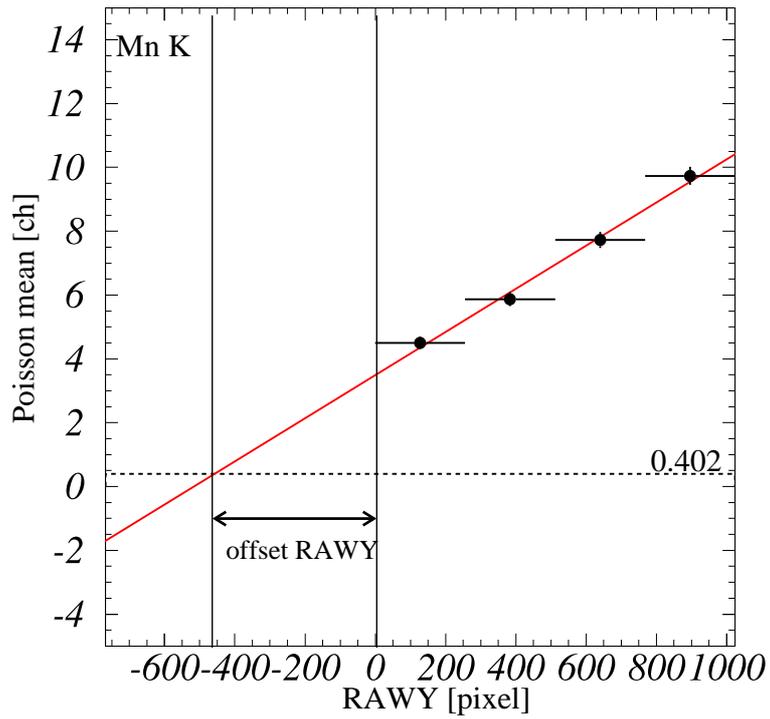


図 3.15: BI1、Mn K についての実効的なピクセル数を求める方法。offset RAWY の幅が実効的なピクセル数となる。

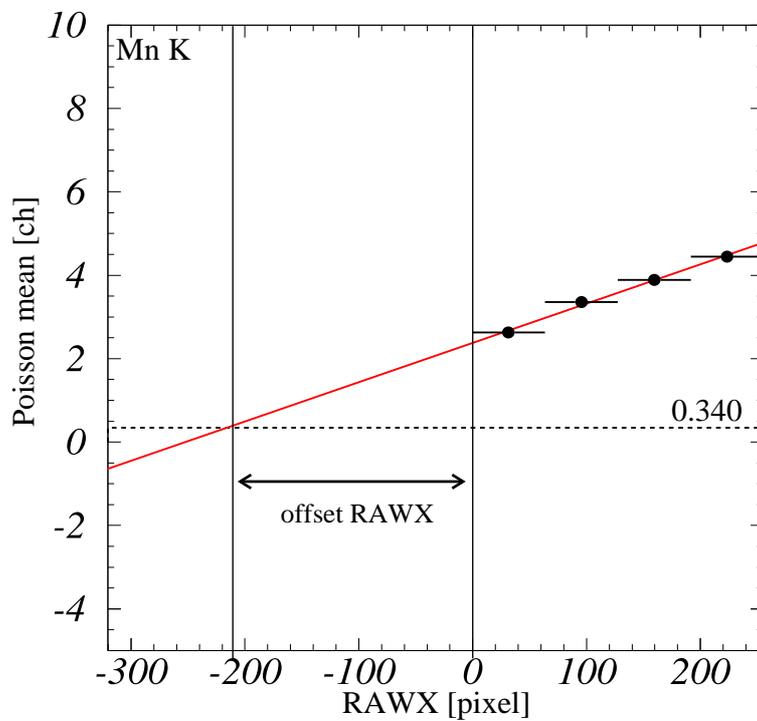


図 3.16: BI1、Mn K についての実効的なピクセル数を求める方法。offset RAWX の幅が実効的なピクセル数となる。

Sensor	offset RAWY [ch]	offset RAWX [ch]
BI1	457±43	217±14

表 3.10: BI1 について、縦転送、横転送での実効的なピクセル数。

表 3.10 の値が、BI1 のセンサーに対して、すべてのエネルギーの X 線イベントに対して共通に使う実効的な転送回数となる。

補正方法を述べる前に、ここまででもとめた補正に使用するパラメーターをまとめる。

	norm ×10 ⁻⁴	γ	offset
PHAS(7)	1.5±0.6	-0.48±0.06	457±43
PHAS(5)	5±2	-0.59±0.07	217±14

表 3.11: BI1 についての補正パラメーターのまとめ。

表 3.11 の値を用いて、次のように補正する。今、X 線イベントの中心ピクセルの値を PHAS(E) とし、イベントの座標が (RAWX,RAWY) であるとする。このとき PHAS(7)、PHAS(5) に洩れ込むパルスハイトの値は、

$$\text{PHAS(7) に洩れ込むパルスハイト} = \text{norm} \times (\text{PHAS(E)})^\gamma (\text{RAWY} + \text{offsetRAWY}) \quad (2.3)$$

$$\text{PHAS(5) に洩れ込むパルスハイト} = \text{norm} \times (\text{PHAS(E)})^\gamma (\text{RAWX} + \text{offsetRAWX}) \quad (2.4)$$

と計算できる。この計算した値を PHAS(7) あるいは PHAS(5) から差し引いて、PHAS(E) に足し込むことで補正ができる。実際に補正がうまくできているかを確かめるため、補正したデータに対して、図 3.7、図 3.8 と同じように PHAS(2),PHAS(7) のヒストグラムと PHAS(4),PHAS(5) のヒストグラムを書いて、ピークのシフトが補正されているかを調べる。

図 3.17、図 3.18 で、PHAS(7) の Poisson mean の値は PHAS(2) の Poisson mean の値とほぼ一致している。また PHAS(5) の Poisson mean の値は PHAS(4) の Poisson mean の値とほぼ一致している。この結果より、補正は正しくできていることが確認できた。

他のセンサーについても BI1 と同じように解析を行なっているので、結果を表 3.10 と同じようにまとめる。

表 3.13 を見るとほとんどのセンサーで、γ の値はほぼ-0.5 となった。補正するためのパラメーターは、できるだけ少ないほうがいいので、γ の値を-0.5 に固定することにした。固定してフィッティングをやり直した結果をまとめる。

表 3.13 の値が γ を-0.5 に固定して求めた補正パラメーターである。これらの値と式 (2.4) より、各センサーについて中心ピクセルから洩れ出したパルスハイトを計算し、電荷洩れの補正をすることができる。

ところで、ここまで求めてきた CTI の値や補正パラメーターは、XIS の機上動作温度である-90°C で取得したデータから求めた。CTI の温度依存性についても調べる必要があるので、BI の Mn K で、-87.5°C、-80°C のデータについての CTI も調べた。結果は次のようになった。

温度が上がると VCTI、HCTI の値が小さくなる結果となった。-90°C と比べて、-80° では、VCTI、HCTI の値はともに約 5 分の 1 に減少している。片対数グラフで 3 点が直線に並んでいるように見えるため、CTI は温度の指数関数で表せるのかも知れないが、これだけではなんともいえないだろう。CTI と温度の関係を調べることは今後の課題となろう。

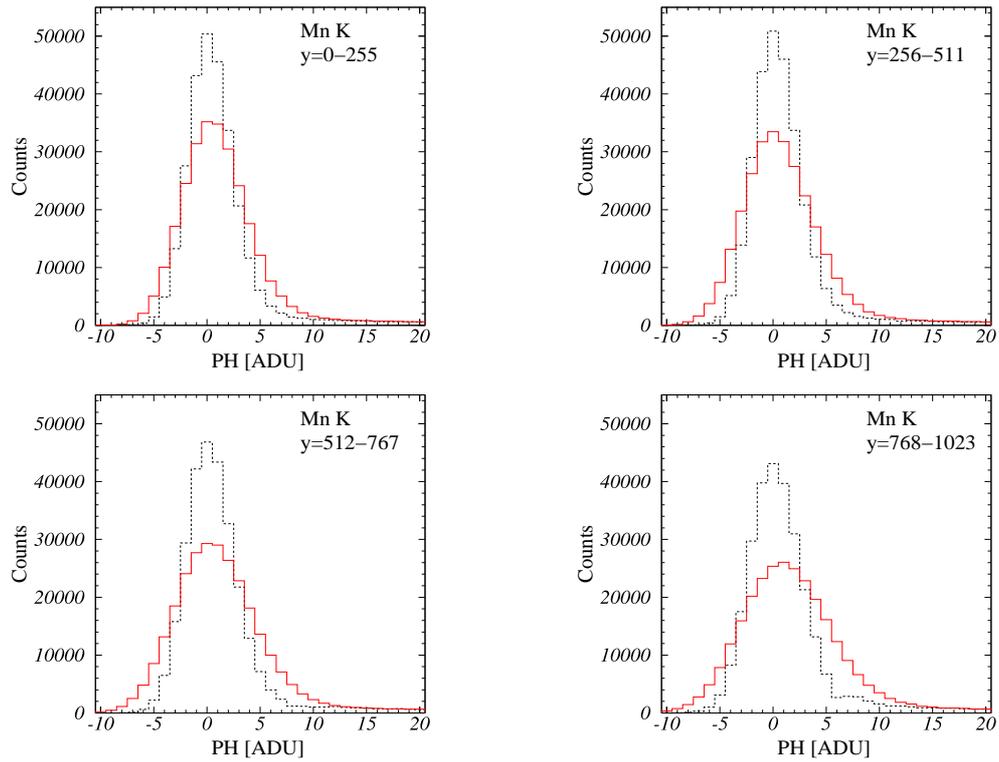


図 3.17: 電荷転送補正後の Mn K の PHAS(2)(点線),PHAS(7)(実線) のヒストグラム

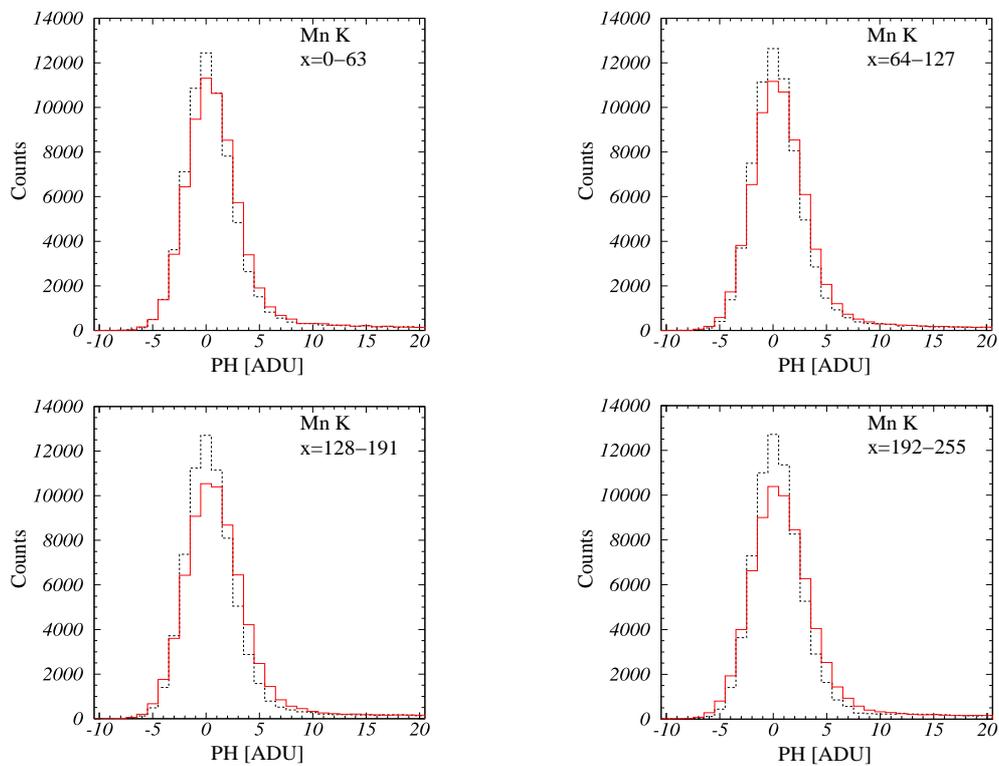


図 3.18: 電荷転送補正後の Mn の PHAS(4)(点線),PHAS(5)(実線) のヒストグラム。

Sensor	pixel	norm $\times 10^{-4}$	γ	offset
FI1	PHAS(7)	0.90 \pm 0.04	-0.521 \pm 0.006	962 \pm 5
	PHAS(5)	1.8 \pm 0.3	-0.50 \pm 0.03	285 \pm 12
FI2 (XIS2)	PHAS(7)	0.48 \pm 0.07	-0.49 \pm 0.02	1007 \pm 36
	PHAS(5)	0.5 \pm 0.2	-0.44 \pm 0.07	782 \pm 64
FI3 (XIS3)	PHAS(7)	0.52 \pm 0.03	-0.50 \pm 0.01	823 \pm 15
	PHAS(5)	2 \pm 4	-0.8 \pm 0.4	3225 \pm 1417
BI0	PHAS(7)	0.50 \pm 0.07	-0.46 \pm 0.02	1378 \pm 16
	PHAS(5)	0.2 \pm 0.2	-0.2 \pm 0.2	272 \pm 45
BI1 (XIS1)	PHAS(7)	1.5 \pm 0.6	-0.48 \pm 0.06	457 \pm 43
	PHAS(5)	5 \pm 2	-0.59 \pm 0.07	217 \pm 14

表 3.12: 全センサーについて求めた補正パラメーターの値。FI0 は、Mn K しかデータがないので、求めている。 γ の値は、ほとんどが-0.5 程度である。

Sensor	pixel	norm $\times 10^{-4}$	γ (固定)	offset
FI0 (XIS0)	PHAS(7)	0.375 \pm 0.007	-0.5	962 \pm 5
	PHAS(5)	0.44 \pm 0.15	-0.5	285 \pm 12
FI1	PHAS(7)	0.773 \pm 0.002	-0.5	962 \pm 5
	PHAS(5)	1.86 \pm 0.03	-0.5	285 \pm 12
FI2 (XIS2)	PHAS(7)	0.517 \pm 0.008	-0.5	1007 \pm 36
	PHAS(5)	0.68 \pm 0.03	-0.5	782 \pm 64
FI3 (XIS3)	PHAS(7)	0.534 \pm 0.003	-0.5	823 \pm 15
	PHAS(5)	0.20 \pm 0.05	-0.5	3225 \pm 1417
BI0	PHAS(7)	0.661 \pm 0.006	-0.5	1378 \pm 16
	PHAS(5)	1.9 \pm 0.2	-0.5	272 \pm 45
BI1 (XIS1)	PHAS(7)	1.72 \pm 0.06	-0.5	457 \pm 43
	PHAS(5)	6.06 \pm 4.43	-0.5	217 \pm 14

表 3.13: $\gamma=-0.5$ と固定して、全センサーについて求めた補正パラメーターの値。

温度 $^{\circ}\text{C}$	VCTI [10^{-6} /Transfer]	HCTI [10^{-6} /Transfer]
-90.0	4.5 \pm 0.3	6.3 \pm 0.3
-87.5	2.74 \pm 0.09	4.3E \pm 0.6
-80.0	0.83 \pm 0.06	1.4 \pm 0.5

表 3.14: BI、Mn K について温度と CTI の関係。-90 $^{\circ}\text{C}$ と比べて、-80 $^{\circ}$ では、VCTI、HCTI の値はともに約 5 分の 1 に減少している。

3.3 軌道上データでの確認

現在解析で使われているパラメータは地上のデータから求めたものである。しかし、電荷洩れ補正の各パラメータは軌道上で放射線等の影響により時間変動すると考えられる。そのため、現在のパラメータが機上のデータに関して適当であるか調べる必要がある。そこで、door close(2005年8月10日)のデータからキャリブレーションソース ^{55}Fe を使って各パラメータを求め直した。ここではその結果をまとめる。また、10月末のデータに対して補正が正しく行われているかを調べた。

使用した機上のデータは以下の通りである。

target	date
door close	20050810_0918_0928
RXJ1856	20051025_0149_0158
M82	20051019_0515_0526

表 3.15: データ取得日時

3.3.1 キャリブレーションソース (^{55}Fe)

door close のデータよりキャリブレーションソース ^{55}Fe を用いて各パラメータを求めなおした。方法は地上のデータから求めた場合と同様である。SAA は特に考慮せず、スプリット閾値は $\text{FI}=20, \text{BI}=7$ を使用している。

まず、一転送あたりに洩れ込む電荷量を求める。

イベント中心に隣接する4ピクセル (PHS(2),PHS(7),PHAS(4),PHAS(5)) のヒストグラムを作成する。(図 3.19~ 図 3.26)

それぞれの図 (図 3.19~ 図 3.26) より、PHAS(7),PHAS(5) のヒストグラムをポアソン分布でフィッティングした結果 (図 3.27~3.34) を表 3.16 にまとめる。

sensor	PHS(7)	PHAS(5)
XIS0	1.39 ± 0.07	2.1 ± 0.1
	1.76 ± 0.07	2.3 ± 0.1
	2.23 ± 0.10	2.3 ± 0.1
	2.78 ± 0.15	2.5 ± 0.1
XIS1	4.3 ± 0.3	1.6 ± 0.6
	5.4 ± 0.4	3.1 ± 0.3
	7.3 ± 0.5	2.3 ± 0.1
	9.3 ± 0.9	4.3 ± 0.5
XIS2	1.8 ± 0.1	1.8 ± 0.3
	2.4 ± 0.2	2.2 ± 0.3
	2.6 ± 0.2	2.5 ± 0.3
	3.4 ± 0.2	2.4 ± 0.3
XIS3	1.6 ± 0.1	1.80 ± 0.05
	2.0 ± 0.1	1.82 ± 0.04
	2.6 ± 0.2	1.93 ± 0.05
	3.3 ± 0.3	2.02 ± 0.04

表 3.16: Mn-K α の PHS(7) と PHAS(5) のヒストグラムをフィッティングして求めた poisson mean。それぞれ転送回数が少い順に並んでいる。転送回数の増加に伴い poisson mean の値が大きくなる。

PHAS(7) は RAWY の 1 次関数、PHAS(5) は RAWX の 1 次関数でモデル化する。(式 (2.1)) ここで得られる slope の値は、1 転送中に中心ピクセルが失う電荷量を表す。フィッティング結果 (図 3.35,3.36) と slope,offset のベストフィット (表 3.17) を以下に示す。

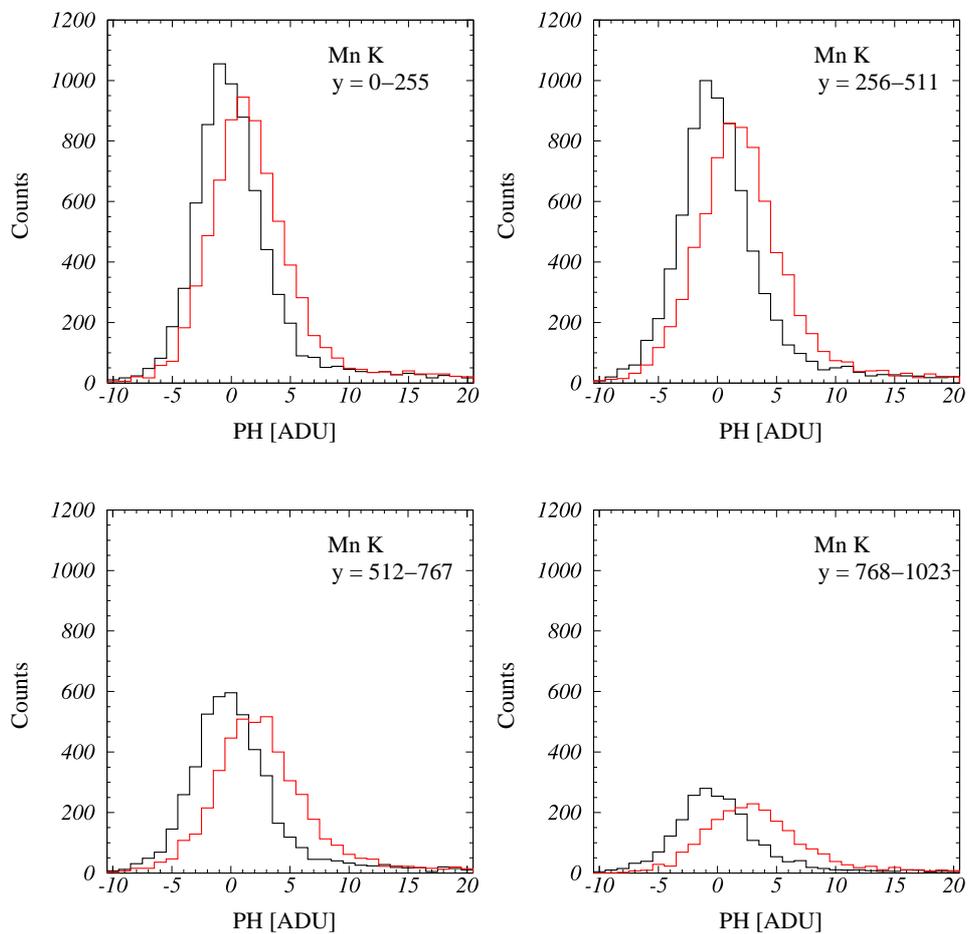


図 3.19: XIS0 Mn K の PHAS(2)(点線),PHAS(7)(実線) のヒストグラム

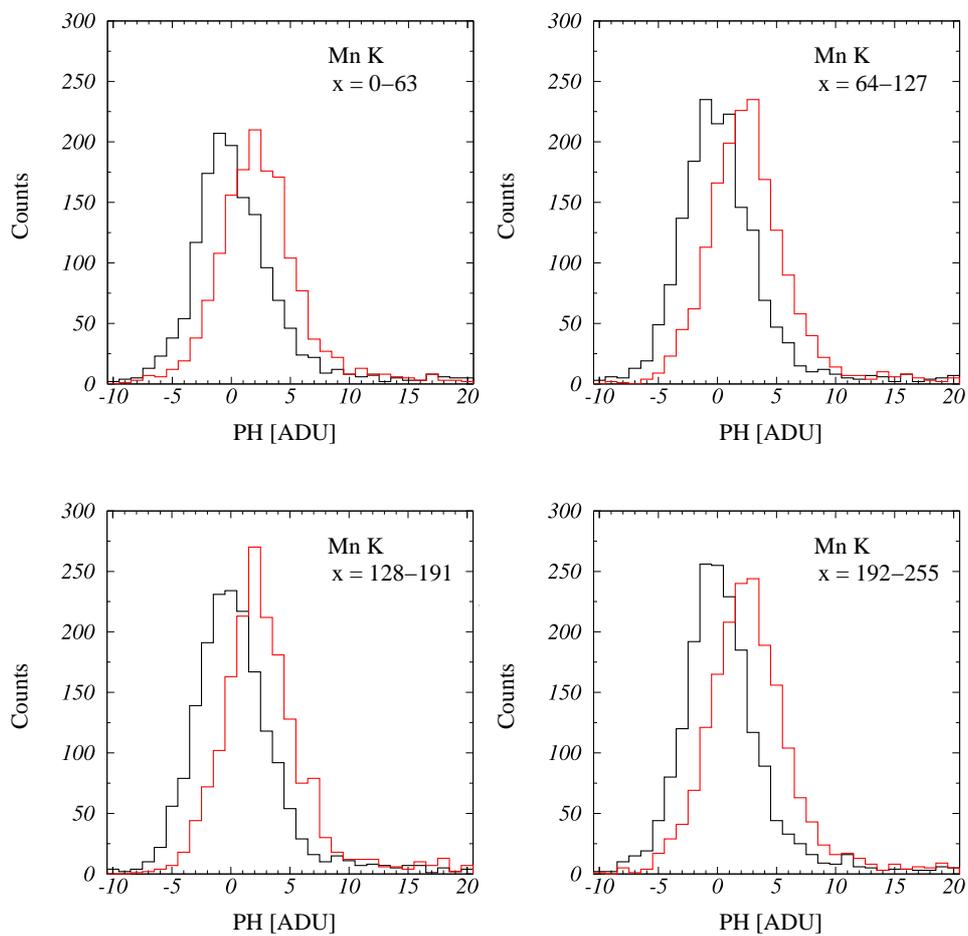


図 3.20: XIS0 Mn の PHAS(4)(点線),PHAS(5)(実線) のヒストグラム。

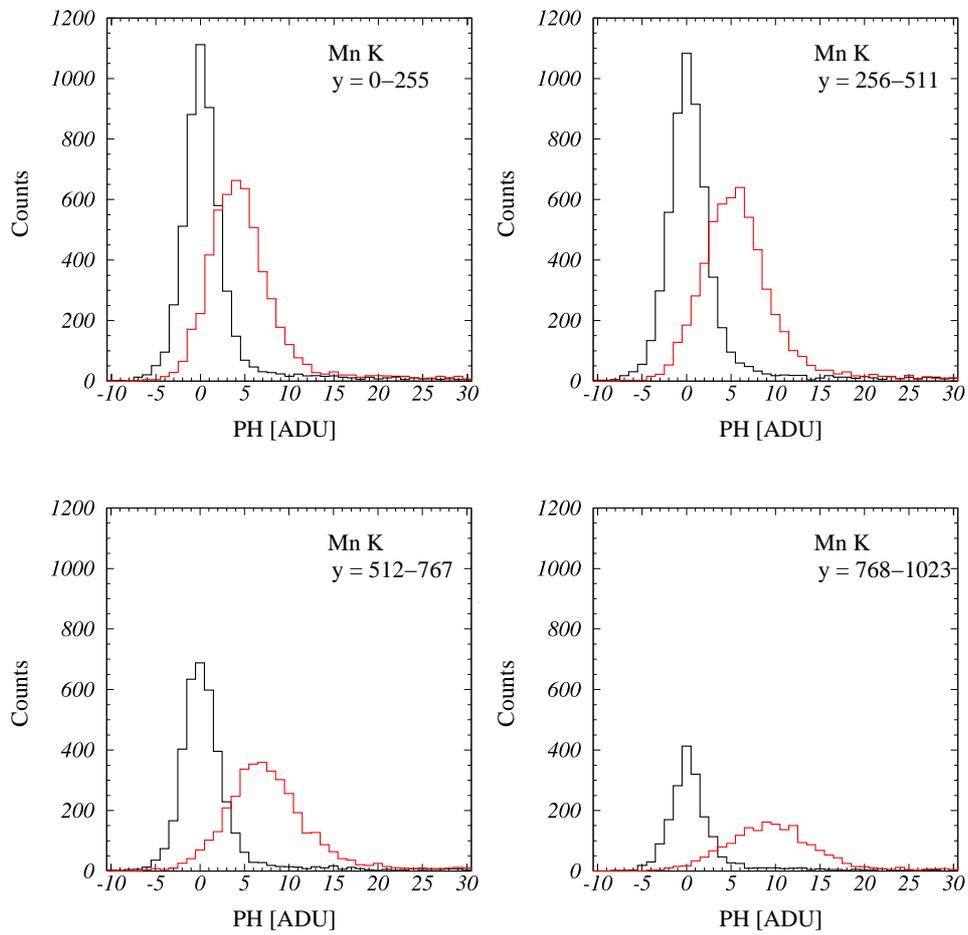


図 3.21: XIS1 Mn K の PHAS(2)(点線),PHAS(7)(実線) のヒストグラム

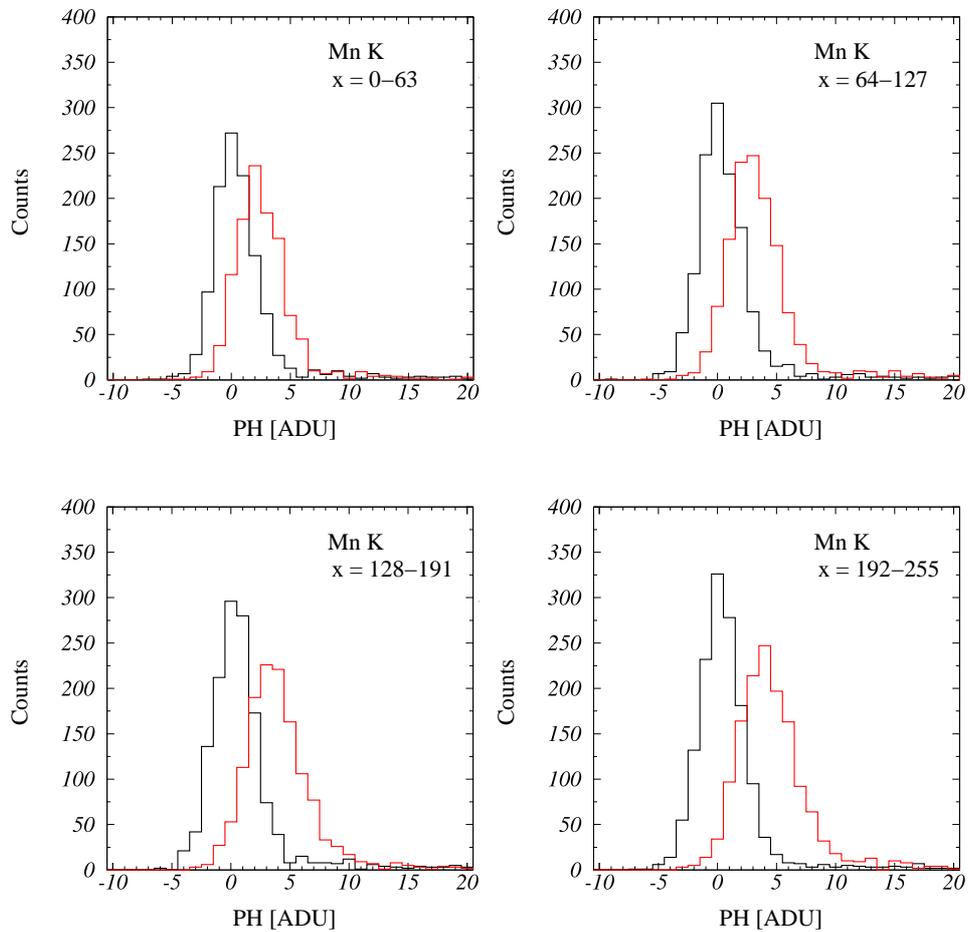


図 3.22: XIS1 Mn の PHAS(4)(点線),PHAS(5)(実線) のヒストグラム。

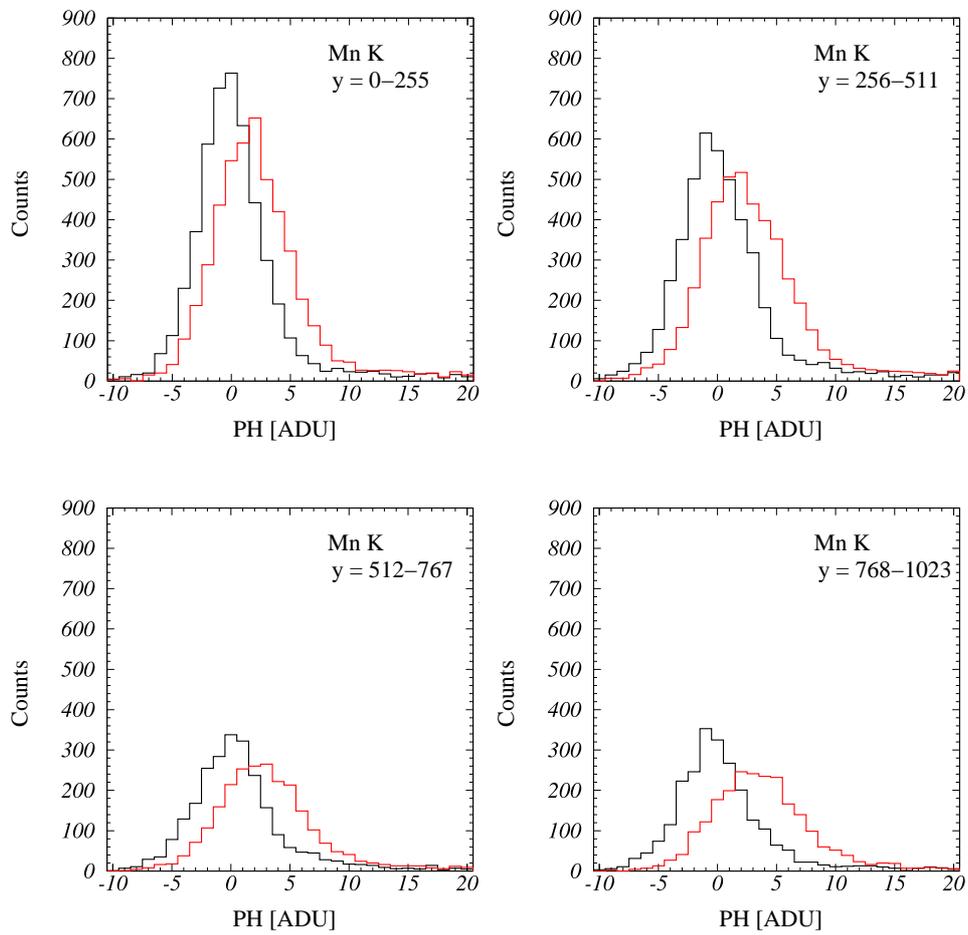


図 3.23: XIS2 Mn K の PHAS(2)(点線),PHAS(7)(実線) のヒストグラム

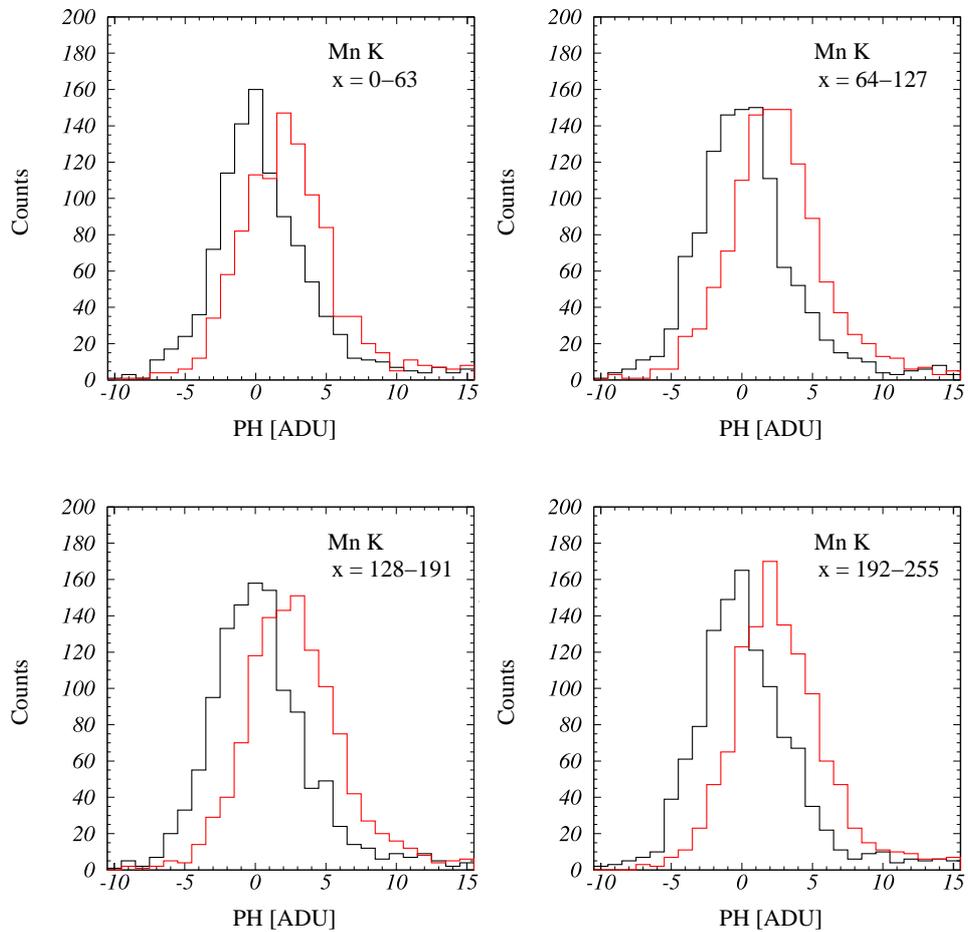


図 3.24: XIS2 Mn の PHAS(4)(点線),PHAS(5)(実線) のヒストグラム。

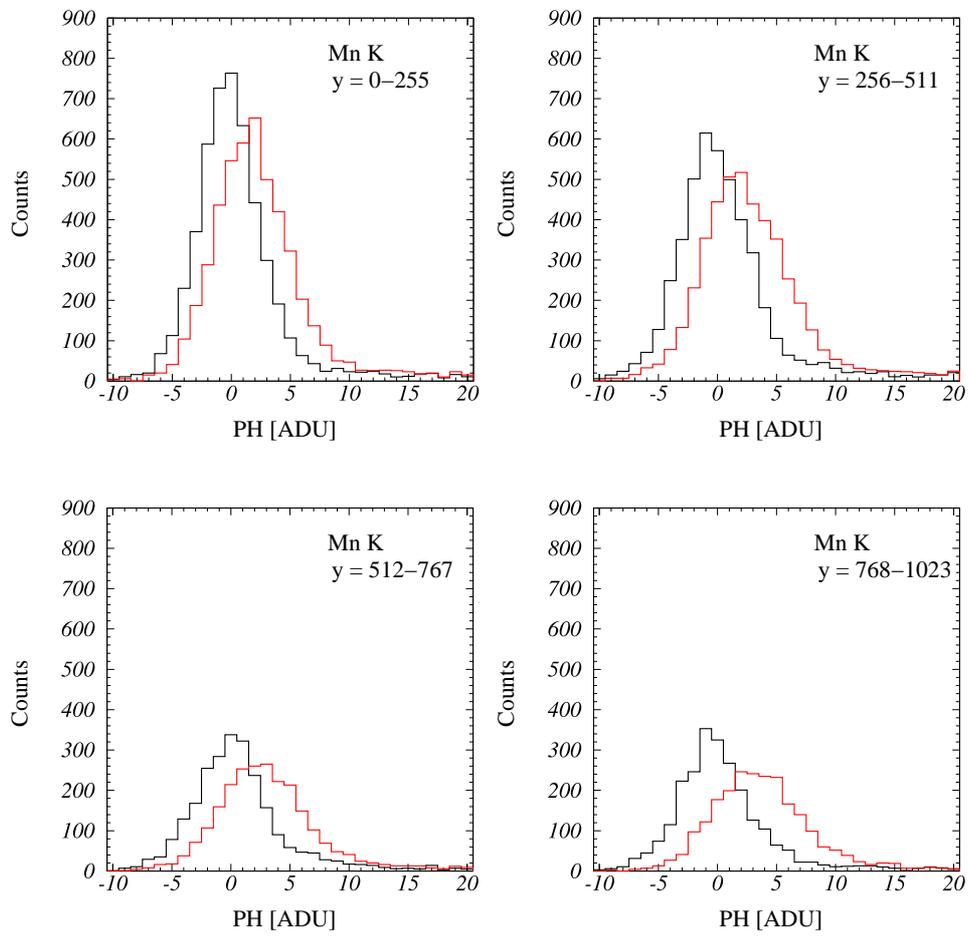


図 3.25: XIS3 Mn K の PHAS(2)(点線),PHAS(7)(実線) のヒストグラム

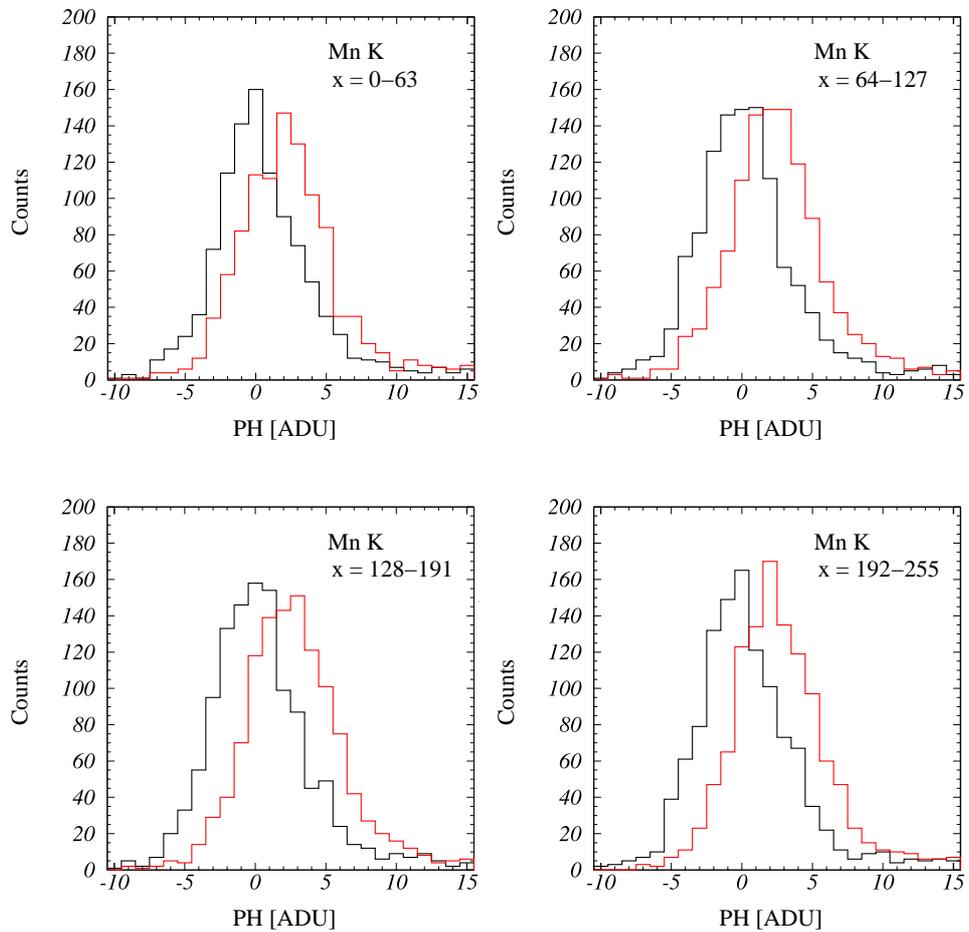


図 3.26: XIS3 Mn の PHAS(4)(点線),PHAS(5)(実線) のヒストグラム。

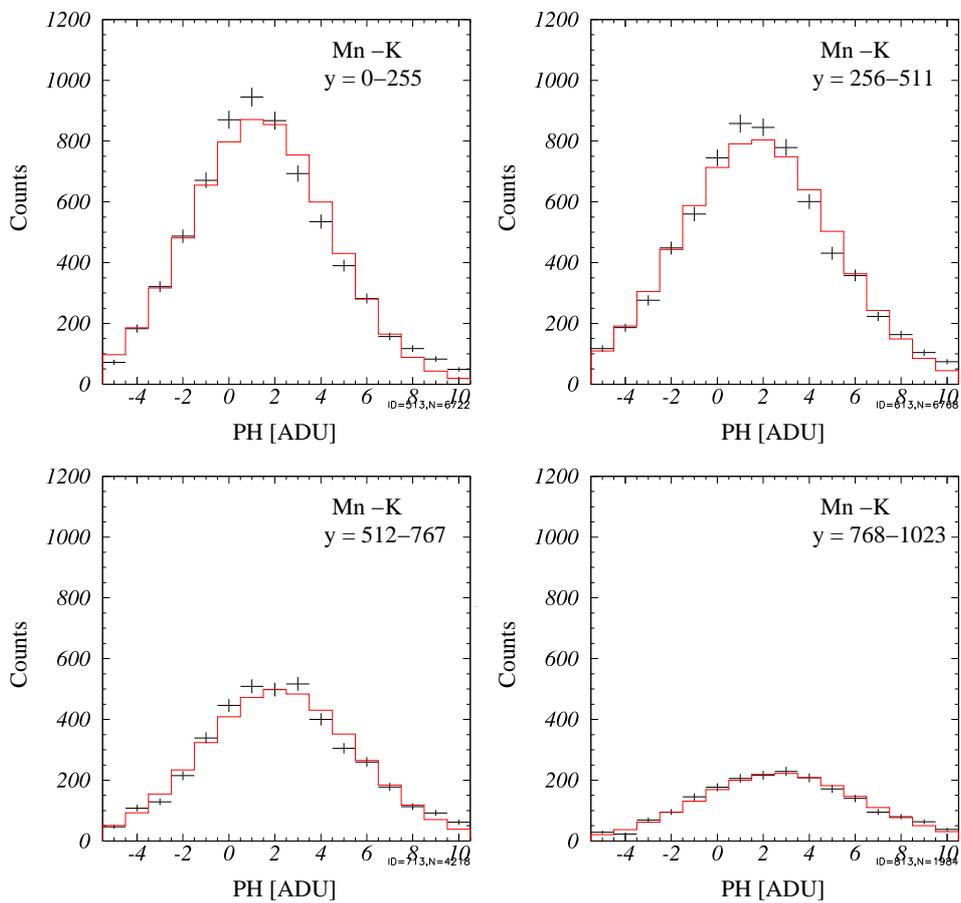


図 3.27: XIS0 Mn K の PHAS(7) のフィッティング結果。実線はモデル。

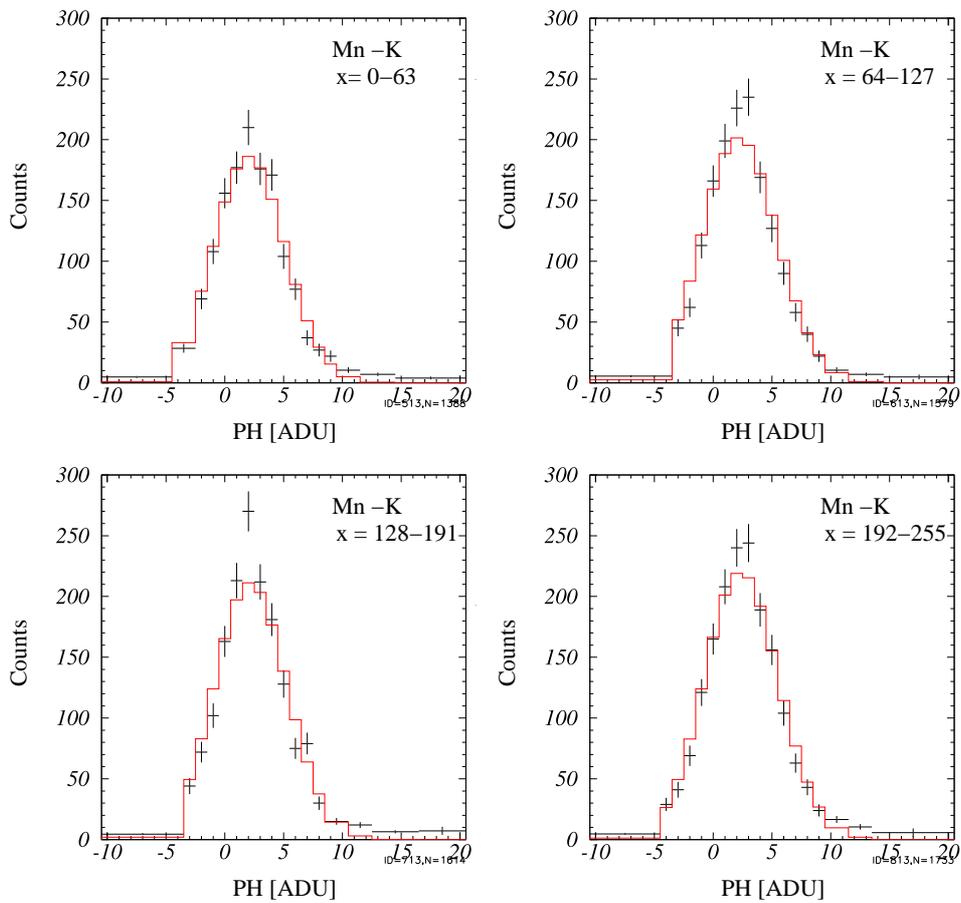


図 3.28: XIS0 Mn の PHAS(5) のフィッティング結果。実線はモデル。

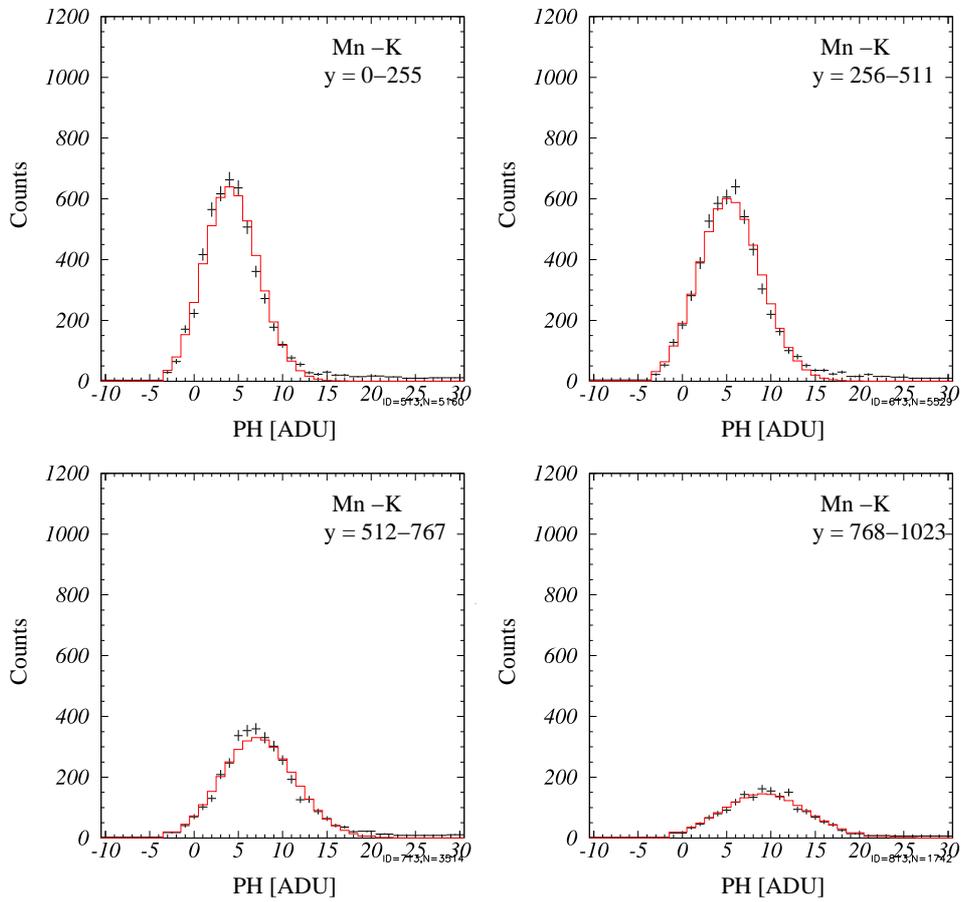


図 3.29: XIS1 Mn K の PHAS(7) のフィッティング結果。実線はモデル。

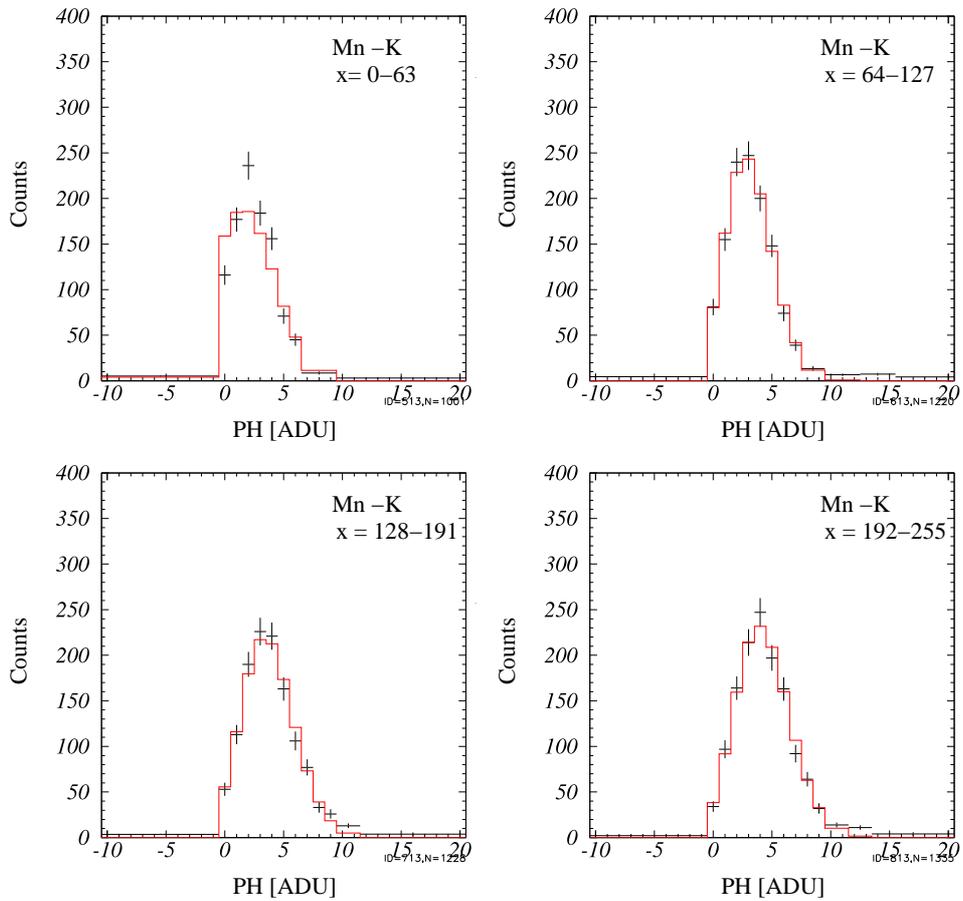


図 3.30: XIS1 Mn の PHAS(5) のフィッティング結果。実線はモデル。

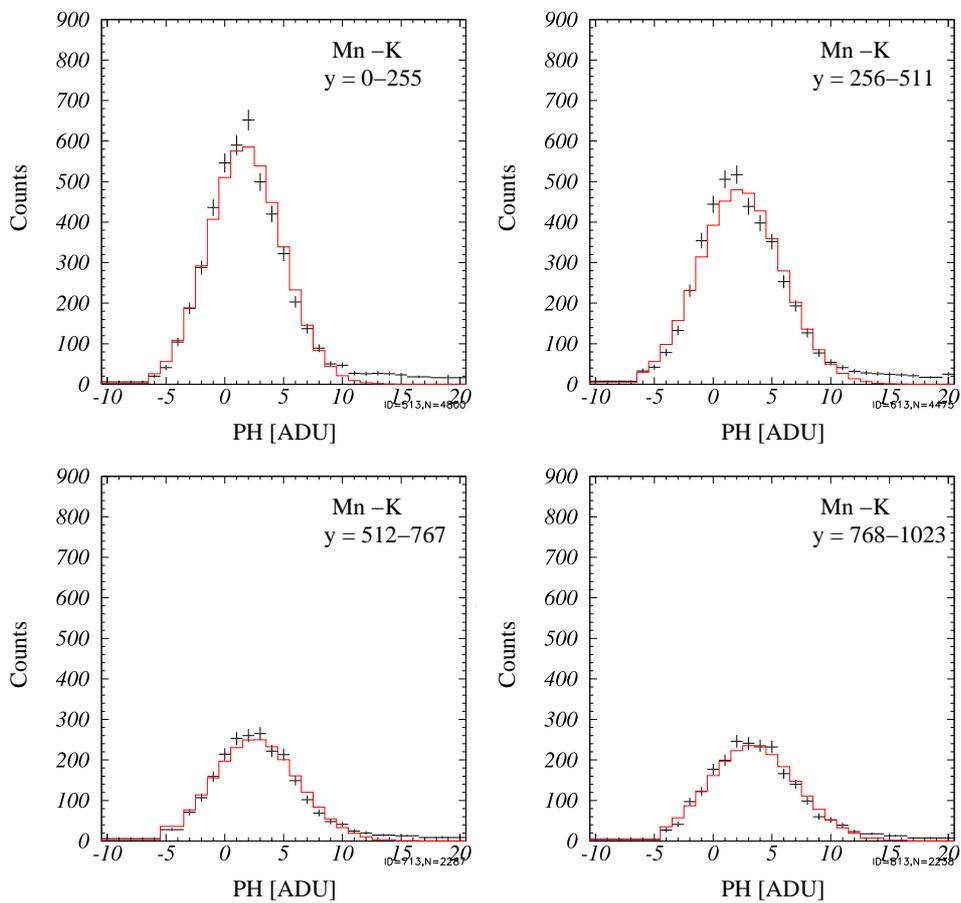


図 3.31: XIS2 Mn K の PHAS(7) のフィッティング結果。実線はモデル。

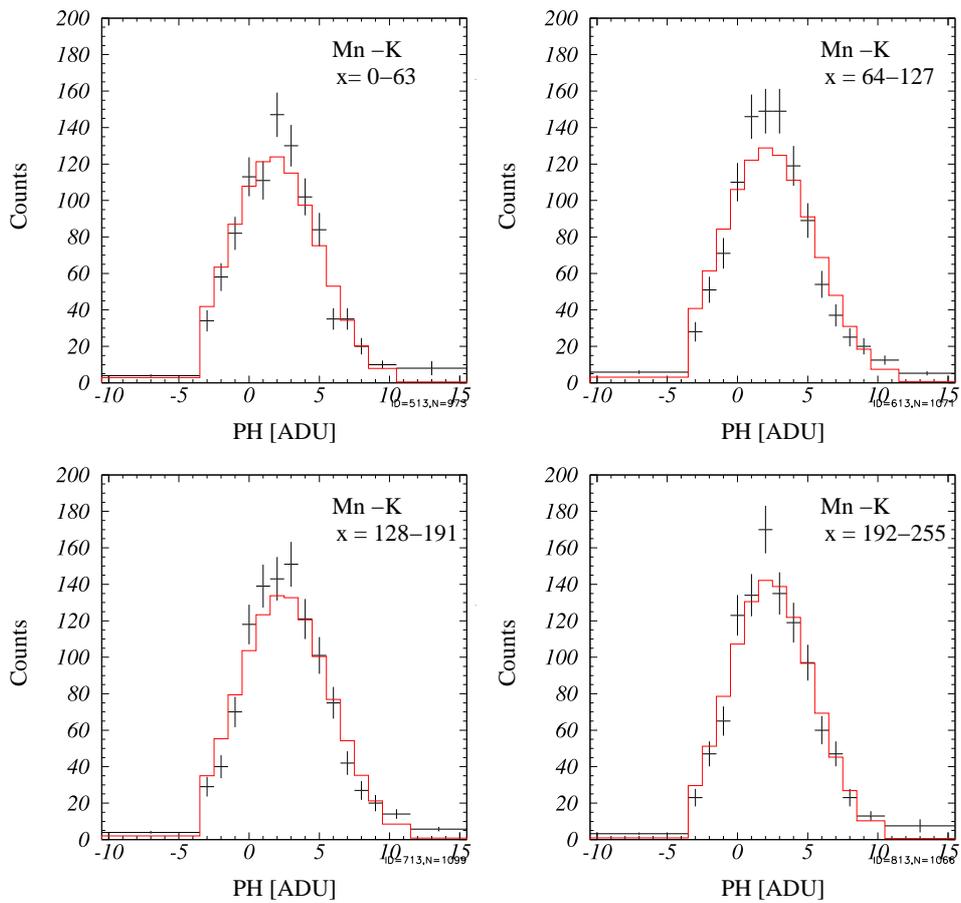


図 3.32: XIS2 Mn の PHAS(5) のフィッティング結果。実線はモデル。

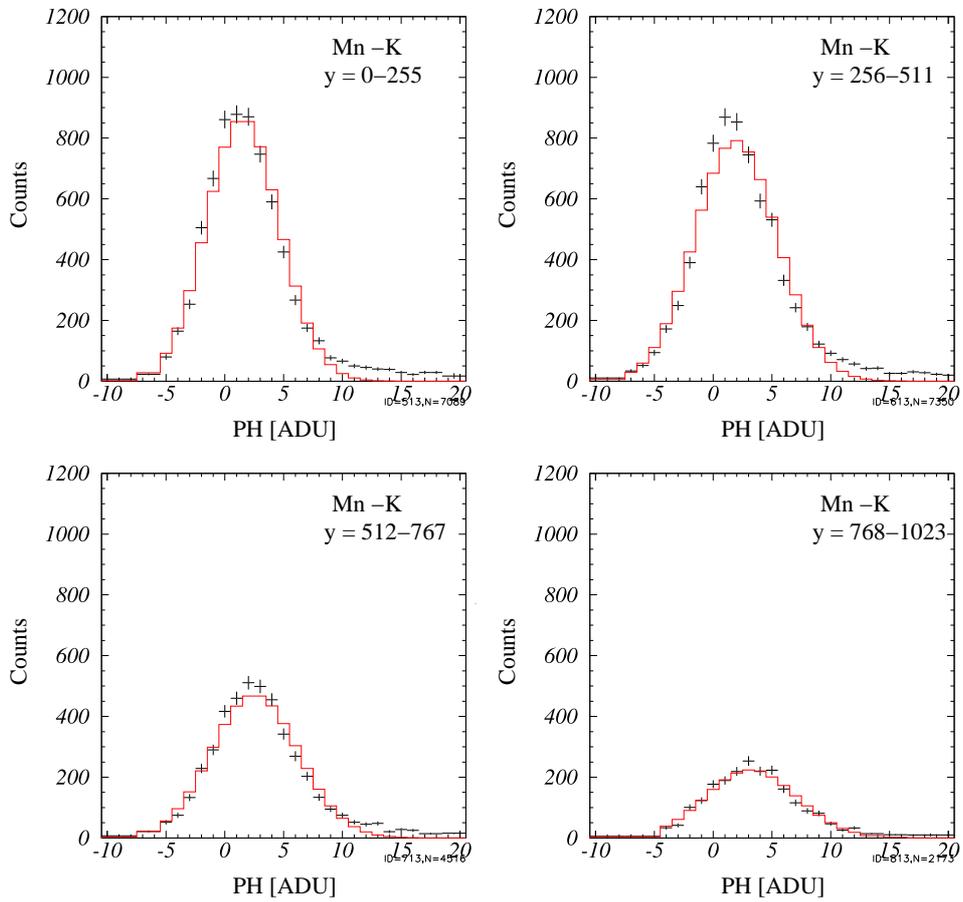


図 3.33: XIS3 Mn K の PHAS(7) のフィッティング結果。実線はモデル。

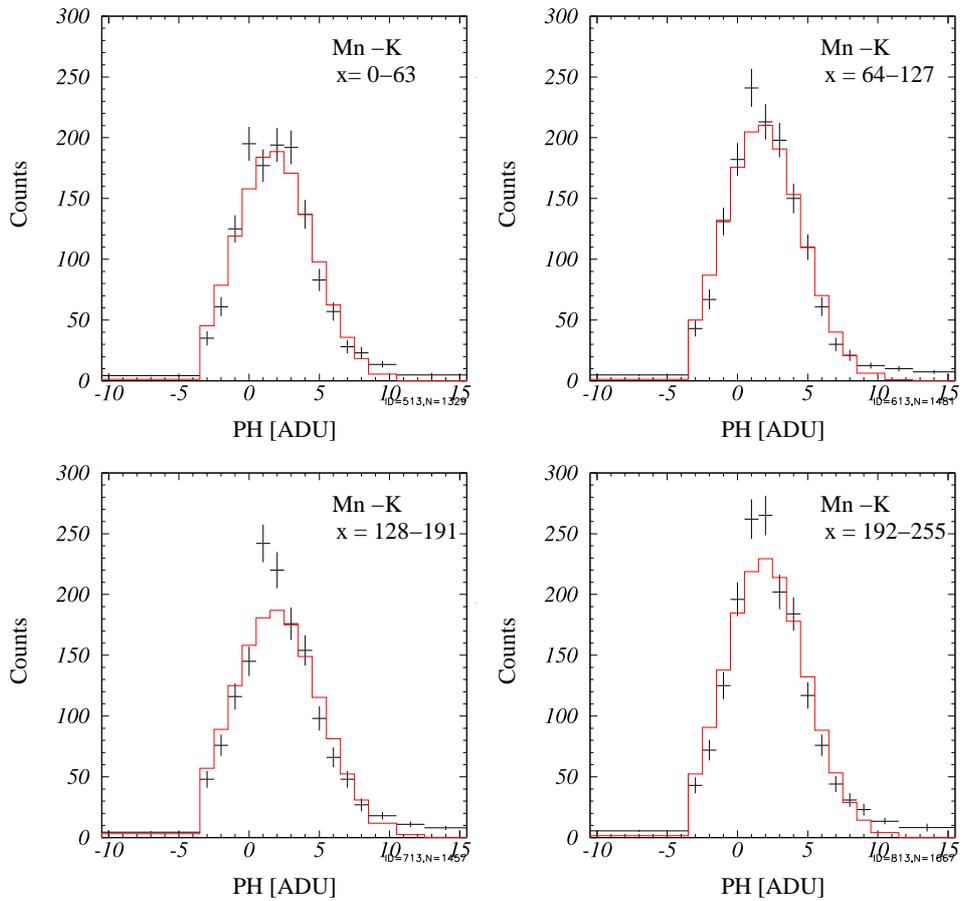


図 3.34: XIS3 Mn の PHAS(5) のフィッティング結果。実線はモデル。

sensor	PHAS(7)		PHAS(5)	
	slope[$10^{-3} \cdot \text{pixel}$]	offset[ch]	slope[$10^{-3} \cdot \text{pixel}$]	offset[ch]
XIS0	1.7 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1.5 ± 0.7	2.1 ± 0.1
XIS1	6.2 ± 0.9	3.3 ± 0.4	12.7 ± 3.6	1.6 ± 0.5
XIS2	2.0 ± 0.3	1.5 ± 0.1	3.2 ± 1.9	1.8 ± 0.2
XIS3	2.1 ± 0.3	1.3 ± 0.1	1.2 ± 0.3	1.7 ± 0.1

表 3.17: 1次関数でフィットした結果。

表 3.17 で求められた、1 転送あたりに洩れ込むパルスハイトを中心パルスハイト (PHAS(E)) で割った値が、電荷転送非効率 (CTI) である。ここでは PHAS(E) を、グレード 0,2,3,4,6 のスペクトルをガウシアンでフィッティングすることで求めたピークのパルスハイトとした。(表 (3.18))

sensor	PHAS(E)[ch](Mn-K α)
XIS0	1622.4 ± 0.2
XIS1	1613.0 ± 0.2
XIS2	1592.1 ± 0.3
XIS3	1489.2 ± 0.2

表 3.18: PHAS(E)(壁キャリブレーションソース ^{55}Fe)

また、PHAS(E) と CTI の関係はベキ関数となる。(式 (2.2)) このベキの値、パラメータ AlphaV, AlphaH は共に 0.5 とした。これらの結果より得られた電荷洩れ補正のパラメータを表 3.19 に示す。

Sensor	CTIH(1500ch)	CTIV(1500ch)	OffsetRAWX	OffsetRAWY
XIS0	9.62×10^{-6}	1.11×10^{-6}	1395	663
XIS1	8.46×10^{-6}	4.09×10^{-6}	128	540
XIS2	2.07×10^{-6}	1.30×10^{-6}	572	752
XIS3	7.91×10^{-7}	1.41×10^{-6}	1474	595

表 3.19: 電荷洩れ補正 パラメータ 2005/08/10(軌道上 door close)

実際のデータ解析において、XIS1(BI) は可変スプリット法を用いる。可変 split 法を使用すると、Mn-K に相当するエネルギーの X 線では、スプリット閾値が 12 になる。そこで XIS1 について spth=12 でも各パラメータを調べた。

打ち上げ後、少なくとも、2005 年 8 月 10 日の時点では、各パラメータの値が地上で求めたものとほとんど変わらないことがわかった。また、スプリット閾値が 12 の場合についても大きな変化はなく、可変スプリット法を用いた場合でも現在のパラメータで適当であると考えられる。

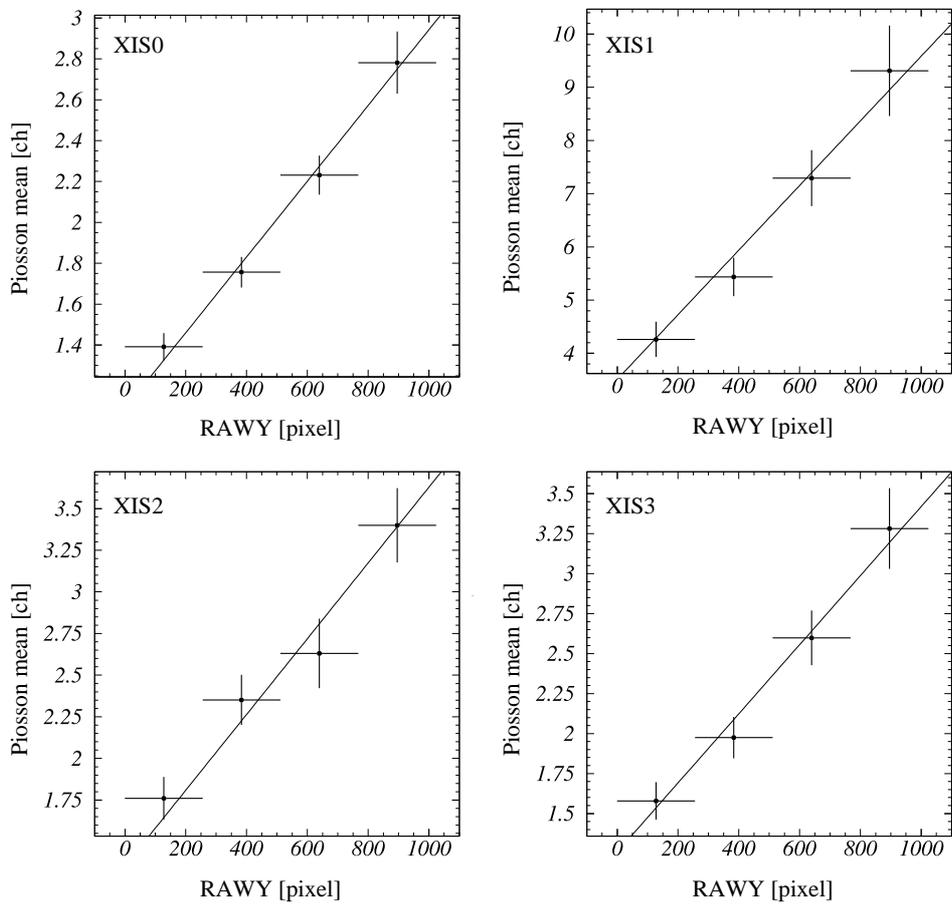


図 3.35: PHAS(7) の転送回数と電荷洩れ出し量の線形性。実線はモデル。

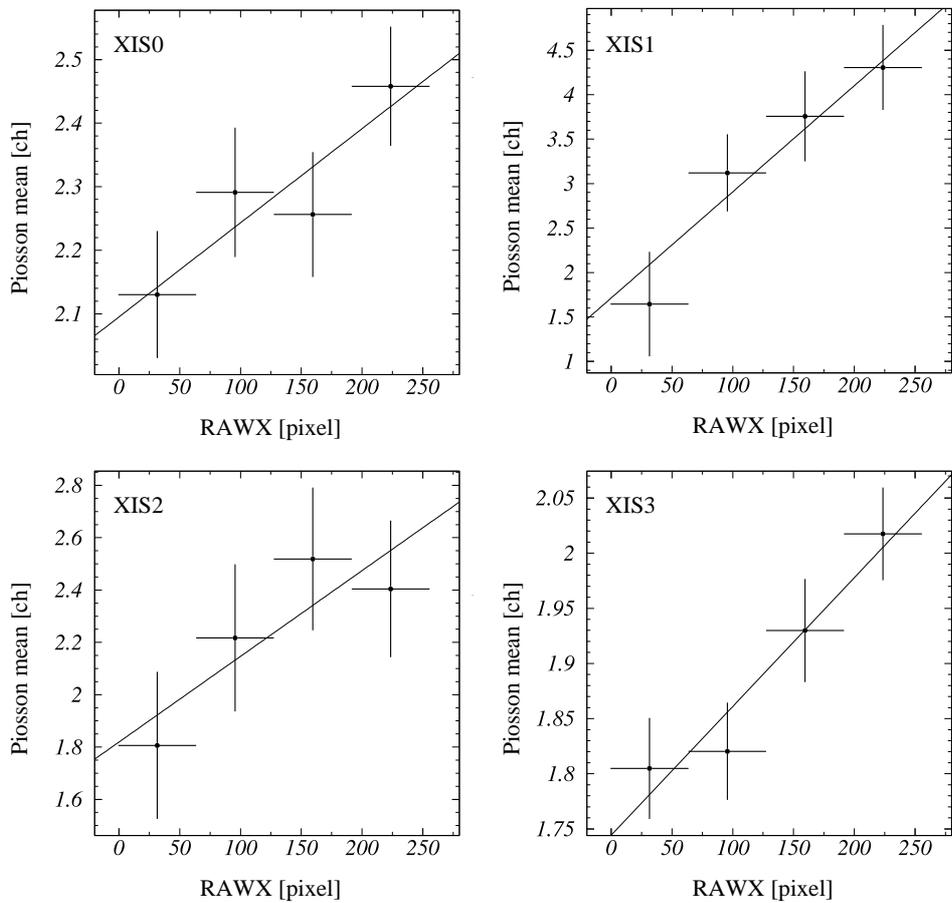


図 3.36: PHAS(5) の転送回数と電荷洩れ出し量の線形性。実線はモデル。

Sensor	CTIH(1500ch)	CTIV(1500ch)	OffsetRAWX	OffsetRAWY
XIS0	1.12×10^{-6}	9.68×10^{-7}	1291	799
XIS1	6.03×10^{-6}	4.43×10^{-6}	253	517
XIS2	1.76×10^{-6}	1.32×10^{-6}	782	1007
XIS3	5.08×10^{-7}	1.38×10^{-6}	3225	823

表 3.20: 電荷洩れ補正 パラメータ (地上)

Spth	CTIH(1500ch)	CTIV(1500ch)	OffsetRAWX	OffsetRAWY
spth=7	8.46×10^{-6}	4.09×10^{-6}	128	540
spth=12	8.59×10^{-6}	4.10×10^{-6}	123	541
地上 spth=7	6.03×10^{-6}	4.43×10^{-6}	253	517

表 3.21: 電荷洩れ補正 パラメータ 2005 年 8 月 10(機上 door close)

3.3.2 RXJ1856・M82

door close の時点で各パラメータに大きな変化はないことがわかった。しかしながら、時間変動しないということとはできない。そこで、10月末のデータ (RXJ1856 2005 年 10 月 25 日, M82 2005 年 10 月 19 日) について、電荷洩れ補正が正しくできているか調べた。

中心ピクセルに隣接する 4 つのピクセル (PHAS(2), PHAS(4), PHAS(5), PHAS(7)) についてそれぞれ、波高値ごとのイベント数をプロットした。読みだし口からの距離に関係なく、波高値 0 ch にピークを持つ分布になることを期待する。

FI(XIS0, XIS2, XIS3) は宇宙線のイベントを多く含んでいた。そのため、グレード 02346 だけを取り出し、同様に波高値ごとのイベント数をプロットした。

結果から分かったことをまとめる。

- BI(XIS1) は、縦転送・横転送ともうまく補正できている。
- FI(XIS0, XIS2, XIS3) の縦転送は、うまく補正できている。
- FI(XIS0, XIS2, XIS3) の横転送は、1-2ch 補正しすぎているものもある。

結果を次ページから示す。

RXJ1856

縦転送 グレード 02346 補正なし

横軸は波高値 [ch]、縦軸はイベント数である。
黒線:読み出し口に近いピクセル (PH[2])、赤線:読みだし口から遠いピクセル (PH[7])

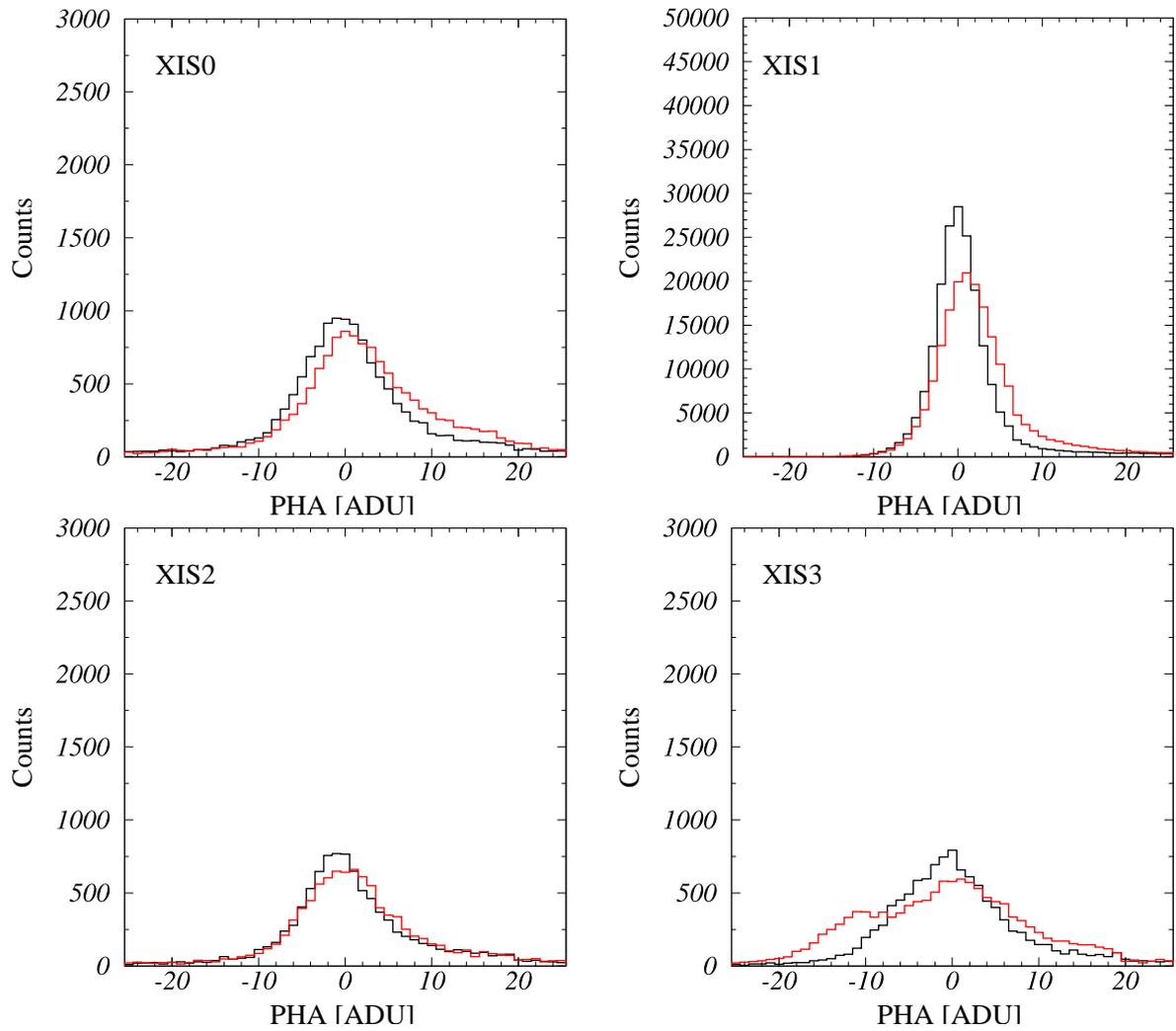


図 3.37: RXJ1856 縦転送 グレード 02346 補正なし, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

縦転送 グレード 02346 補正あり

横軸は波高値 [ch]、縦軸はイベント数である。
黒線:読み出し口に近いピクセル (PH[2])、赤線:読みだし口から遠いピクセル (PH[7])

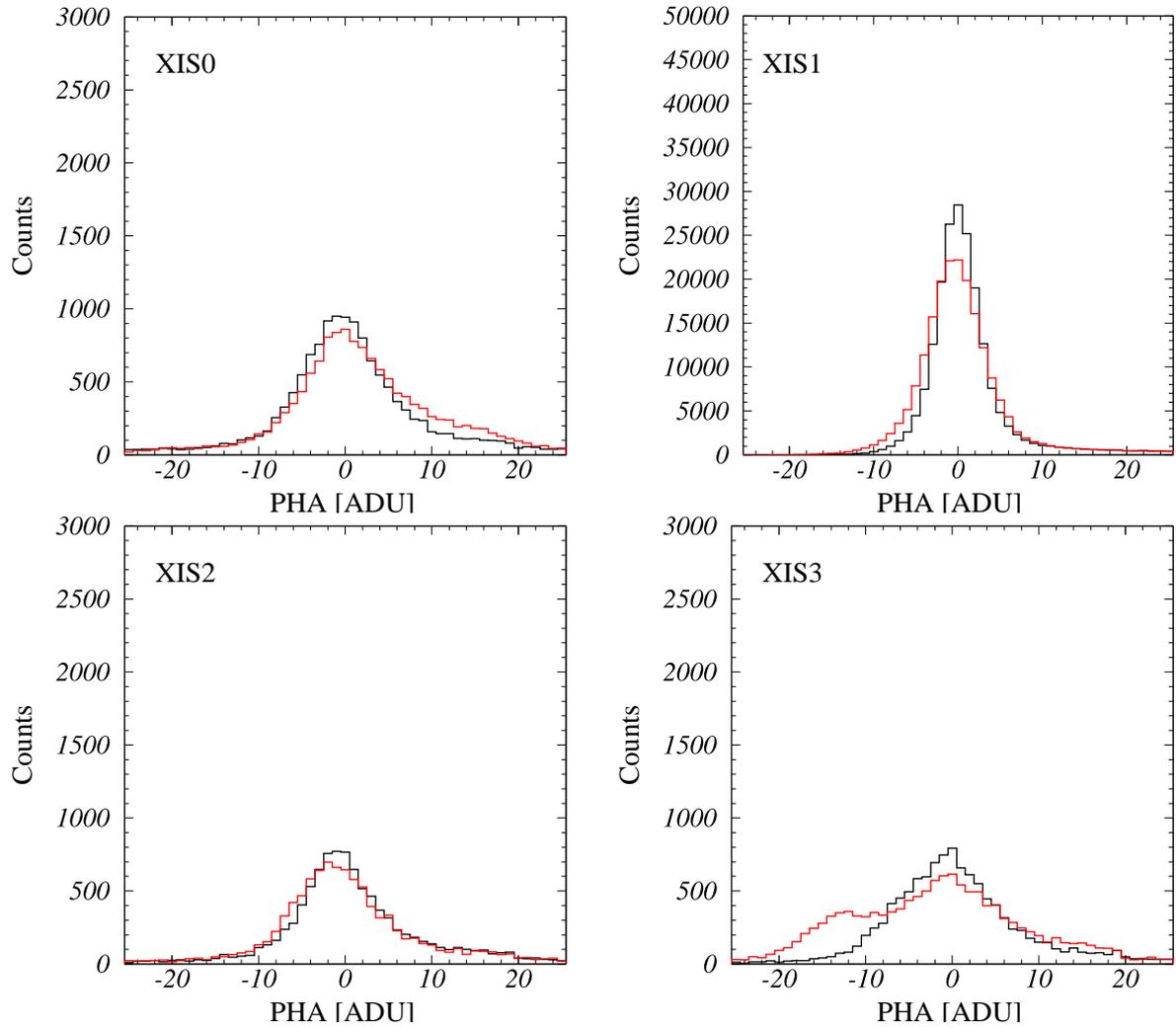


図 3.38: RXJ1856 縦転送 グレード 02346 補正あり, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

横転送 グレード 02346 補正なし

横軸は波高値 [ch]、縦軸はイベント数である。
黒線:読み出し口に近いピクセル (PH[4])、赤線:読みだし口から遠いピクセル (PH[5])

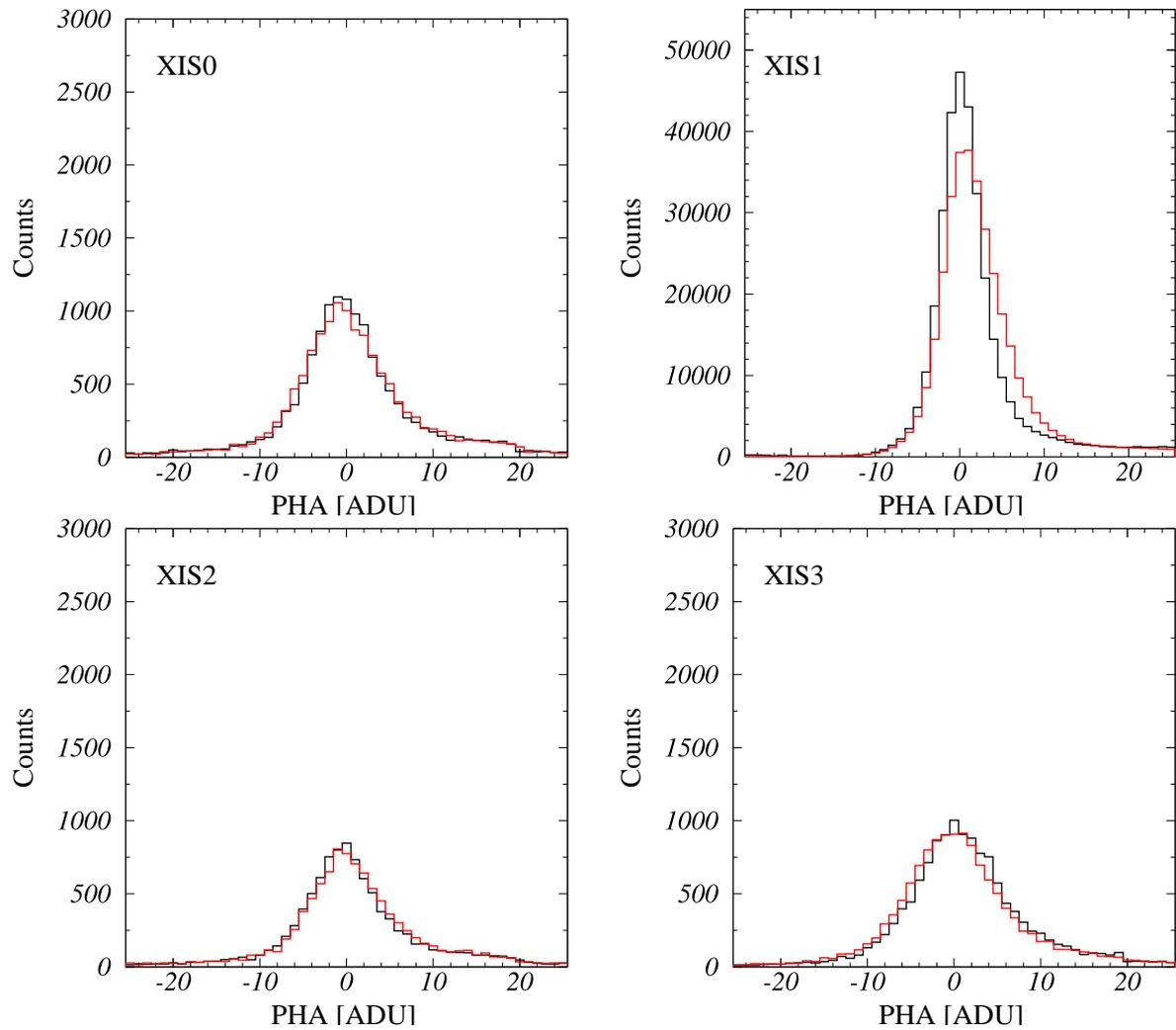


図 3.39: RXJ1856 横転送 グレード 02346 補正なし, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

横転送 グレード 02346 補正あり

横軸は波高値 [ch]、縦軸はイベント数である。
黒線:読み出し口に近いピクセル (PH[4])、赤線:読みだし口から遠いピクセル (PH[5])

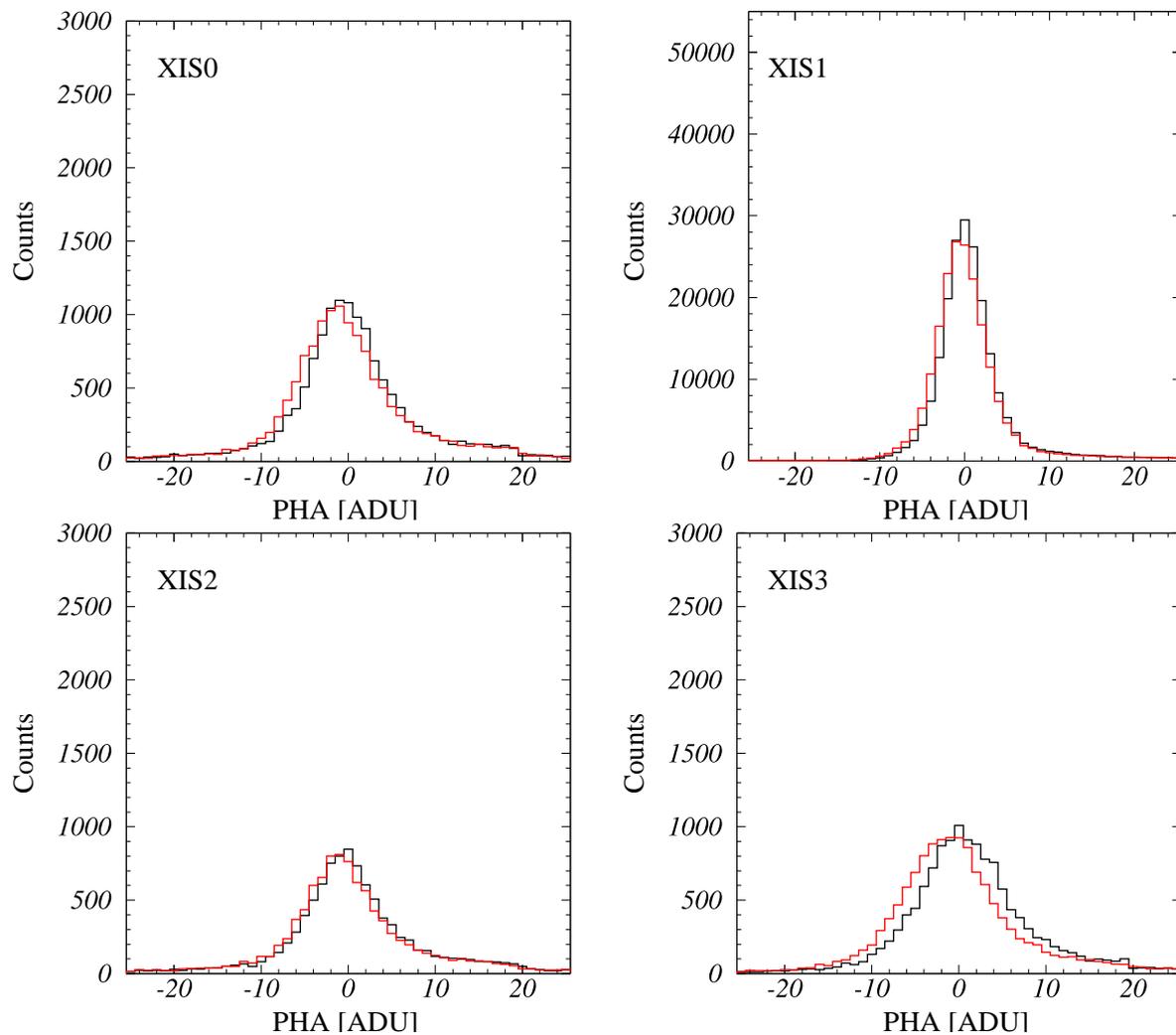


図 3.40: RXJ1856 横転送 グレード 02346 補正あり, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

M82

縦転送 グレード 02346 補正なし

横軸は波高値 [ch]、縦軸はイベント数である。
黒線:読み出し口に近いピクセル (PH[2])、赤線:読みだし口から遠いピクセル (PH[7])

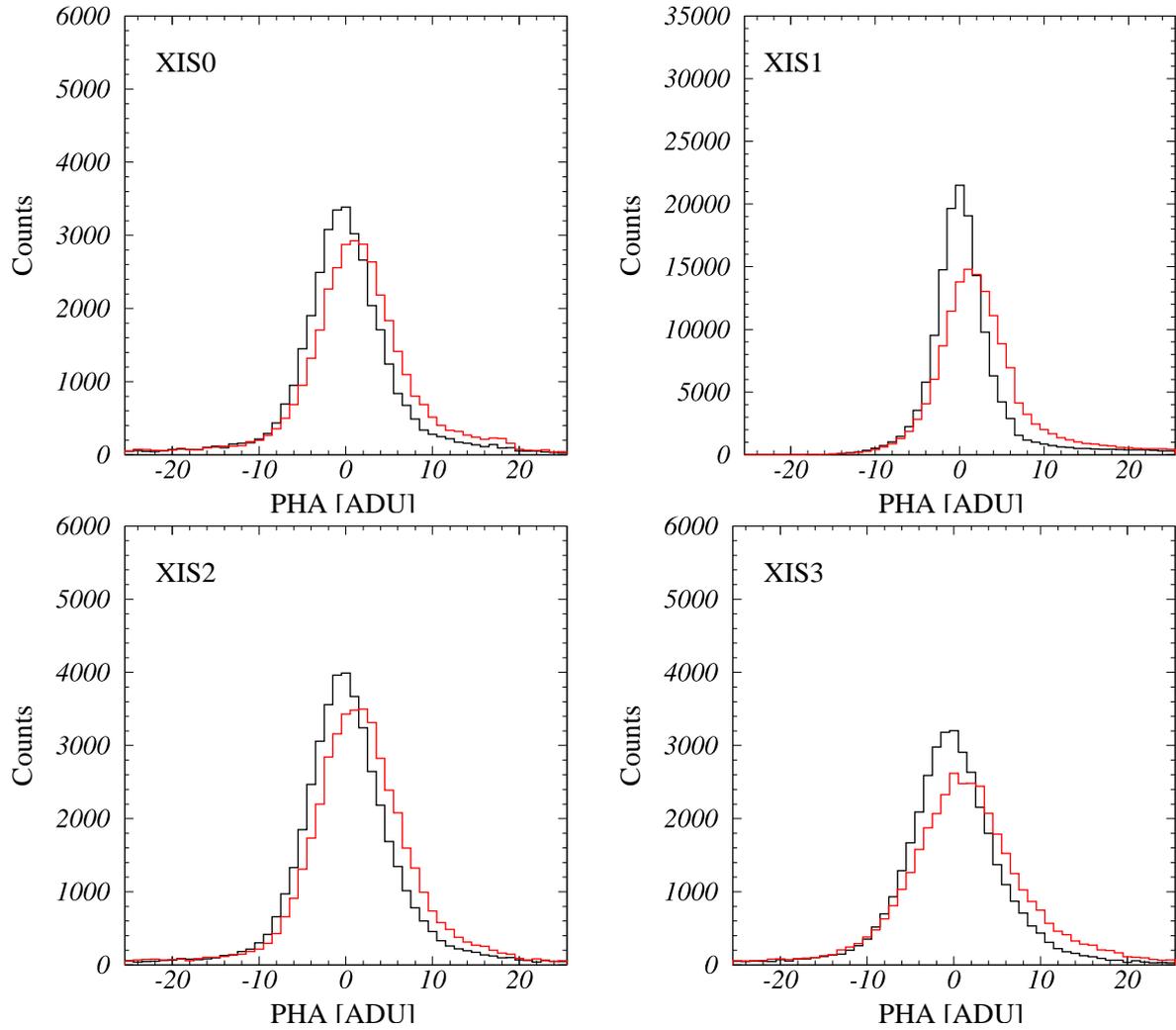


図 3.41: M82 縦転送 グレード 02346 補正なし, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

縦転送 グレード 02346 補正あり

横軸は波高値 [ch]、縦軸はイベント数である。
黒線:読み出し口に近いピクセル (PH[2])、赤線:読みだし口から遠いピクセル (PH[7])

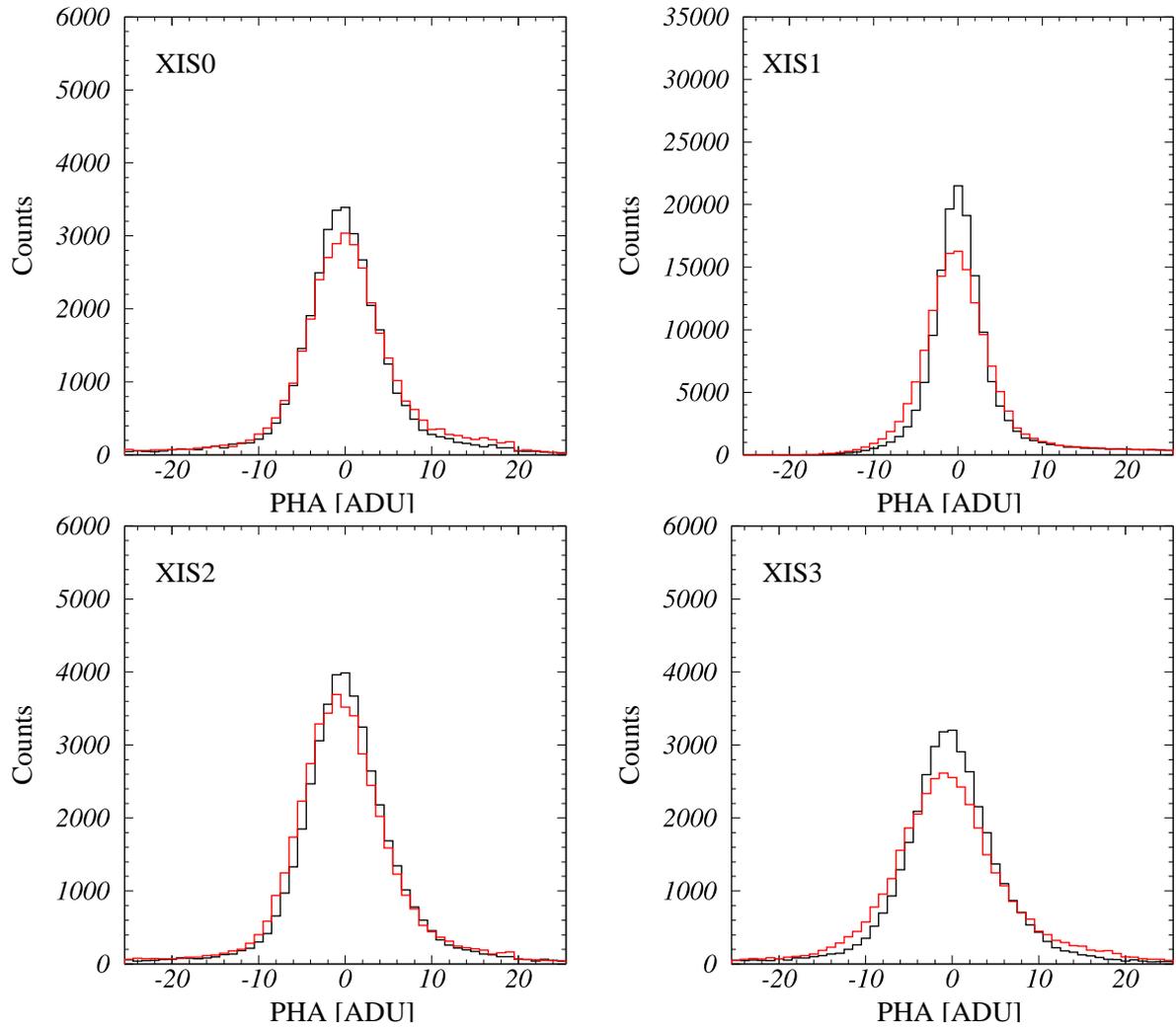


図 3.42: M82 縦転送 グレード 02346 補正あり, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

横転送 グレード 02346 補正なし

横軸は波高値 [ch]、縦軸はイベント数である。
黒線:読み出し口に近いピクセル (PH[4])、赤線:読みだし口から遠いピクセル (PH[5])

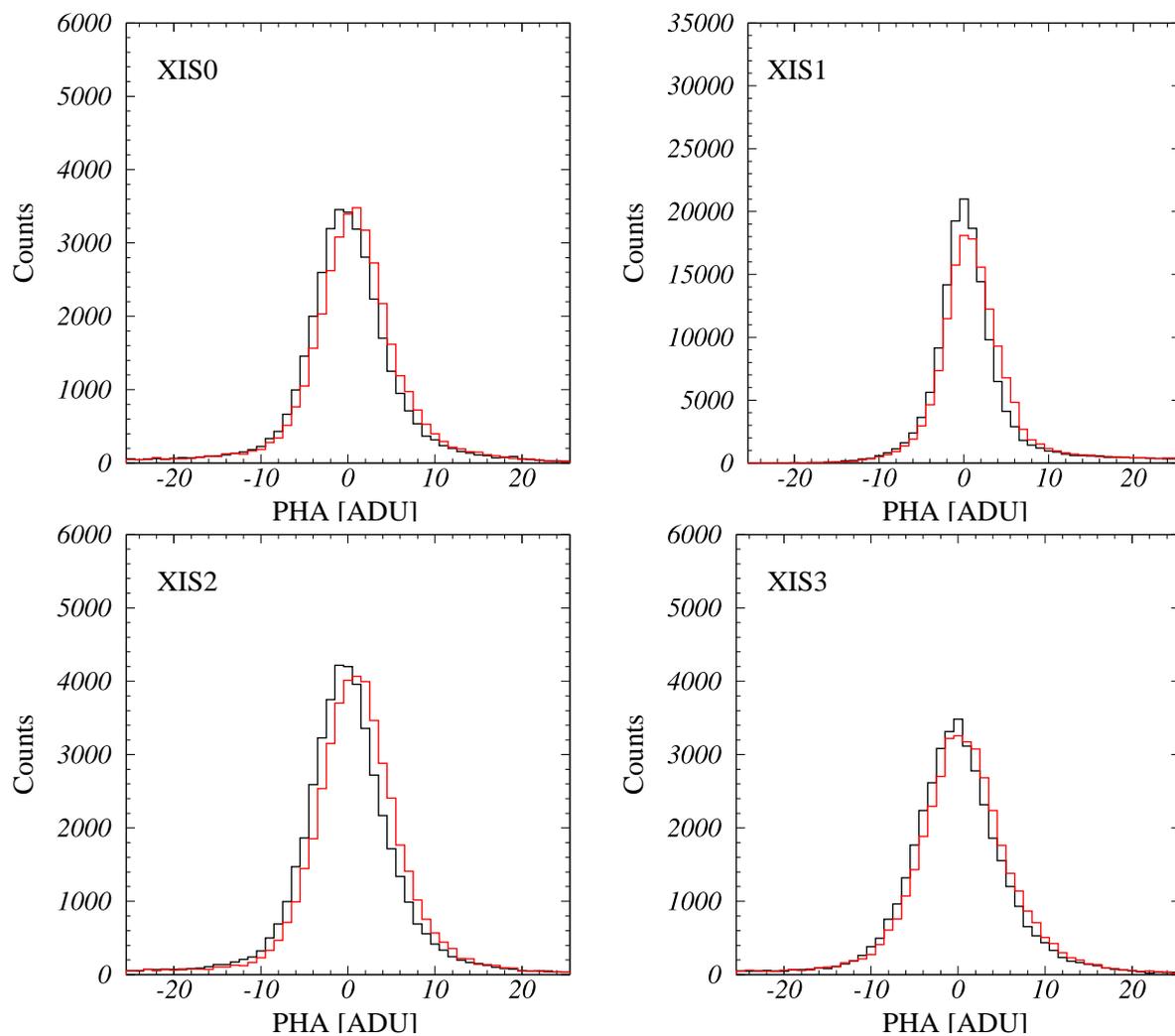


図 3.43: M82 横転送 グレード 02346 補正なし, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

横転送 グレード 02346 補正あり

横軸は波高値 [ch]、縦軸はイベント数である。
黒線:読み出し口に近いピクセル (PH[4])、赤線:読みだし口から遠いピクセル (PH[5])

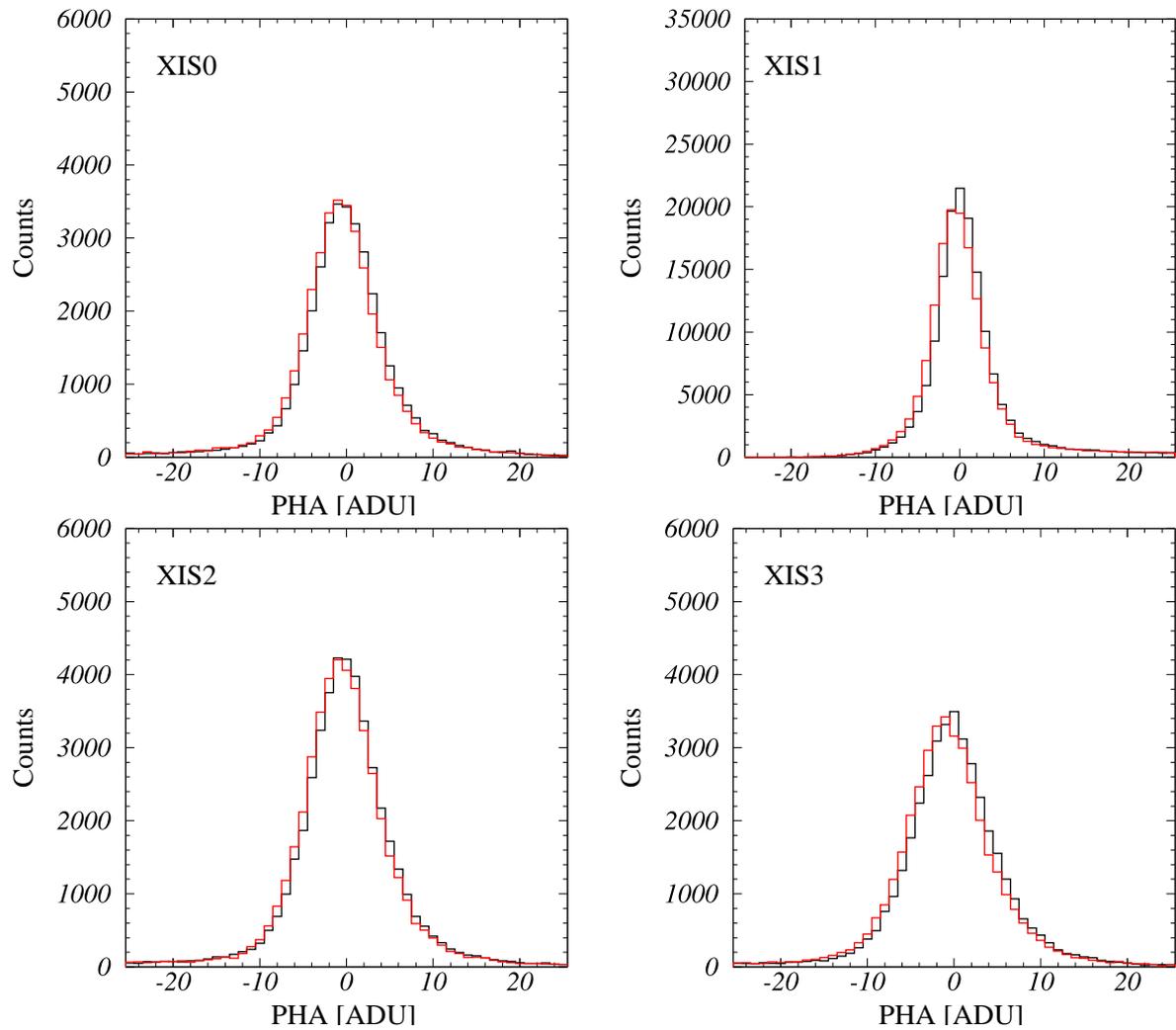


図 3.44: M82 横転送 グレード 02346 補正あり, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

3.4 CTI補正

半導体結晶には製造時点で、あるいは、製造後の放射線損傷によって格子欠陥が生じる。特に半導体層と絶縁層の境界には多く存在している。これらは転送される電荷にとってトラップとなり、転送途中で電荷が失われてしまう。電荷量全体に対する、1回の転送により失われる電荷量の割合を電荷転送非効率 (Charge Transfer Inefficiency) と呼ぶ。あるいは、トラップされずに転送される電荷の割合を電荷転送効率 (Charge Transfer Efficiency) と呼ぶ。

トラップされると、電荷が失われることで X 線のエネルギーが正しく求められないだけでなく、エネルギー分解能が悪化する。

この CTI を補正することで正しい X 線エネルギーを求める。

CTI はエネルギーのべき関数で与えられる。

$$CTI = C_{TI_CONST} + C_{TI_NORM} \times PI^{C_{TI_POW}} \times N \quad (4.1)$$

ここで、PI はエネルギーと 1 対 1 の関係にあるパルスハイト、N は転送回数である。本研究では、簡単のため、 $C_{TI_CONST} = 0$ 、 $C_{TI_POW} = -0.5$ とした。つまり、上式は、

$$CTI = C_{TI_NORM} \times PI^{-0.5} \times N \quad (4.2)$$

となる。よって、CTI 補正をするために必要なパラメータは、 C_{TI_NORM} となる。また、CTI は次式のようにも書くことができる。

$$CTI = \frac{\Delta PI}{PI} \frac{1}{N} \quad (4.3)$$

ここで、 ΔPI は、時間経過とともに CTI の影響で変化したパルスハイトである。本論文では「Frame store 領域の CTI は劣化しない」という仮定をし、door close の $^{55}\text{Fe Mn-K}\alpha$ の $ACTY = 0$ における中心パルスハイトを基準にとり、その値からの変化量を ΔPI とした。式 4.2, 4.3 より、補正に必要なパラメータ C_{TI_NORM} は、

$$C_{TI_NORM} = \frac{\Delta PI}{\text{sqrt}(PI)} \frac{1}{N} \quad (4.4)$$

となる。このパラメータを求めるために、壁キャリブレーションソース ^{55}Fe に着目し、中心パルスハイトの時間変化を調べた。

壁キャリブレーションソース ^{55}Fe は、セグメント A とセグメント D の $ACTY > 767$ の領域にだけ X 線があたるようになっている。

まず、door close の ^{55}Fe Mn-K α の ACTY = 0 における中心パルスハイトを求めた。使用したデータは、door open 直前の 2005 年 08 月 11 日 (20050811_0710_0557) のものである。

ACTY = 0 の中心パルスハイトを求めるために、CCD を ACTY 方向に 4 つの領域に分け、それぞれの領域で Mn-K α の中心パルスハイトを求めた。(図 3.45)

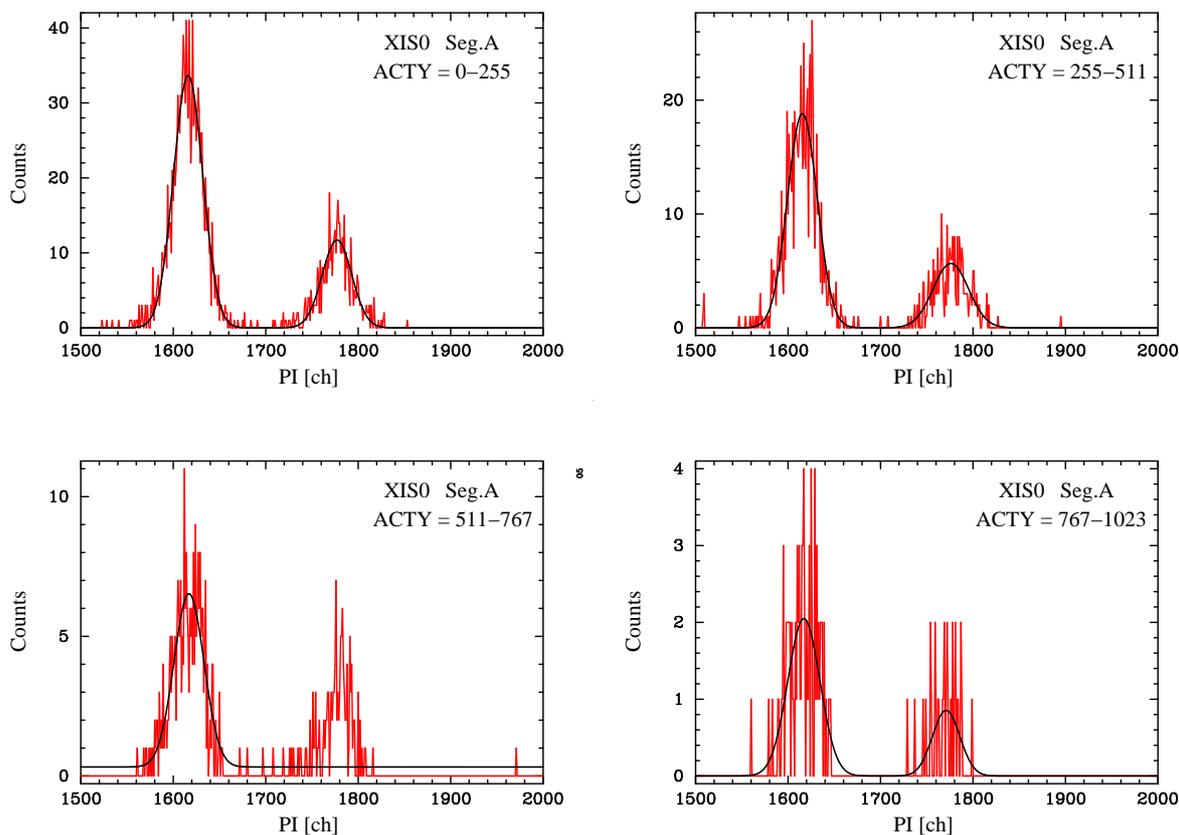


図 3.45: door close ACTY ごとの Mn-K α のフィッティング結果 グレード 02346

その結果をもとに横軸に ACTY、縦軸に中心パルスハイトをプロットさせたのが図 3.46～図 3.49 である。これを一次直線でフィッティングすることで転送回数とパルスハイトの関係を得ることができる。この一次直線の切片の値を ACTY = 0 の中心パルスハイトとした。

表 3.22 に、フィッティングにより求めた $ACTY = 0$ における Mn- $K\alpha$ の中心パルスハイトを示す。

sensor	Seg.A	Seg.B	Seg.C	Seg.D
XIS0	1615.9 ± 0.3	1617.1 ± 0.1	1616.9 ± 0.2	1619.1 ± 1.0
XIS1	1622.7 ± 0.1	1623.0 ± 0.1	1622.5 ± 0.1	1623.2 ± 0.2
XIS2	1616.5 ± 0.4	1616.1 ± 0.1	1617.7 ± 0.2	1613.5 ± 1.8
XIS3	1614.8 ± 0.3	1617.0 ± 0.1	1617.7 ± 0.2	1619.3 ± 1.5

表 3.22: $ACTY = 0$ における Mn- $K\alpha$ の中心パルスハイト

「Frame store 領域の CTI は劣化しない」という仮定のもと、表 3.22 の結果を基準とする。つまりここで求めた $ACTY = 0$ における Mn- $K\alpha$ の中心パルスハイトは、CTI の影響を全く受けていないと考える。これを用い、軌道上での壁キャリブレーションソース Mn- $K\alpha$ の中心パルスハイトの時間変化を追い、トラップにとらえられる電荷量を推定する。

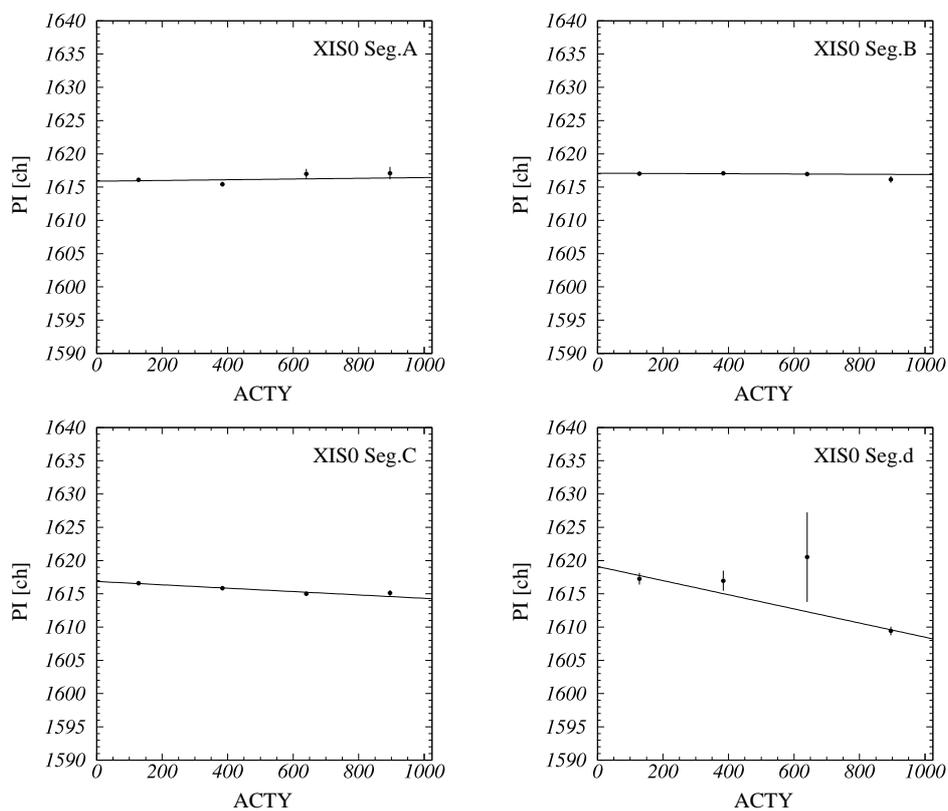


図 3.46: door close ACTY による Mn-K α の変化 XIS0 グレード 02346, 左上: セグメント A, 右上:セグメント B, 左下:セグメント C, 右下:セグメント D

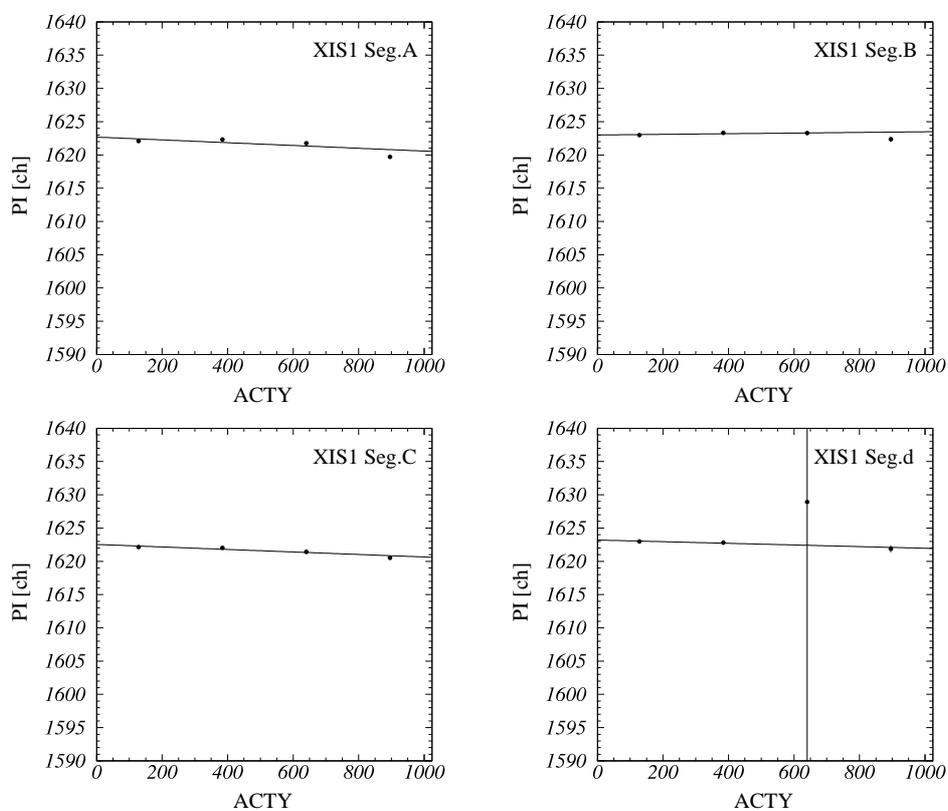


図 3.47: door close ACTY による Mn-K α の変化 XIS1 グレード 02346, 左上: セグメント A, 右上:セグメント B, 左下:セグメント C, 右下:セグメント D

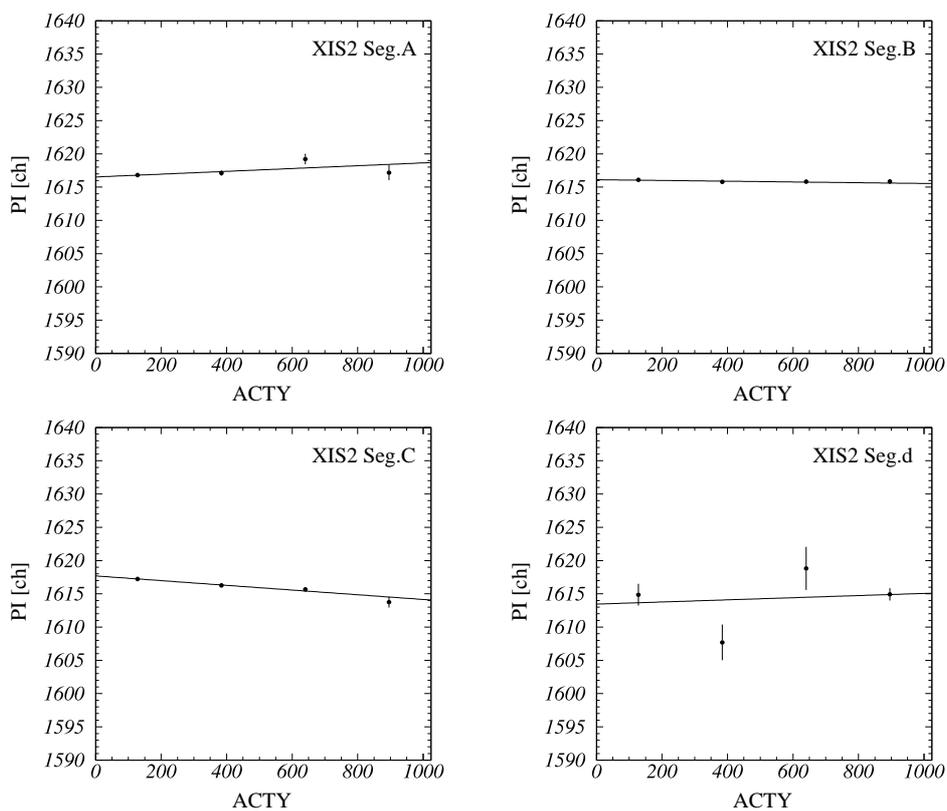


図 3.48: door close ACTY による Mn-K α の変化 XIS2 グレード 02346, 左上: セグメント A, 右上:セグメント B, 左下:セグメント C, 右下:セグメント D

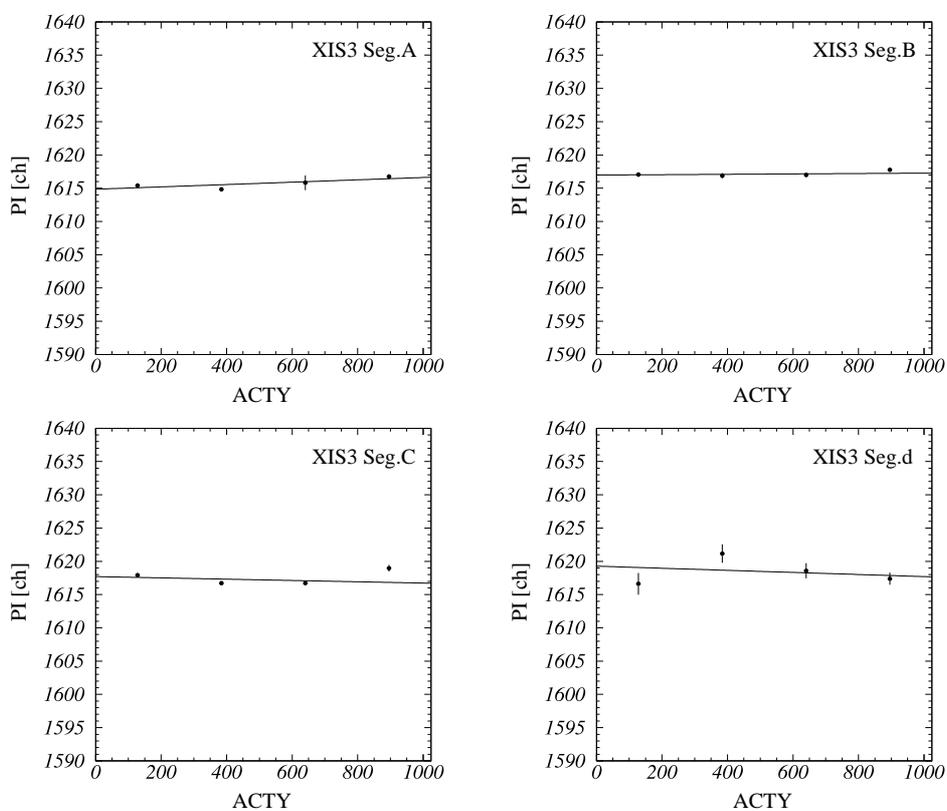


図 3.49: door close ACTY による Mn-K α の変化 XIS3 グレード 02346, 左上: セグメント A, 右上:セグメント B, 左下:セグメント C, 右下:セグメント D

中心パルスハイトの時間変化をみるために今回 rev0.3 のデータ (8月:door open → 12月末) を用いた。壁キャリブレーションソースが当たっているセグメント A とセグメント D の ACTY = 767 – 1023 の領域でスペクトルを作りフィッティングした。(図 3.51)

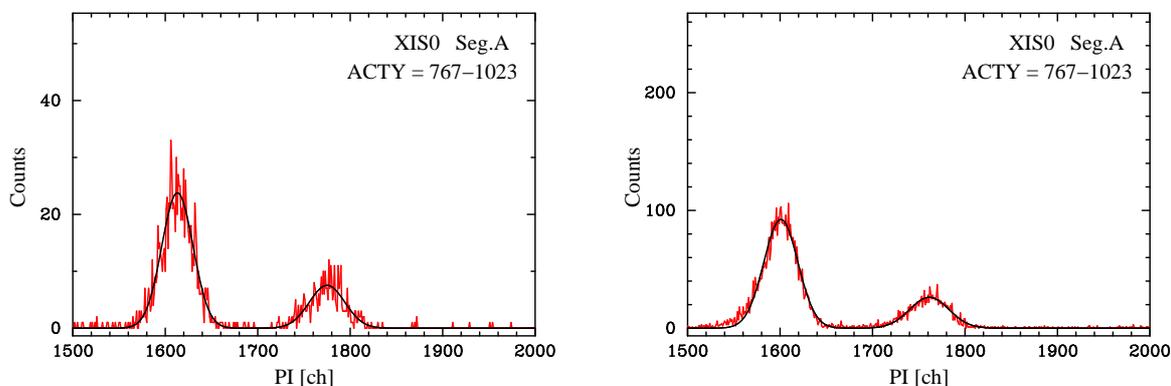


図 3.50: 壁キャリブレーションソース Mn-K α のフィッティング結果。左: 2005 年 8 月 20 日、右: 2005 年 12 月 30 日。

ここでは単一のガウシアンでフィッティングしている。しかし実際には、XIS のスペクトルは単一のガウシアンでフィッティングできるものではなく、レスポンスを考慮しなければならない。そこでこの方法で正しく中心パルスハイトを求めているのかを確かめるために、8月20日と12月30日のデータ(今回使用したデータのうち、始めのデータと最後のデータ)についてレスポンスを考慮したフィッティングを行なった。その結果を以下に示す。(図 3.51, 表 3.23,3.24)

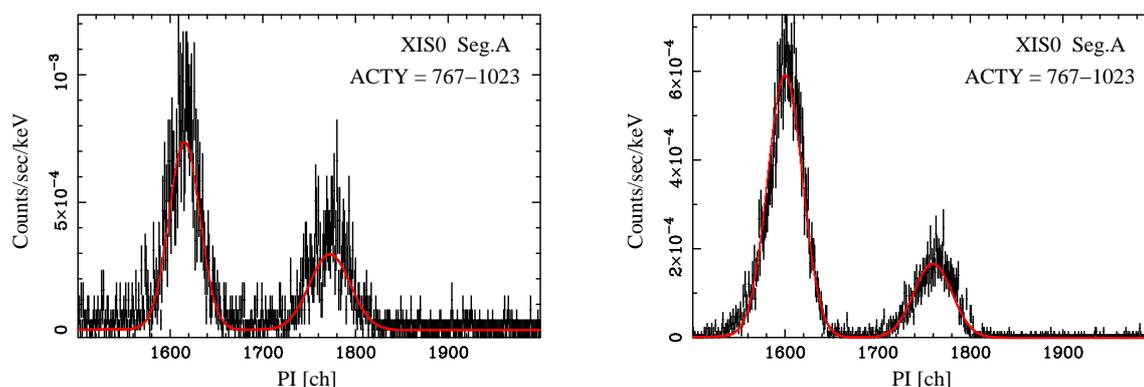


図 3.51: レスポンスを考慮したフィッティング結果。左: 2005 年 8 月 20 日、右: 2005 年 12 月 30 日。

表 3.23,3.24 から一部を除き誤差の範囲で一致しているといえる。また、不一致であるものについても、大きくて 0.2% の不一致である。つまり、ガウシアンでのフィッティングから求めた中心パルスハイトでも大きな間違いはないと考えられる。以下の解析では、ガウシアンでフィッティングすることにする。

sensor	Segment	Mn-K α (ガウシアン)	Mn-K α (レスポンスを考慮)
XIS0	Seg.A	1614.0 \pm 0.4	1616.1+1.0-0.9
	Seg.D	1613.9 \pm 0.4	1615.5+0.6-1.0
XIS1	Seg.A	1609.6 \pm 0.3	1608.8+1.5-0.5
	Seg.D	1608.9 \pm 0.7	1608.2+2.0-2.0
XIS2	Seg.A	1613.0 \pm 0.3	1613.6+0.5-1.1
	Seg.D	1611.1 \pm 0.1	1612.7+0.4-0.4
XIS3	Seg.A	1615.1 \pm 0.4	1615.6+1.1-0.7
	Seg.D	1613.4 \pm 0.6	1615.0+1.7-1.4

表 3.23: 2005 年 8 月 20 日のフィッティング結果の比較。

sensor	Segment	Mn-K α (ガウシアン)	Mn-K α (レスポンスを考慮)
XIS0	Seg.A	1600.9 \pm 0.2	1601.1+0.6-0.6
	Seg.D	1600.8 \pm 0.2	1601.7+0.4-0.8
XIS1	Seg.A	1595.8 \pm 0.2	1594.4+0.5-0.5
	Seg.D	1597.8 \pm 0.3	1597.0+0.6-1.2
XIS2	Seg.A	1600.2 \pm 0.2	1600.0+0.8-0.4
	Seg.D	1598.3 \pm 0.2	1602.6+1.0-0.5
XIS3	Seg.A	1601.2 \pm 0.2	1601.2+0.6-0.5
	Seg.D	1602.0 \pm 0.3	1602.6+1.0-0.5

表 3.24: 2005 年 12 月 30 日のフィッティング結果の比較。

また、今回使用したデータは rev0.3 のデータ (8月:door open \rightarrow 12月末) であるが、解析するにあたってデータを選別した。

統計の悪いデータでは、満足なフィッティング結果を得ることができない。そのため、フィッティングした結果が、Mn_K α の中心パルスハイト [ch] に相当する 1615ch から \pm 40 の範囲 (1575-1655ch) のものの中から、イベント数が 100 カウントを越えるもののみを以下の解析に使用した。

図 3.52 に各センサー毎の中心パルスハイト、図 3.53 に各センサー毎のエネルギー分解能の時間変化の様子を示す。横軸の時間 [day] は SUZAKU 衛星が打ち上げられた 2005 年 7 月 10 日からの経過日数 (8月:dooropen \rightarrow 12月末) である。縦軸は、Mn_K α の中心パルスハイト [ch] である。

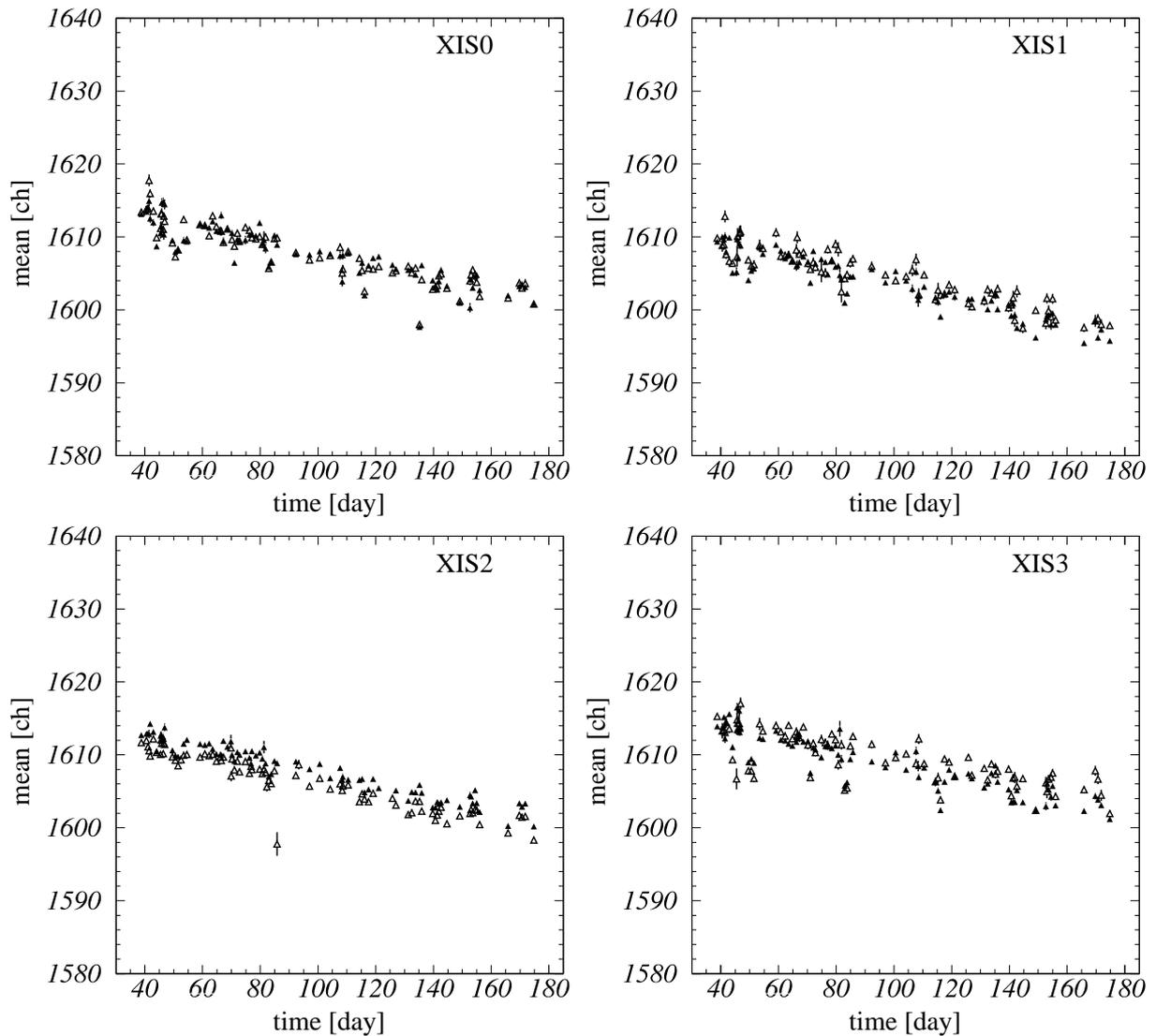


図 3.52: ^{55}Fe Mn-K α パルスハイト グレード 02346, ▲ : セグメント A △ : セグメント D, 左上: XIS0, 右上: XIS1, 左下: XIS2, 右下: XIS3

図 3.52 より時間とともに中心パルスハイトが顕著に小さくなっているのが分かる。またそれと同時に、図 3.53 からはエネルギー分解能の劣化も確認できる。CTIにより電荷が失われていることはこの結果から明らかである。これらの電荷損失を正しく見積り、補正することが必要になる。補正の方法を示す。

1. 図 3.52 より経過日数-パルスハイト関係を求める。
2. 「Frame store 領域の CTI は劣化しない」という仮定をおく。
3. door close の ^{55}Fe Mn-K α ACTY = 0 の中心パルスハイトを基準にとり、各時間における ΔPI を求める。
4. 式 (4.4) より各時間の CTI_NORM を求める。
5. 式 (4.2) を用いてパルスハイトを補正する。

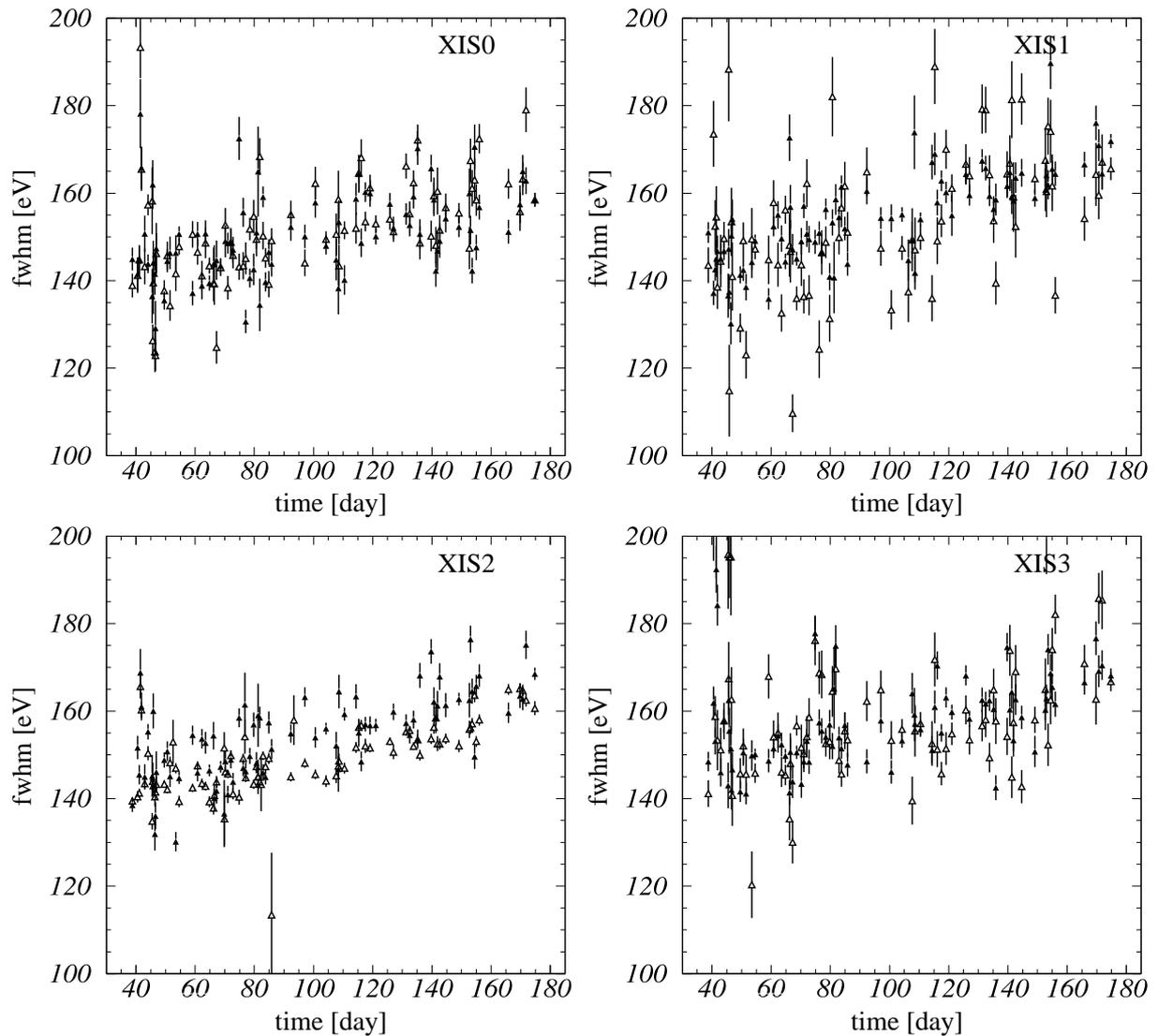


図 3.53: ^{55}Fe Mn-K α エネルギー分解能 グレード 02346, ▲: セグメント A △: セグメント D, 左上: XIS0, 右上: XIS1, 左下: XIS2, 右下: XIS3

時間経過とともにどのようにパルスハイトが変化していくのかを図 3.52 より求める。今回は各セグメントごとに一次直線でフィッティングすることでこの変化の様子を求めた。

図 3.54, 図 3.55 にフィッティングの結果を示す。横軸は SUZAKU 衛星打ち上げの 2005 年 7 月 10 日からの経過日数 [day]、縦軸はパルスハイトである。

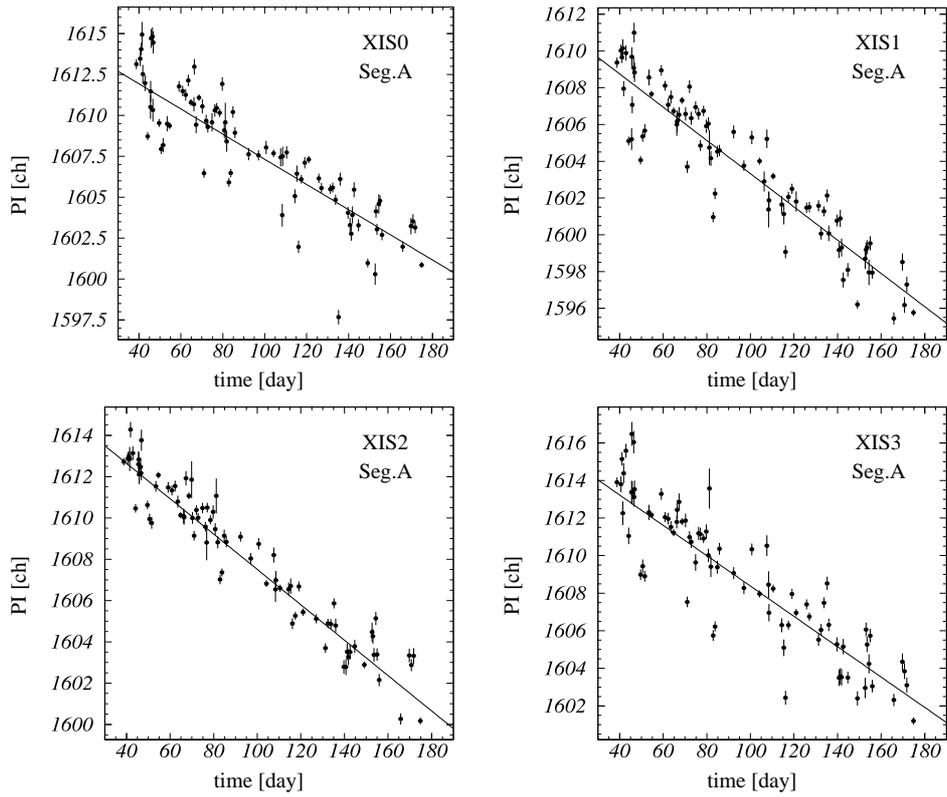


図 3.54: グレード 02346, セグメント A, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

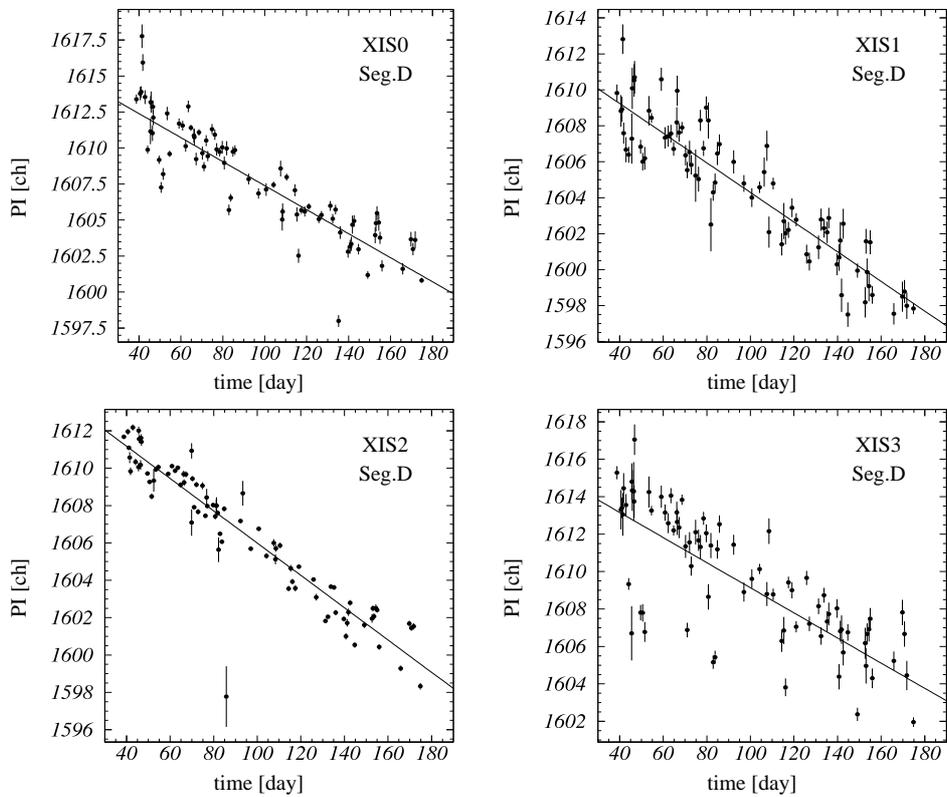


図 3.55: グレード 02346, セグメント D, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

結果を表 3.25 にまとめる。

sensor	segment	傾き (ch/day)	切片 (ch)
XIS0	Seg.A	$-0.769 \times 10^{-1} \pm 0.009 \times 10^{-1}$	1615.0 ± 0.1
	Seg.D	$-0.834 \times 10^{-1} \pm 0.010 \times 10^{-1}$	1615.7 ± 0.1
XIS1	Seg.A	$-0.904 \times 10^{-1} \pm 0.009 \times 10^{-1}$	1612.4 ± 0.1
	Seg.D	$-0.825 \times 10^{-1} \pm 0.016 \times 10^{-1}$	1612.5 ± 0.2
XIS2	Seg.A	$-0.856 \times 10^{-1} \pm 0.007 \times 10^{-1}$	1616.1 ± 0.1
	Seg.D	$-0.864 \times 10^{-1} \pm 0.004 \times 10^{-1}$	1614.6 ± 0.1
XIS3	Seg.A	$-0.807 \times 10^{-1} \pm 0.009 \times 10^{-1}$	1616.5 ± 0.1
	Seg.D	$-0.671 \times 10^{-1} \pm 0.014 \times 10^{-1}$	1615.8 ± 0.1

表 3.25: 中心パルスハイトの時間変化 一次直線でのフィッティング結果

この結果より、ある経過時間でのパルスハイトを求めることができる。これを用いることで、door close の $^{55}\text{Fe Mn-K}_\alpha$ の $\text{ACTY} = 0$ における中心パルスハイトを基準とした、パルスハイトの変化量 ΔPI を求めることができる。(式 4.5)

$$\Delta\text{PI} = (\text{基準のパルスハイト}) - (\text{ある時間における PI}) \quad (4.5)$$

求めた ΔPI と式 (4.4) を用いれば、CTI 補正するために必要な CTI_NORM を得ることができる。

キャリブレーションソースがない Seg.B と Seg.C に関しては、CTI が Seg.A と Seg.D の平均値をとるように求めた。

このようにして求められた CTI_NORM は経過時間の一次関数で表すことができる。結果を表 3.26 に示す。

sensor	segment	傾き	切片
XIS0	Seg.A	2.1566×10^{-6}	2.4412×10^{-5}
	Seg.B	2.2501×10^{-6}	5.9086×10^{-5}
	Seg.C	2.2500×10^{-6}	5.9082×10^{-5}
	Seg.D	2.3443×10^{-6}	9.3809×10^{-5}
XIS1	Seg.A	2.5633×10^{-6}	2.8637×10^{-4}
	Seg.B	2.4500×10^{-6}	2.9203×10^{-4}
	Seg.C	2.4497×10^{-6}	2.9199×10^{-4}
	Seg.D	2.3367×10^{-6}	2.9769×10^{-4}
XIS2	Seg.A	2.4007×10^{-6}	1.0376×10^{-5}
	Seg.B	2.4122×10^{-6}	-1.0469×10^{-5}
	Seg.C	2.4134×10^{-6}	-1.0474×10^{-5}
	Seg.D	2.4221×10^{-6}	-3.1287×10^{-5}
XIS3	Seg.A	2.2583×10^{-6}	-4.7813×10^{-5}
	Seg.B	2.0706×10^{-6}	2.4460×10^{-5}
	Seg.C	2.0710×10^{-6}	2.4465×10^{-5}
	Seg.D	1.8826×10^{-6}	9.6834×10^{-5}

表 3.26: CTI-NORM

CTI 補正は各ピクセル (PHAS) について補正するものである。そのため、グレード 02346 を選択したイベントから求めた CTI_NORM は正しいと言えない。各ピクセルについて正しい CTI 補正のパラメータを求めるためには、シングルピクセルイベントであるグレード 0 のみのイベントから ΔPI を求める必要がある。

グレード 02346 の時と同様に、door close のグレード 0 のみのデータから $^{55}\text{Fe Mn-K}\alpha$ の ACTY = 0 における中心パルスハイトの値を求める。(図 3.56)

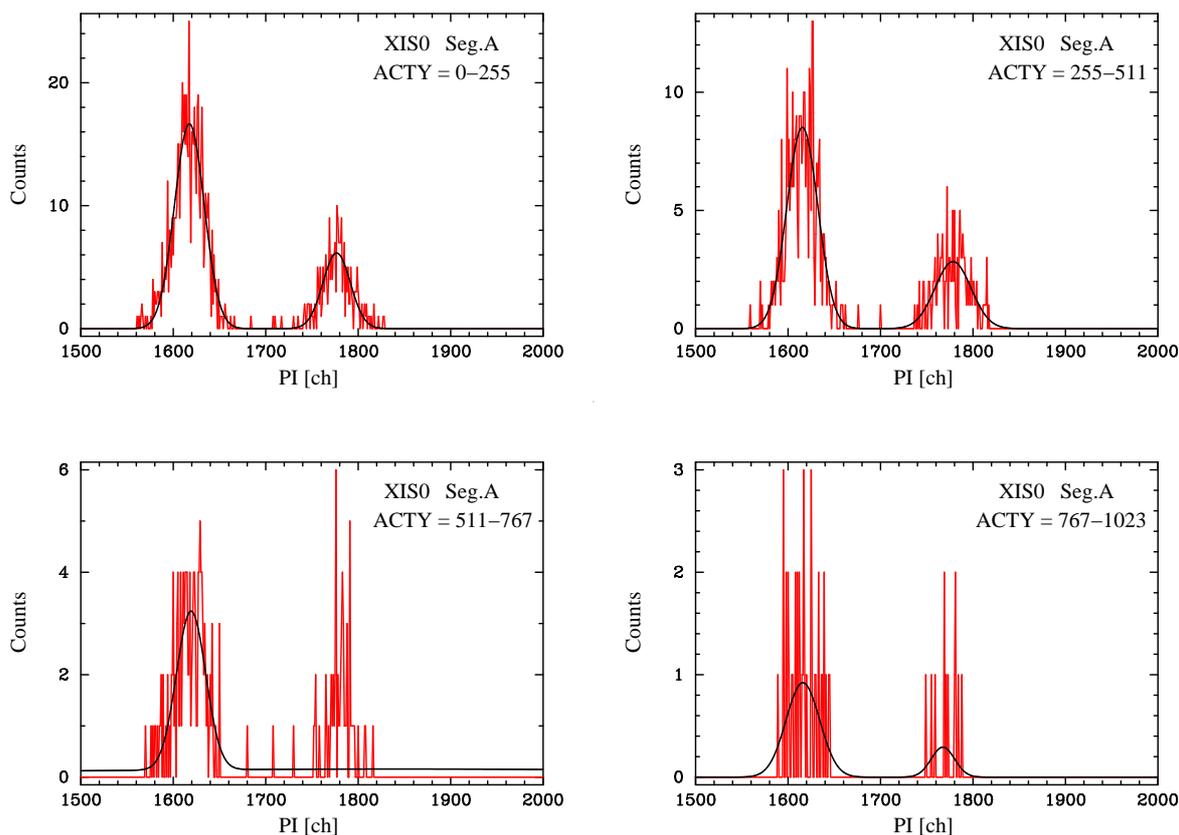


図 3.56: door close ACTY ごとの Mn-K α のフィッティング結果 グレード 02346

その結果をもとに横軸に ACTY、縦軸に中心パルスハイトをプロットさせたのが図 3.57～図 3.60 である。これを一次直線でフィッティングすることで転送回数とパルスハイトの関係を得ることができる。この一次直線の切片の値を ACTY = 0 の中心パルスハイトとした。

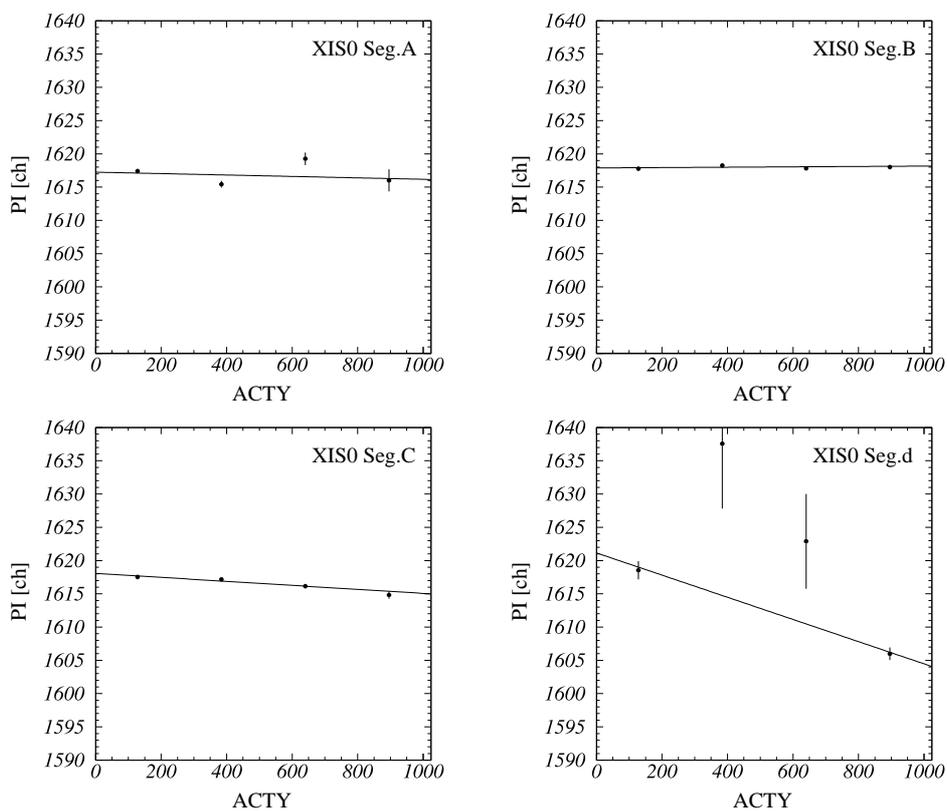


図 3.57: door close ACTY による Mn-K α の変化 XIS0 グレード 0, 左上: セグメント A, 右上: セグメント B, 左下: セグメント C, 右下: セグメント D

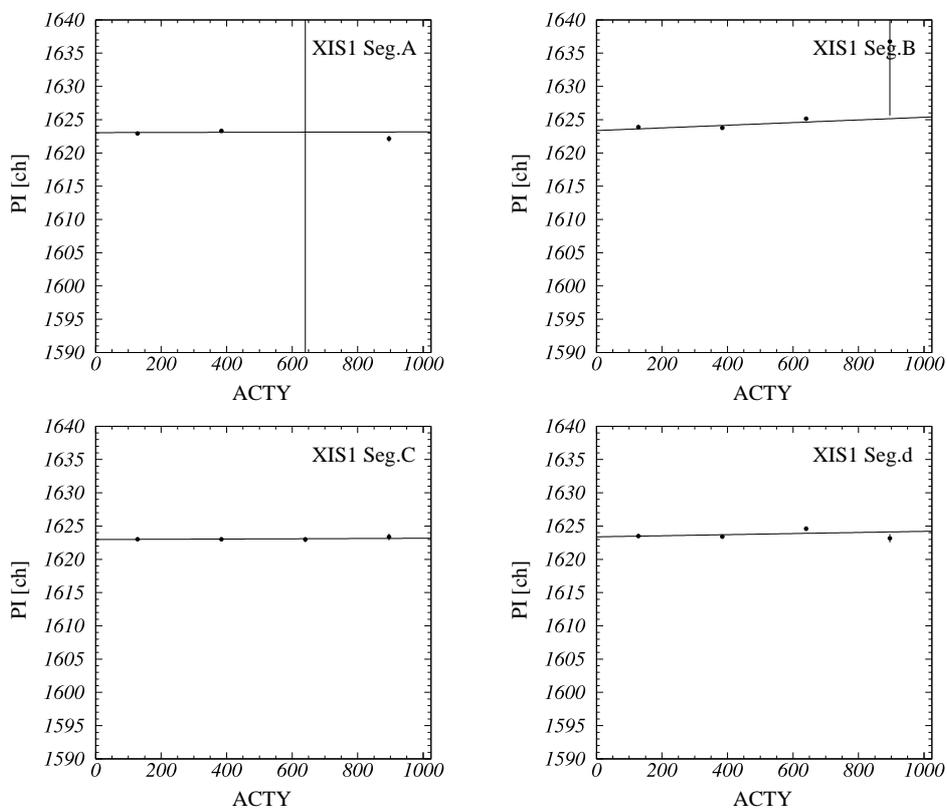


図 3.58: door close ACTY による Mn-K α の変化 XIS1 グレード 0, 左上: セグメント A, 右上: セグメント B, 左下: セグメント C, 右下: セグメント D

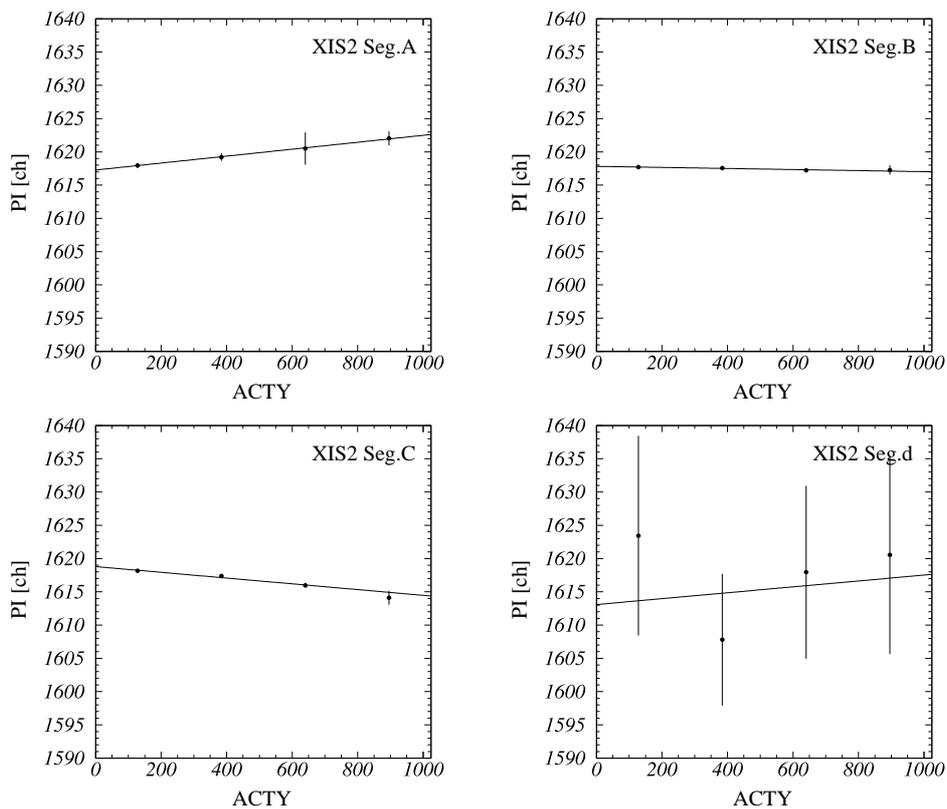


図 3.59: door close ACTY による Mn-K α の変化 XIS2 グレード 0, 左上: セグメント A, 右上:セグメント B, 左下:セグメント C, 右下:セグメント D

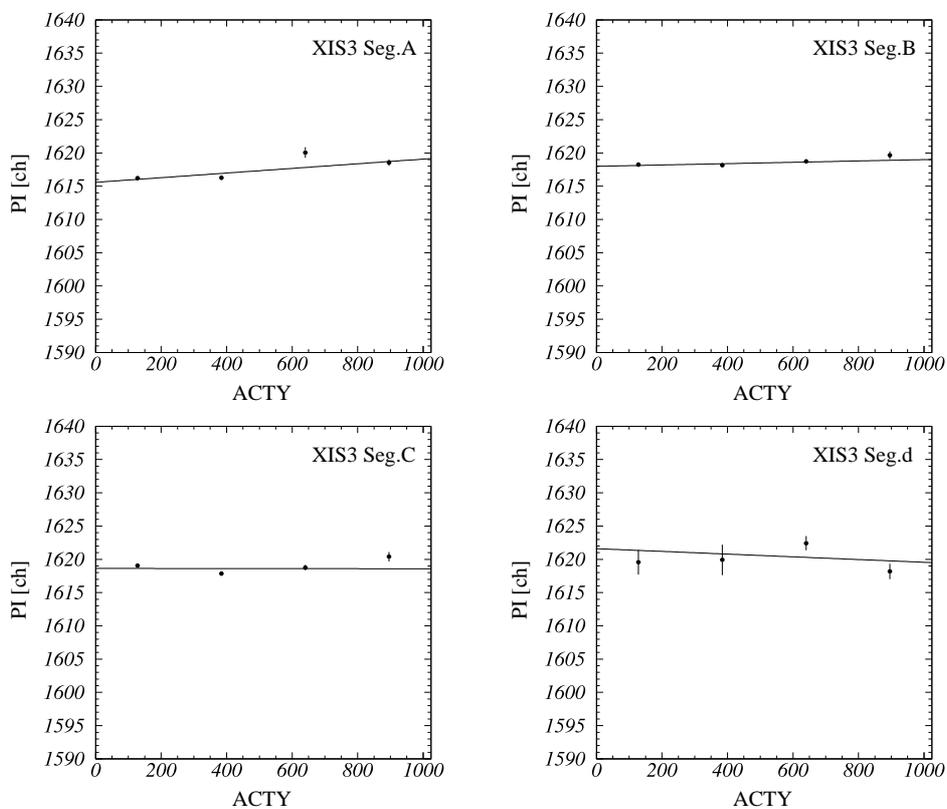


図 3.60: door close ACTY による Mn-K α の変化 XIS3 グレード 0, 左上: セグメント A, 右上:セグメント B, 左下:セグメント C, 右下:セグメント D

各センサーごとの中心パルスハイトの値を表 3.27 に示す。

sensor	Seg.A	Seg.B	Seg.C	Seg.D
XIS0	1617.2 ± 0.4	1617.9 ± 0.1	1618.1 ± 0.2	1621.1 ± 1.6
XIS1	1623.1 ± 0.2	1623.4 ± 0.1	1623.0 ± 0.2	1623.4 ± 0.3
XIS2	1617.3 ± 0.5	1617.8 ± 0.2	1618.8 ± 0.3	1606.1 ± 3.3
XIS3	1615.6 ± 0.3	1618.0 ± 0.2	1618.6 ± 0.3	1621.6 ± 1.9

表 3.27: ACTY = 0 における Mn-K α の中心パルスハイト

rev0.3 のデータ (8月:door open →12 月末) のキャリブレーションデータについてグレード 0 のみを選択し、前と同様に Mn - K α の中心パルスハイトとエネルギー分解能の時間変化を調べた。グレード 02346 の時と同様に、フィッティングした結果が、Mn_K α の中心パルスハイト [ch] に相当する 1615ch から ±40 の範囲 (1575-1655ch) のものの中から、イベント数が 100 カウントを越えるもののみを以下の解析に使用した。結果を図 3.61、3.62 に示す。

図 3.61 よりパルスハイトの時間変化を求めた。図 3.63, 図 3.64 にフィッティングの結果を示す。横軸は SUZAKU 衛星打ち上げの 2005 年 7 月 10 日からの経過日数 [day]、縦軸はパルスハイトである。

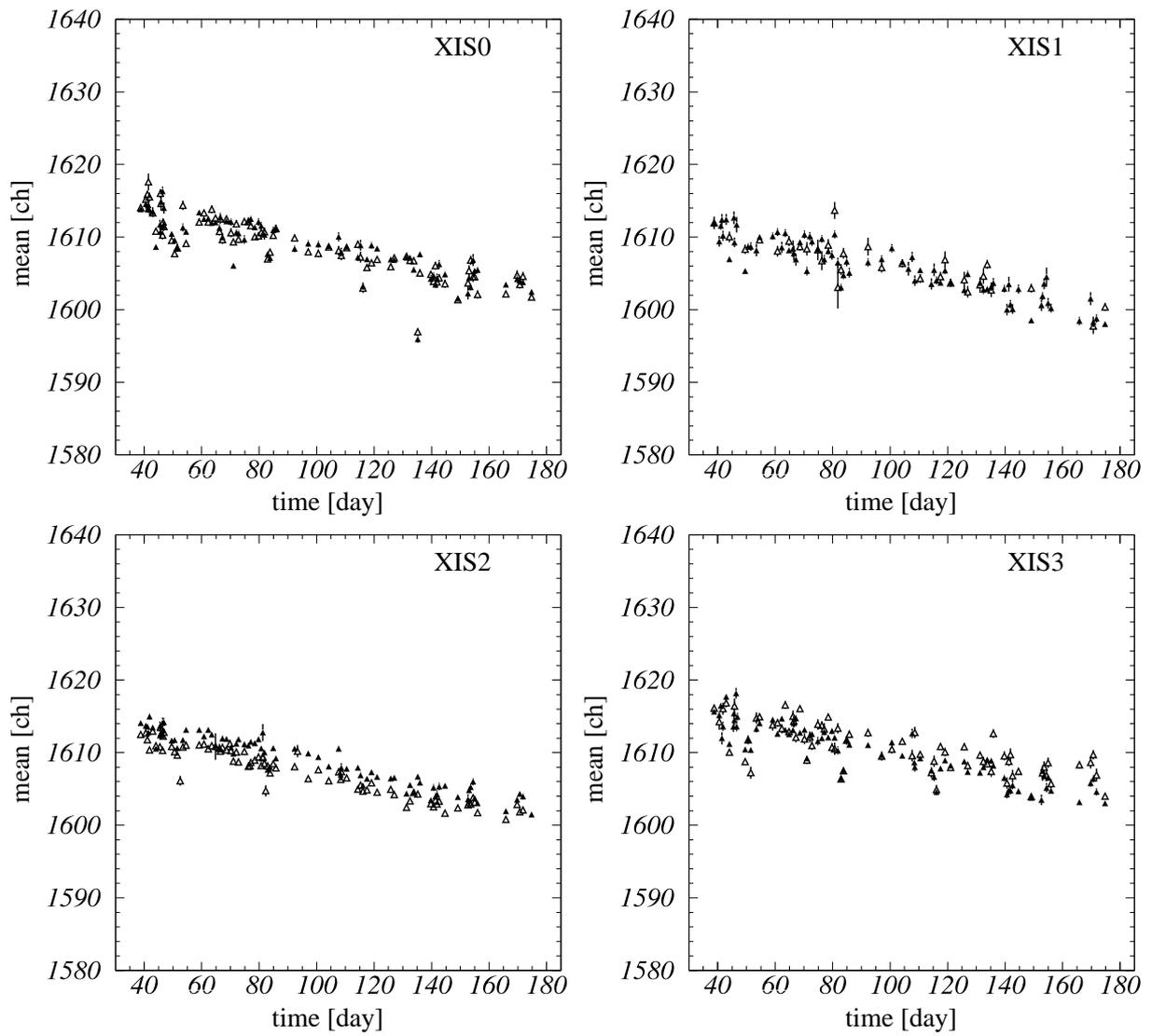


図 3.61: ^{55}Fe Mn-K α パルスハイト グレード 0, ▲: セグメント A △: セグメント D, 左上: XIS0, 右上: XIS1, 左下: XIS2, 右下: XIS3

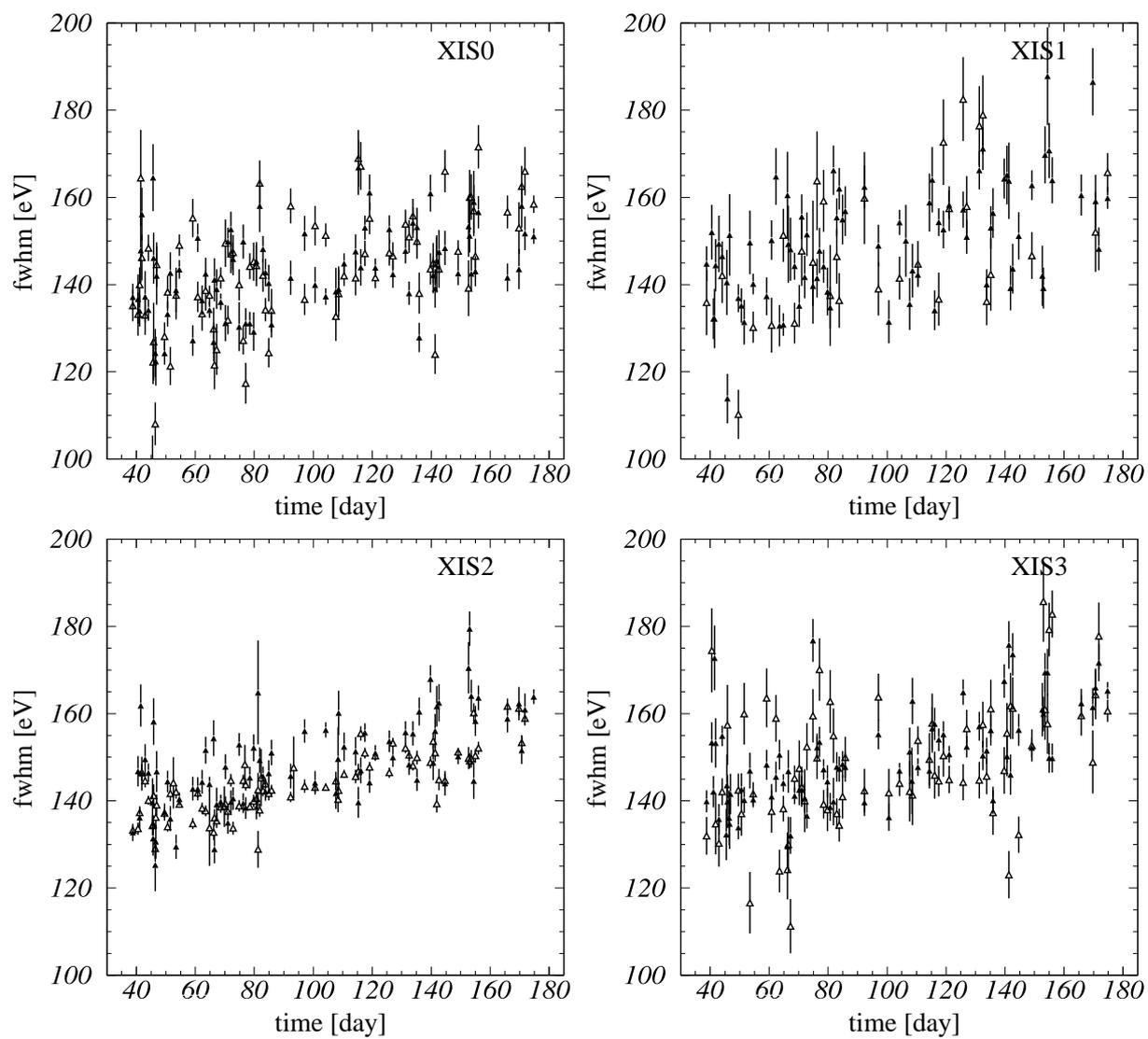


図 3.62: ^{55}Fe Mn-K α エネルギー分解能 グレード 0, \blacktriangle : セグメント A \triangle : セグメント D, 左上: XIS0, 右上: XIS1, 左下: XIS2, 右下: XIS3

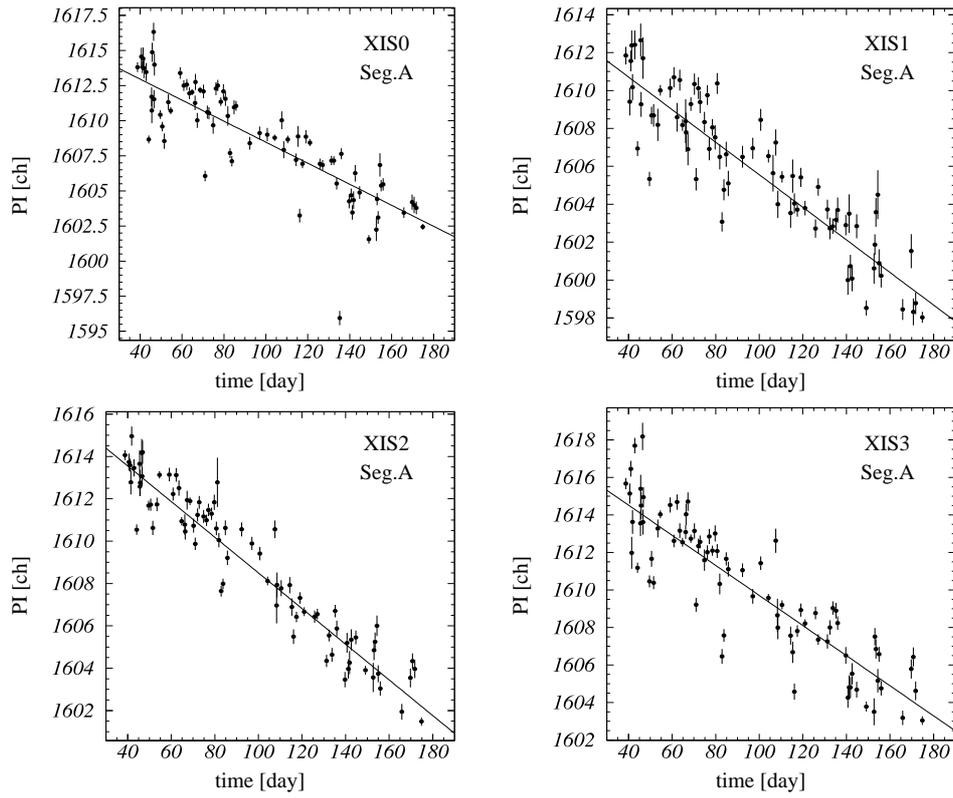


図 3.63: グレード0, セグメント A, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

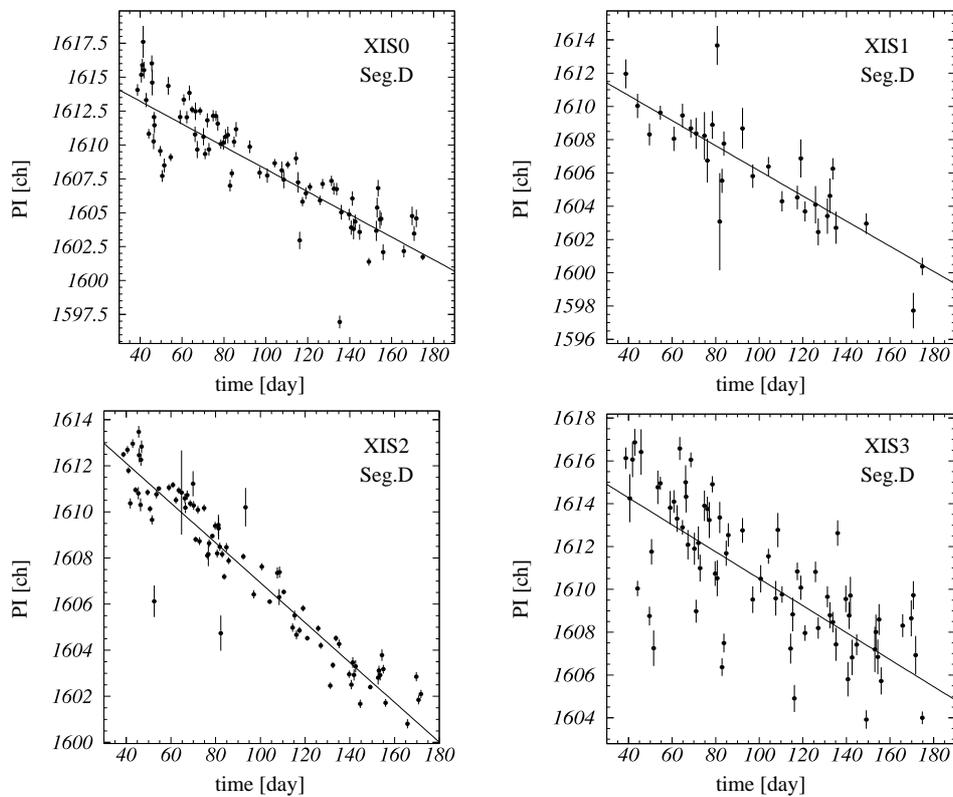


図 3.64: グレード0, セグメント D, 左上:XIS0, 右上:XIS1, 左下:XIS2, 右下:XIS3

結果を表 3.28 にまとめる。

sensor	segment	傾き (ch/day)	切片 (ch)
XIS0	Seg.A	$-0.749 \times 10^{-1} \pm 0.011 \times 10^{-1}$	1616.0 ± 0.1
	Seg.D	$-0.835 \times 10^{-1} \pm 0.012 \times 10^{-1}$	1616.6 ± 0.1
XIS1	Seg.A	$-0.859 \times 10^{-1} \pm 0.015 \times 10^{-1}$	1614.1 ± 0.2
	Seg.D	$-0.755 \times 10^{-1} \pm 0.035 \times 10^{-1}$	1613.7 ± 0.4
XIS2	Seg.A	$-0.842 \times 10^{-1} \pm 0.009 \times 10^{-1}$	1616.9 ± 0.1
	Seg.D	$-0.864 \times 10^{-1} \pm 0.005 \times 10^{-1}$	1615.6 ± 0.1
XIS3	Seg.A	$-0.802 \times 10^{-1} \pm 0.010 \times 10^{-1}$	1617.7 ± 0.1
	Seg.D	$-0.630 \times 10^{-1} \pm 0.016 \times 10^{-1}$	1616.8 ± 0.2

表 3.28: 中心パルスハイトの時間変化 一次直線でのフィッティング結果

表 3.28 の結果から、ある時間での中心パルスハイトの値を得ることができる。また、式 4.5 を用いると、各々の時間における ΔPI を求めることができる。

ここで得られた ΔPI と式 4.4 を用いれば、CTI 補正するために必要な CTI_NORM を得ることができる。

キャリブレーションソースがない Seg.B と Seg.C に関しては、CTI が Seg.A と Seg.D の平均値をとるように求めた。

このようにして求められた CTI_NORM は経過時間の一次関数で表すことができる。結果を表 3.29 に示す。

sensor	segment	傾き	切片
XIS0	Seg.A	2.0962×10^{-6}	-3.3339×10^{-6}
	Seg.B	2.2197×10^{-6}	3.2688×10^{-5}
	Seg.C	2.2195×10^{-6}	3.2686×10^{-5}
	Seg.D	2.3439×10^{-6}	6.8754×10^{-5}
XIS1	Seg.A	2.4298×10^{-6}	2.3880×10^{-4}
	Seg.B	2.2825×10^{-6}	2.5147×10^{-4}
	Seg.C	2.2822×10^{-6}	2.5143×10^{-4}
	Seg.D	2.1352×10^{-6}	2.6414×10^{-4}
XIS2	Seg.A	2.3591×10^{-6}	-1.1807×10^{-5}
	Seg.B	2.3900×10^{-6}	-3.5434×10^{-5}
	Seg.C	2.3912×10^{-6}	-3.5452×10^{-5}
	Seg.D	2.4192×10^{-6}	-5.9016×10^{-5}
XIS3	Seg.A	2.2410×10^{-6}	-8.1037×10^{-5}
	Seg.B	2.0027×10^{-6}	-6.0457×10^{-6}
	Seg.C	2.0032×10^{-6}	-6.0470×10^{-6}
	Seg.D	1.7642×10^{-6}	6.9050×10^{-5}

表 3.29: CTI-NORM グレード 0

表 3.29 の結果を用い CTI 補正することができるようになった。

3.5 CTI補正の検証

ここまで記した電荷漏れ補正と、CTI補正を実際の観測データに適応して、エネルギースケールが正しく補正できているか検証する。ここでは高エネルギー側の輝線がXISの視野の広い範囲で検出される天体として銀河中心を、低エネルギー側の輝線がXISの視野の広い範囲で検出される天体としてCyg Loopを使用する。それぞれ、2005年9月と11月にすざく衛星による観測がなされている。

なお、CTI補正のパラメータとしては、グレード0を使用してきめた値を用いた。ただし、CTI補正の基準として使用したDoor Closeの基準パルスハイトは表3.27ではなく、表3.22の値を用いている。

3.5.1 銀河中心

銀河中心は2方向(src1, src2)を2回ずつ観測している。src1は2005/09/23, 2005/09/30, src2は2005/09/24, 2005/09/29。これらの観測を全て加算しCTI補正を調べた。

領域は、 $ACTY < 256$, $256 \leq ACTY < 512$, $512 \leq ACTY < 768$, $768 \leq ACTY$ で区切り、セグメントごとには分けていない。図ではこれらの領域をそれぞれ、 $(ACTY/256) = 0, 1, 2, 3$ で表した。キャルソースのあたる領域は除いたがバックグラウンドは引いていない。フィッティングは1.6 - 5.0 keVと6.0 - 8.5 keVのエネルギー領域でそれぞれ行い、Koyama et al. (2006, internal report)と同様に連続成分にガウシアンを入れた。また、領域を区切ると強度が低くなるため、各元素の量はKoyama et al.の値で固定した。

図3.65, 3.66にそれぞれ低エネルギー側と高エネルギー側のスペクトルフィットの例を示した。ともに検出器はXIS0で $ACTY < 256$ のスペクトルである。

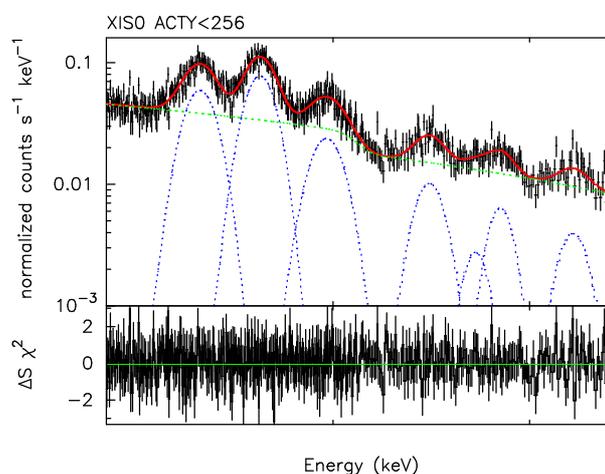
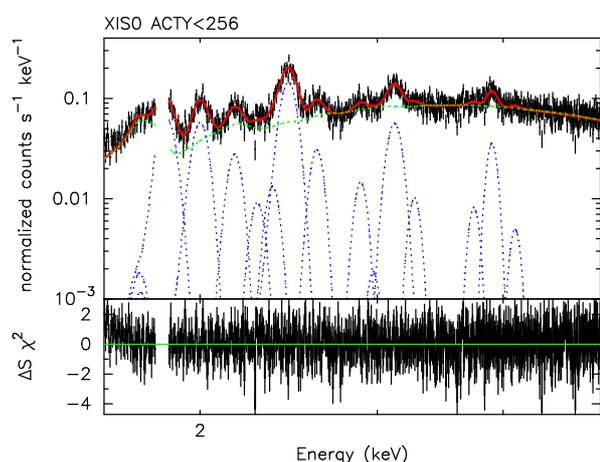


図 3.65: CTI 補正後の He-like S $K\alpha$ ピーク中心エネルギーの推移。XIS0: 黒、XIS1: 赤、XIS2: 緑、XIS3: 青、で示した。

図 3.66: CTI 補正後の He-like Fe $K\alpha$ ピーク中心エネルギーの推移。XIS0: 黒、XIS1: 赤、XIS2: 緑、XIS3: 青、で示した。

図 3.67, 3.68 が Koyama et al. 2006 から抜粋した CTI 補正前のピークエネルギーの推移、図 3.69, 3.70 が CTI 補正後のピークエネルギーの推移を示す。CTI 補正には G0 から求めたパラメータを使用した。

使用したデータは rev0.3 の cleaned event file で、バス名は
 GC_SRC1: ae20050923_0707_1105
 GC_SRC2: ae20050924_1416_1727
 GC_SRC2: ae20050929_0425_0429
 GC_SRC1: ae20050930_0741_0621
 である。

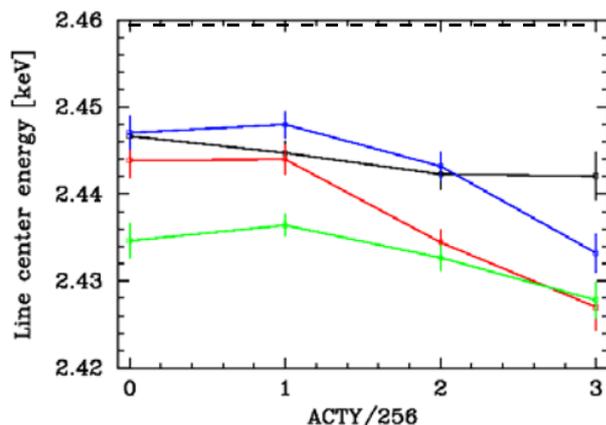


図 3.67: CTI 補正前の He-like S $K\alpha$ ピーク中心エネルギーの推移。XIS0: 黒、XIS1: 赤、XIS2: 緑、XIS3: 青、で示した。破線は XMM-Newton MOS1, MOS2 で決定された中心エネルギーを示す。

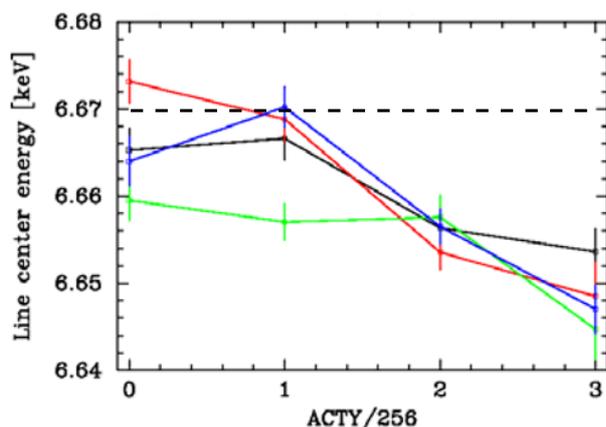


図 3.68: CTI 補正前の He-like Fe $K\alpha$ ピーク中心エネルギーの推移。XIS0: 黒、XIS1: 赤、XIS2: 緑、XIS3: 青、で示した。破線は XMM-Newton MOS1, MOS2 で決定された中心エネルギーを示す。

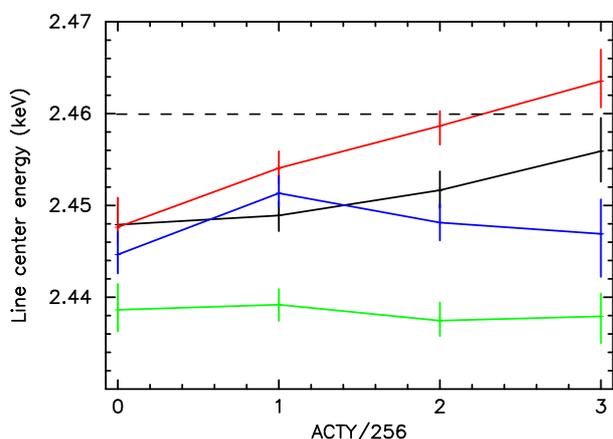


図 3.69: CTI 補正後の He-like S $K\alpha$ ピーク中心エネルギーの推移。XIS0: 黒、XIS1: 赤、XIS2: 緑、XIS3: 青、で示した。破線は XMM-Newton MOS1, MOS2 で決定された中心エネルギーを示す。

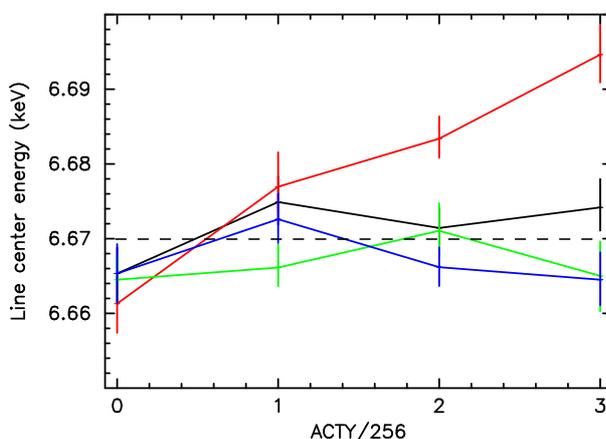


図 3.70: CTI 補正後の He-like Fe $K\alpha$ ピーク中心エネルギーの推移。XIS0: 黒、XIS1: 赤、XIS2: 緑、XIS3: 青、で示した。破線は XMM-Newton MOS1, MOS2 で決定されたの中心エネルギーを示す。

3.5.2 CygnusLoop 北東端

観測データは CygnusLoop の北東端の 4 観測である。観測日は 2005/11/23,24,29,30 だが、観測日時の近い、11/23、24 と、11/29、30 のデータをそれぞれ足し合わせた。使用したデータは、revision 0.3 の cleaned event file で、パス番号は以下のものである。パス番号:

Cygnus Loop pos1: ae20051123_1718_0455

Cygnus Loop pos2: ae20051124_0455_1614

Cygnus Loop pos2: ae20051129_1733_0539

Cygnus Loop pos2: ae20051130_0539_1823

BG(NEP): ae20050902_1430_1459

CTI 補正前と後のラインセンターエネルギーを、O7, O8, Ne9 について調べた。

領域は、 $ACTY < 256$, $256 \leq ACTY < 512$, $512 \leq ACTY < 768$, $768 \leq ACTY$ で区切り、セグメントごとには分けていない。0.5 - 1.0 keV のエネルギーバンドのスペクトルを星間吸収モデル、連続成分モデルとガウシアンモデル7つでフィットした(ただし、Appendix A の結果を使い付着炭素の吸収を導入している)。図 3.71 にスペクトルフィットの一例を示した。

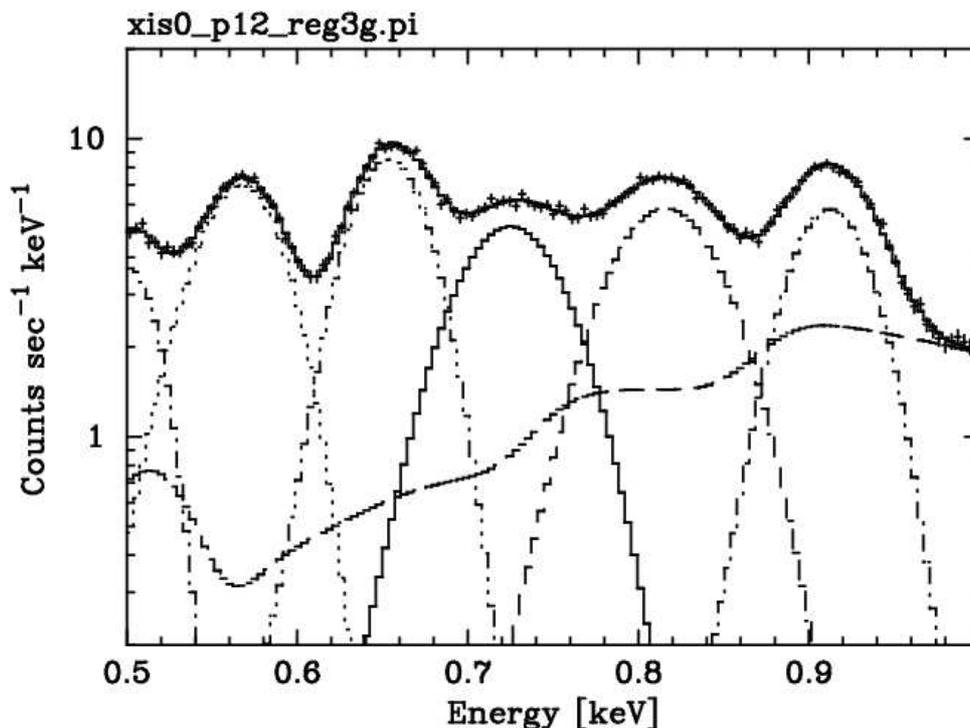


図 3.71: XIS0 の $512 \leq ACTY < 768$ の領域からのスペクトル。

図 3.72 が 11/23、24 の足し合わせデータから求めた、CTI コレクション前のラインセンターエネルギー、図 3.73 が 11/29、30 の足し合わせデータから求めた、CTI コレクション前のラインセンターエネルギーを示す。図 3.74 が 11/23、24 の足し合わせデータから求めた、CTI コレクション後のラインセンターエネルギー、図 3.75 が 11/29、30 の足し合わせデータから求めた、CTI コレクション後のラインセンターエネルギーを示す。CTI 補正には G0 から求めたパラメータを使用した。

before CTI correction (POS1+2)

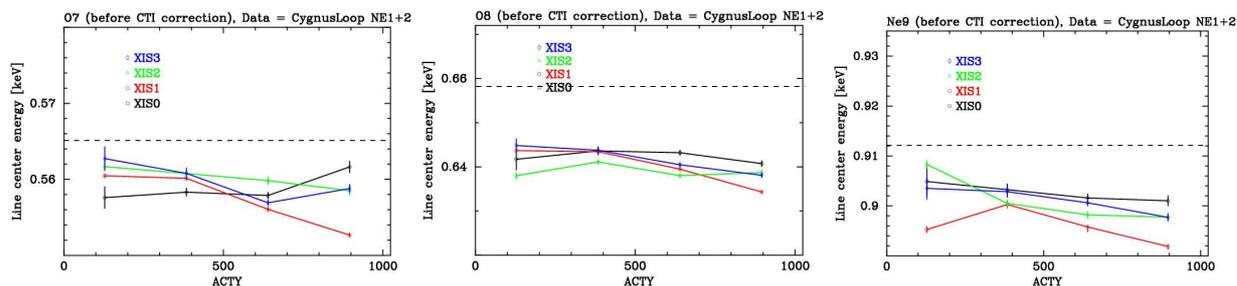


図 3.72: CTI 補正前のピーク中心エネルギーの推移。XIS0: 黒、XIS1: 赤、XIS2: 緑、XIS3: 青、で示した。黒の点線は、XMM-Newton 衛星で測定したラインセンターエネルギー。

before CTI correction (POS3+4)

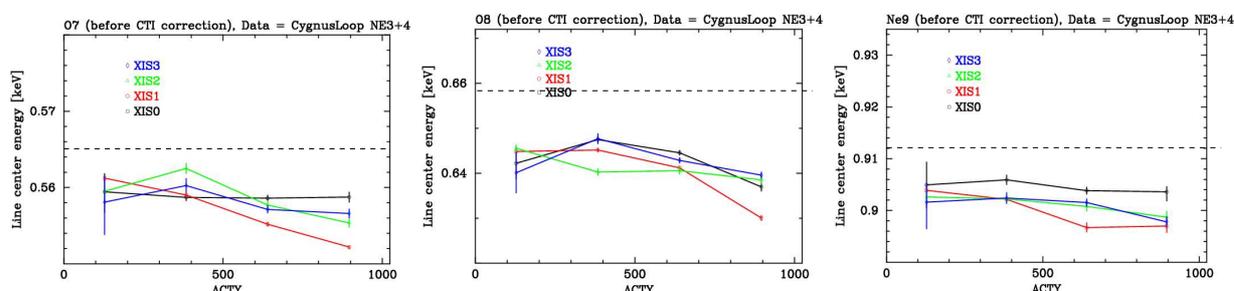


図 3.73: CTI 補正前のピーク中心エネルギーの推移。XIS0: 黒、XIS1: 赤、XIS2: 緑、XIS3: 青、で示した。黒の点線は、XMM-Newton 衛星で測定したラインセンターエネルギー。

3.5.3 CTI 補正の精度について

銀河中心、Cyg Loop に関して CTI 補正を適応した結果、以下のことがわかった。

1. CTI 補正前では最大 30eV 程度、中心エネルギーが低く評価されていたのが、CTI 補正によって全般的にずれが小さくなった。
2. XIS1 (BI) に関しては、特に読みだし口から遠い領域で補正が過剰に働いている。
3. 低エネルギー側のラインに関しては、読みだし口から遠い領域では補正が適当に働いているものの、読み出し口に近い領域では不足している。

CTI 補正は、時間、CCD の位置 (縦方向、横方向)、エネルギーの関数であることを考えると、より多くの観測時期のデータで検証する必要がある。例えば、蓄積領域での電荷転送効率を考慮する必要があるかもしれない。

ただし、XIS1 で過剰補正される件に関してはひとつの原因がわかっている。これは、今回 Door Close のデータとして用いた 20050811-20050813 のデータは、特別に CCD の温度を -80degC に設定して取得したもので、この場合 BI-CCD (XIS1) では MnK α ピークの波高値が、通常の -90degC のデータより 5-7ADU 高くでる。このようなデータを基準にしたため、CTI 補正値が overestimate

after CTI correction (POS1+2)

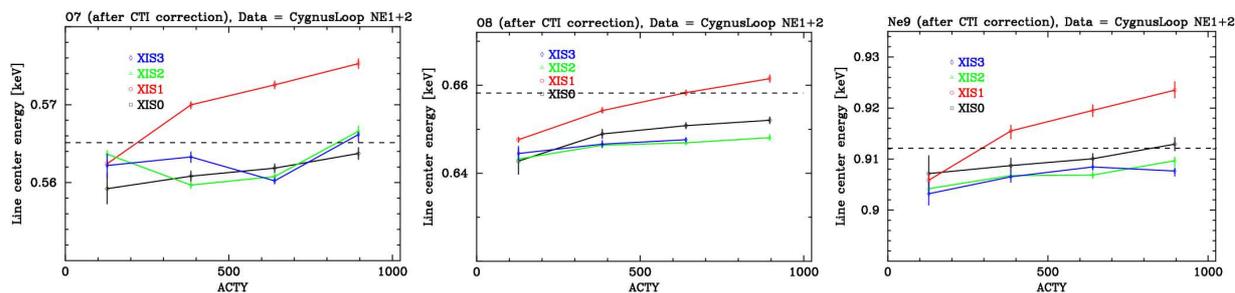


図 3.74: CTI 補正後のピーク中心エネルギーの推移。XIS0: 黒、XIS1: 赤、XIS2: 緑、XIS3: 青、で示した。黒の点線は、XMM-Newton 衛星で測定したラインセンターエネルギー。

after CTI correction (POS3+4)

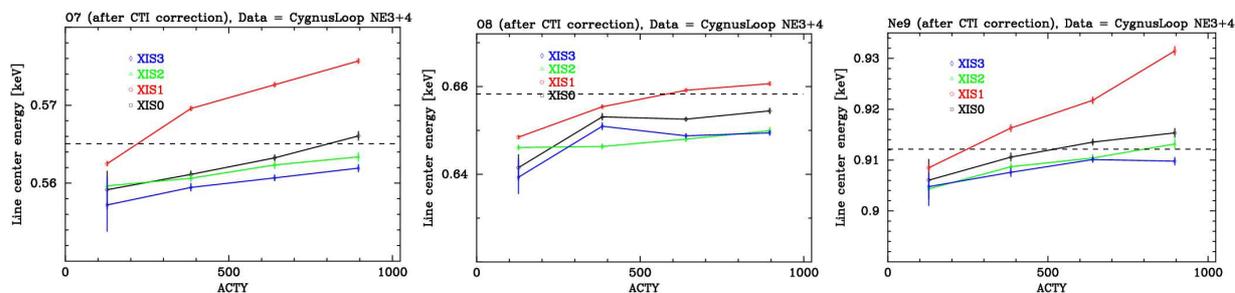


図 3.75: CTI 補正後のピーク中心エネルギーの推移。XIS0: 黒、XIS1: 赤、XIS2: 緑、XIS3: 青、で示した。黒の点線は、XMM-Newton 衛星で測定したラインセンターエネルギー。

されている。この点に関しては、-90degC の Door Close のデータを用いて、パラメータを決め直す予定でいる。

第4章 地球大気による

酸素・窒素輝線バックグラウンド

すざく衛星 XIS、特に XIS1(BI-CCD) は低エネルギー側の検出効率と分解能が高いこともあり、太陽 X 線が地球大気にあたって生じる酸素や窒素の蛍光 X 線の混入が問題になりえることがわかった。この章では、この現象に関する基礎データを収集し、その傾向を調べることにした。

4.1 データセレクション

以下の条件を満たす天体のデータを選定した。

- 酸素・窒素輝線のエネルギー帯で暗い天体
2型 AGN など。
- 観測時間が 50 ksec 以上

表 4.1: 観測ログ

天体	観測開始日
Galactic Bulge	2005/08/27
Vega	2005/09/02
SN1006_NE_BGD	2005/09/04
HESS_J1616-508_BGD2	2005/09/20
RXJ_1713-3946_BGD2	2005/09/25
Galactic Center_SGR_B2	2005/10/12
Mrk 3	2005/10/22
Galactic Ridge	2005/10/28
A3376_WEST_RELIC	2005/11/07
Abell 1413	2005/11/15
Abell 2811_offset	2005/11/28
Abell 1795_FarSouth	2005/12/12
NGC 4388	2005/12/24
NGC 720	2005/12/30
Arp 220	2006/01/07
NGC 4945 2nd.	2006/01/15

4.2 データ・リダクション

本研究では、rev 0.3 のデータを使用した。

4.2.1 テレメトリ飽和時間帯の除去

全セグメントで検出したイベント数と機上で処理され、情報がファイルに書き出されたイベント数の数を比較。処理完了イベント数が検出イベント数が多い場合は処理しきれなかった(テレメトリ飽和)を起こしたことになるので、そのフレームは解析から除外する。

4.2.2 光漏れ補正量の制限

地球大気によって反射した強い可視光が、視野にはいると光漏れ補正が正常に働かなくなり、信号波高のゼロレベルが正しく評価されなくなる。結果として、信号波高不正確になるばかりでなく、X線イベント数も信頼できなくなる。このような、状態のデータを避けるため、セグメント毎で光漏れ補正量の平均を求め、前回の光漏れ平均量との差分が50(通常的光漏れ補正量を8倍した値)以上のデータは解析から除外した。

4.3 地球の縁と視野方向の角度

(DYE_ELV,NTE_ELVによるデータの分類)

窒素輝線、酸素輝線の強度は太陽X線のあつた地球の縁に近い方向をみたときにより強くなるのが期待される。すざく衛星のデータでは、太陽光線のあつた地球の縁から計った望遠鏡の視野方向の角度をDYE_ELVとよび、太陽光線のあつていない地球の縁から計った望遠鏡の視野方向の角度をNTE_ELVとよぶ。(より正確な定義は付録参照のこと)。

以下では、主にDYE_ELVによってデータを分類し、窒素輝線、酸素輝線の強度の時間変化と、視野内での強度分布をしらべる。なお、窒素輝線(392.4eV)は $90 < PI < 120$ の積分カウントレート、酸素輝線(524.9eV)は $127 < PI < 157$ の積分カウントレートで定義する。NGC4388, NGC4945, NGC720のデータに関してはこのあとに示し、それ以外のデータは付録-Bにまとめて掲載した。

4.4 NGC 4388

4.4.1 イメージ

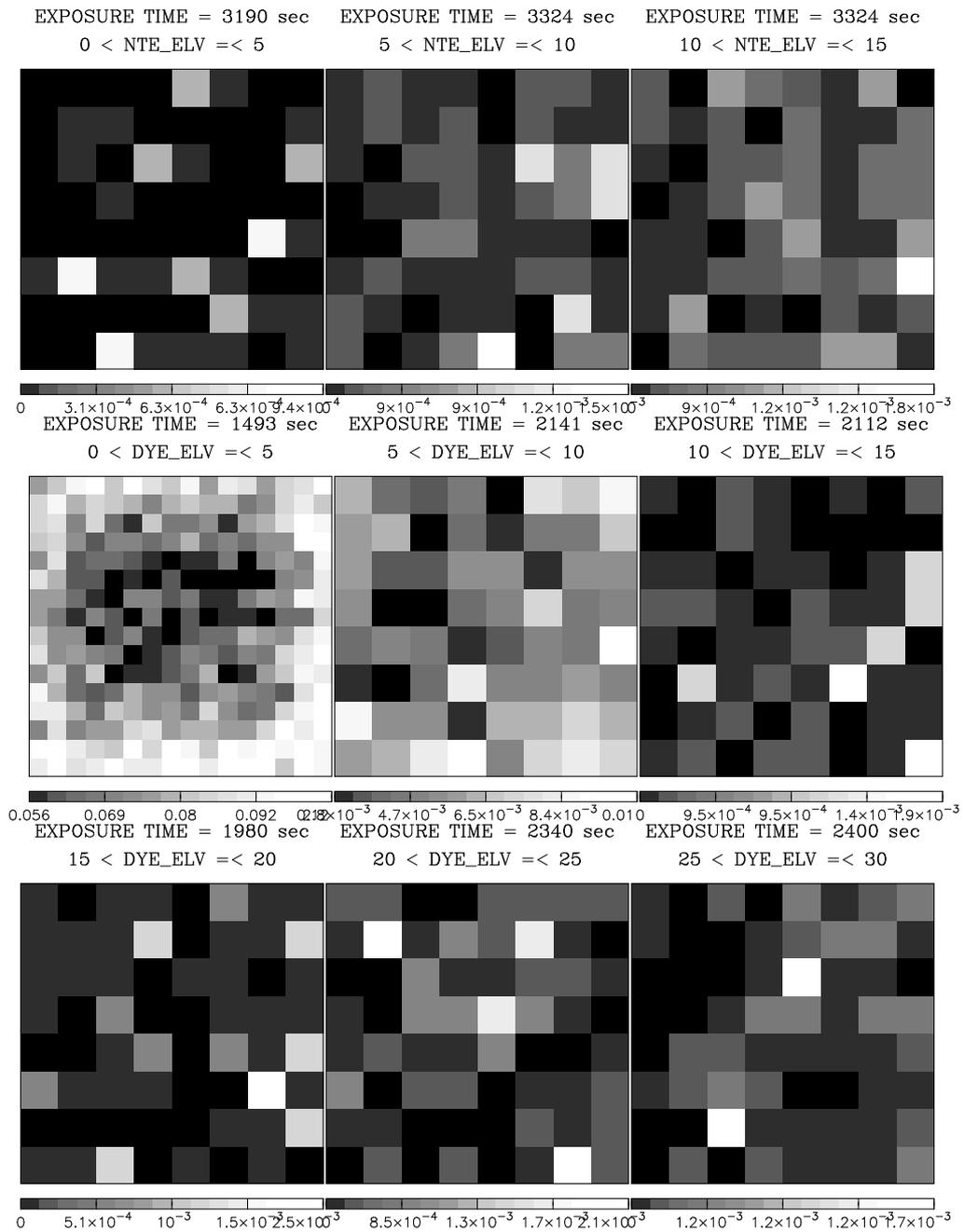


図 4.1: NGC 4388 窒素蛍光輝線バンド (15 < DYE_ELV < 30)

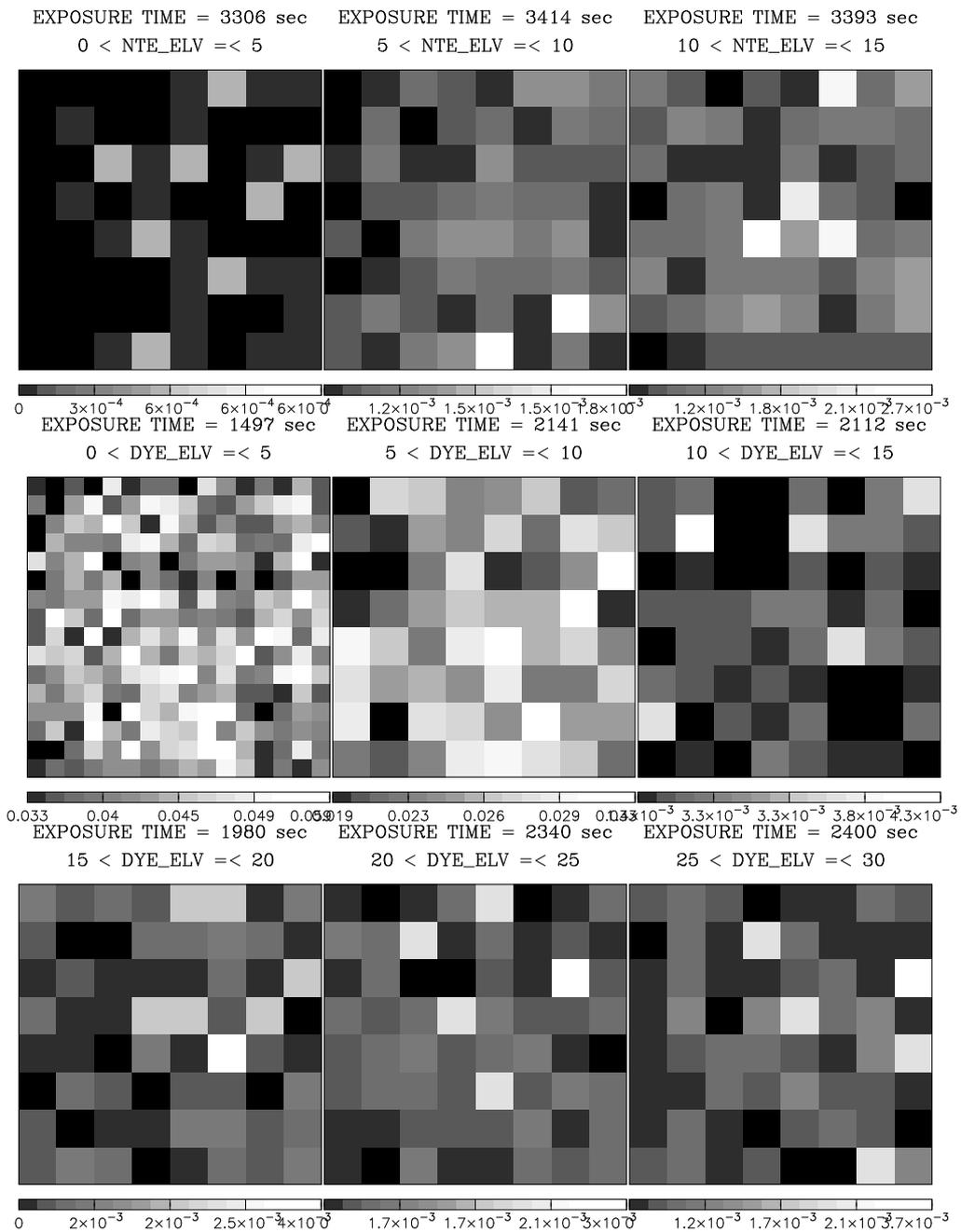


図 4.2: NGC 4388 酸素蛍光輝線バンド (15 < DYE_ELV < 30)

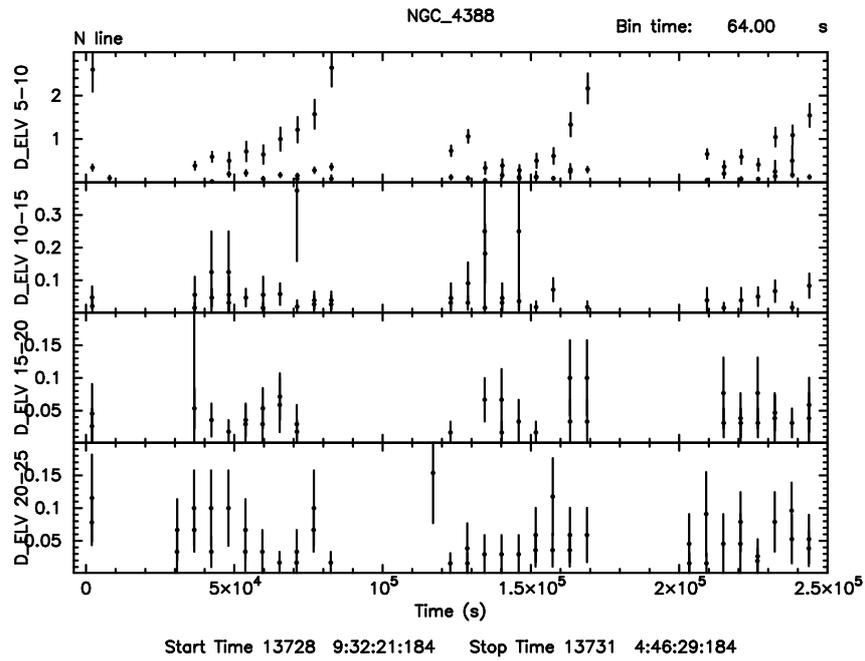


図 4.3: NGC 4388 窒素蛍光輝線バンド ($0 < \text{NTE_ELV} < 15$)

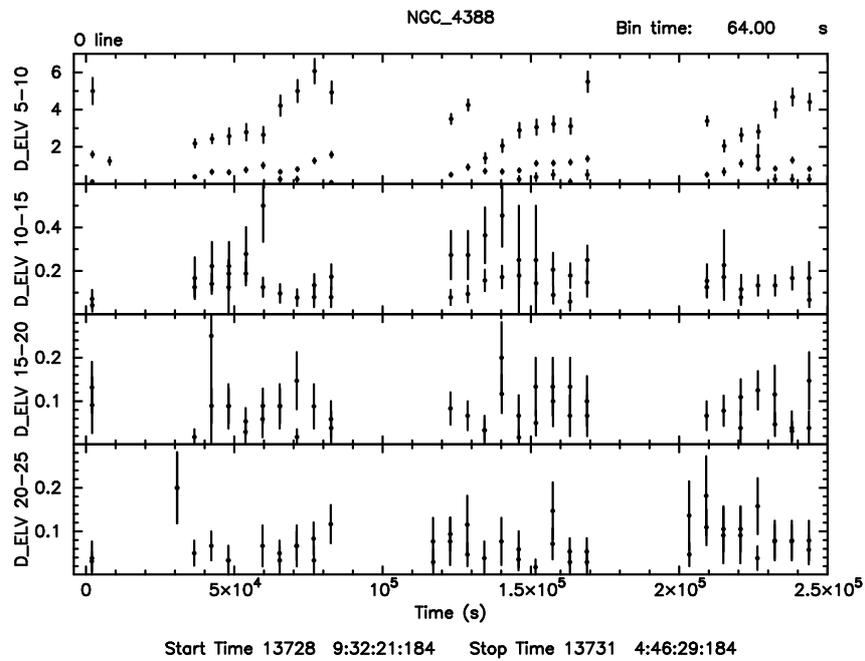


図 4.4: NGC 4388 酸素蛍光輝線バンド ($0 < \text{DYE_ELV} < 15$)

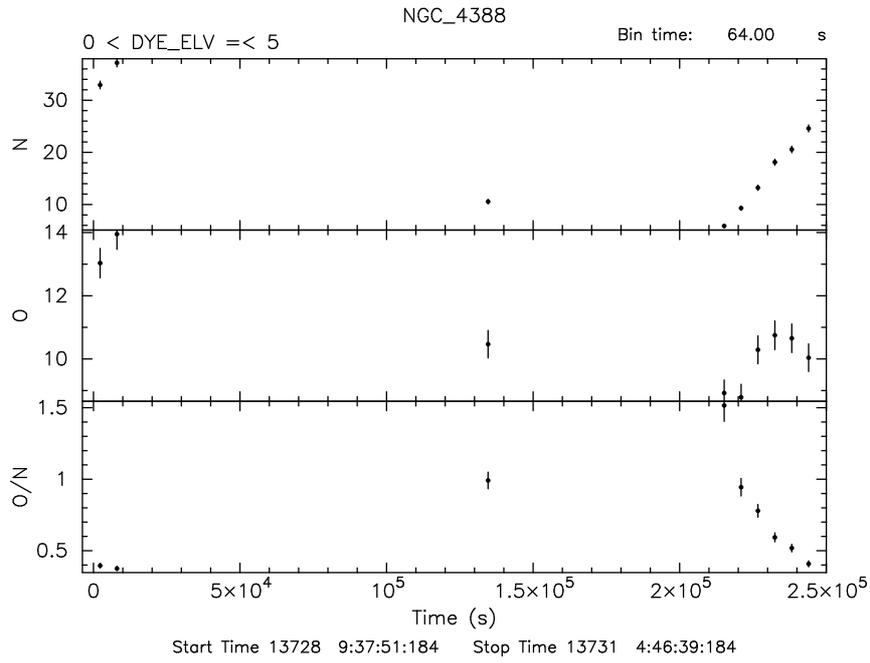


図 4.5: 窒素と酸素の強度比 ($0 < \text{NTE_ELV} < 5$)

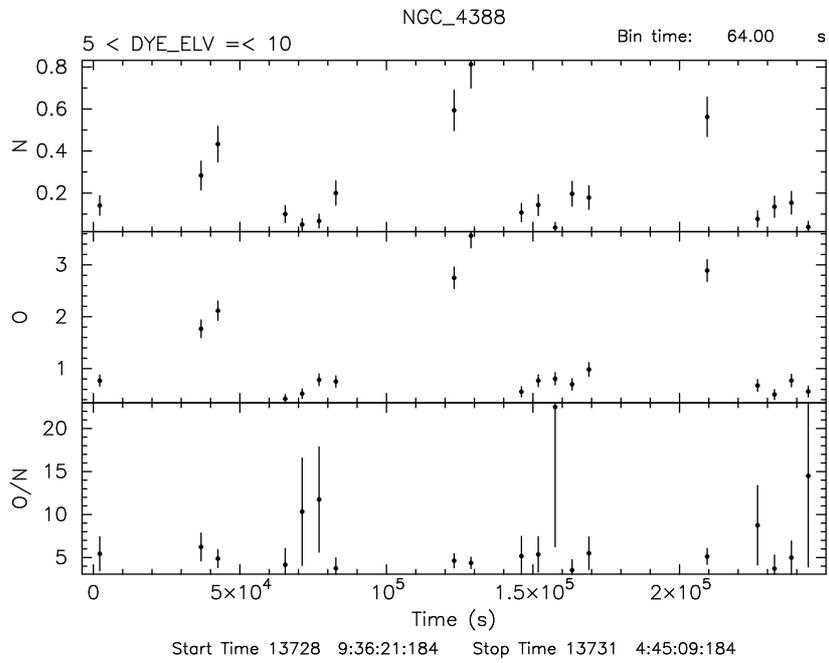


図 4.6: 窒素と酸素の強度比 ($5 < \text{DYE_ELV} < 10$)

4.4.2 ライトカーブ

輝線強度比

4.4.3 EHK

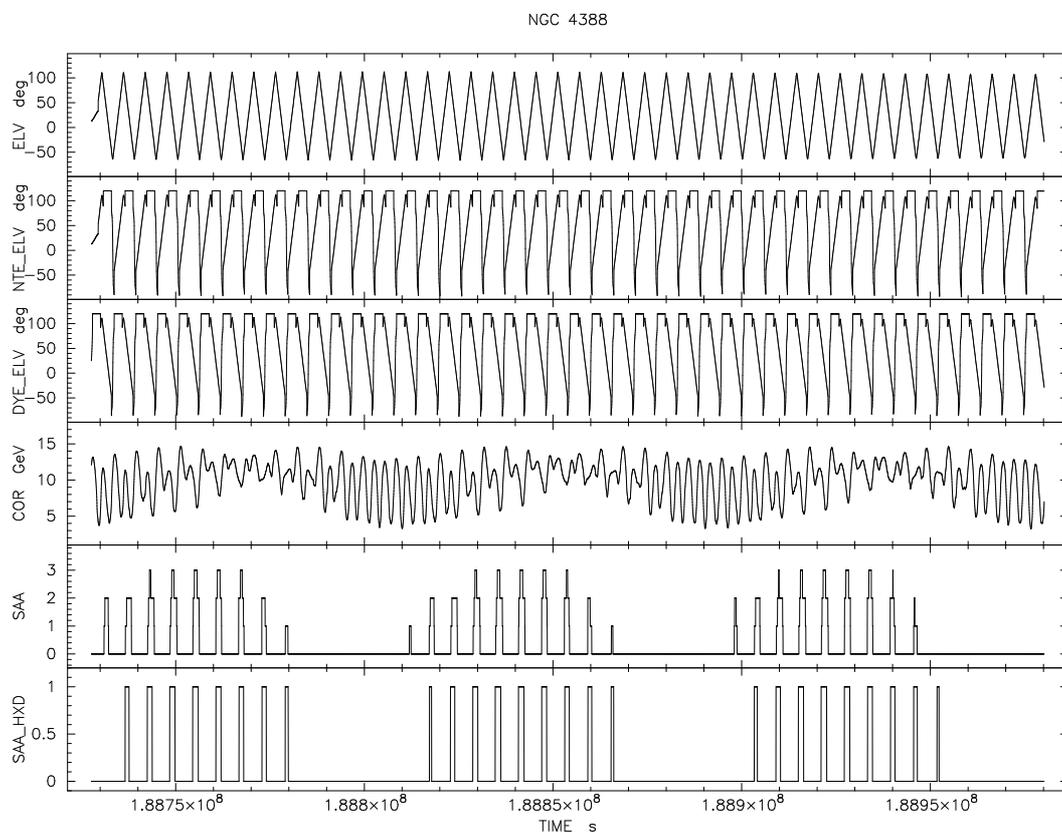


図 4.7: NGC 4388 EHK

4.5 NGC 4945

4.5.1 イメージ

4.5.2 ライトカーブ

輝線強度比

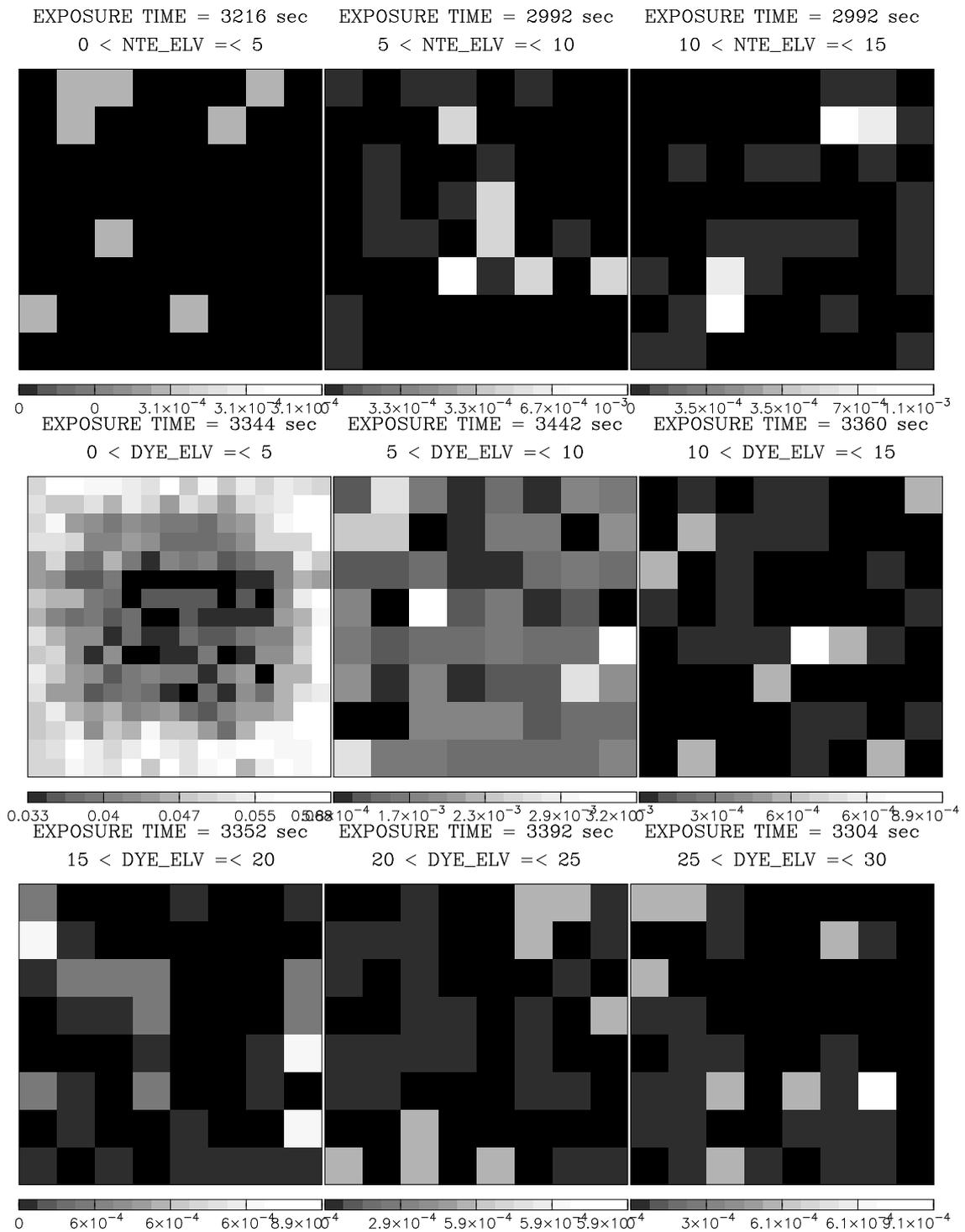


図 4.8: NGC 4945 窒素蛍光輝線バンド

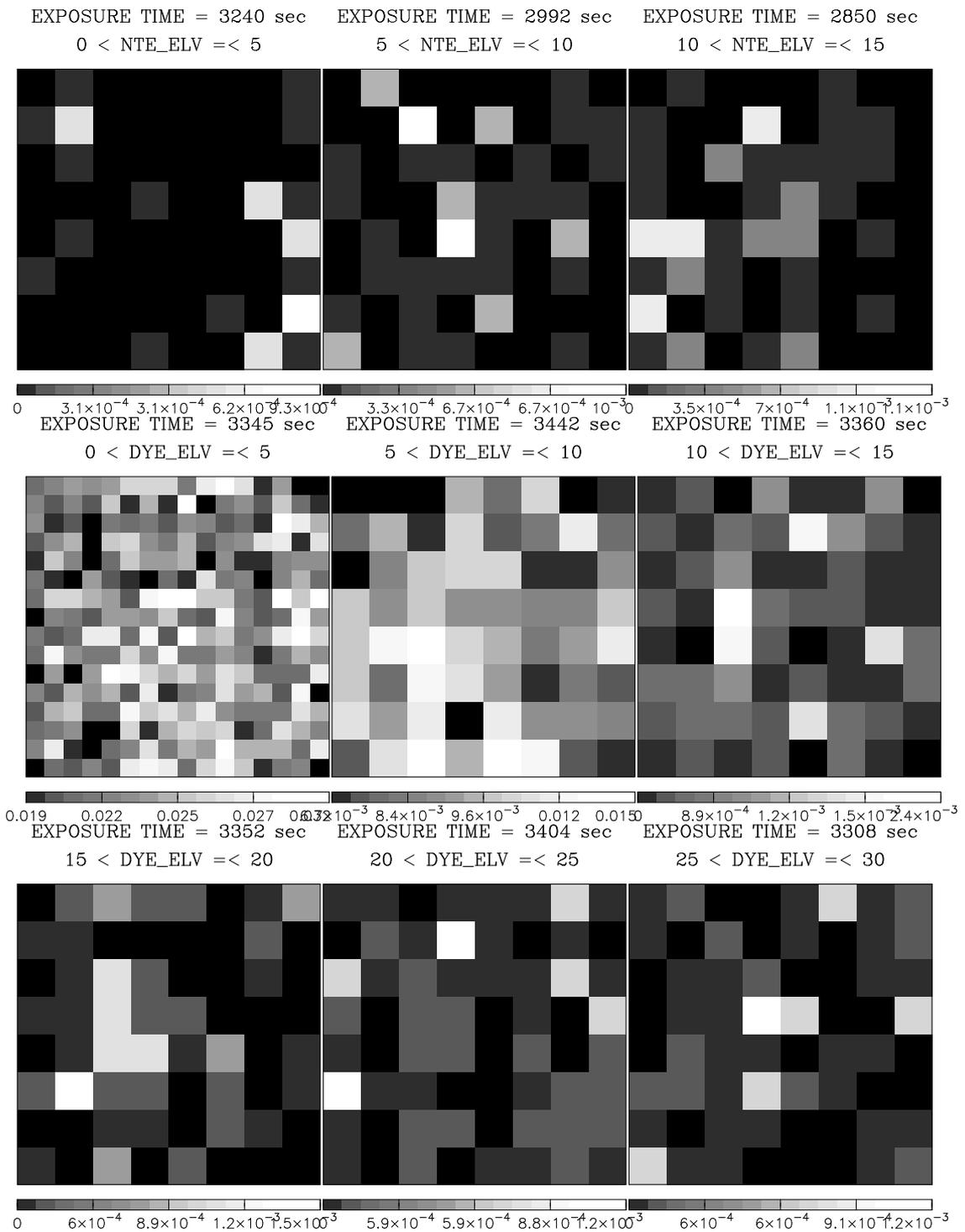


図 4.9: NGC 4945 酸素蛍光輝線バンド

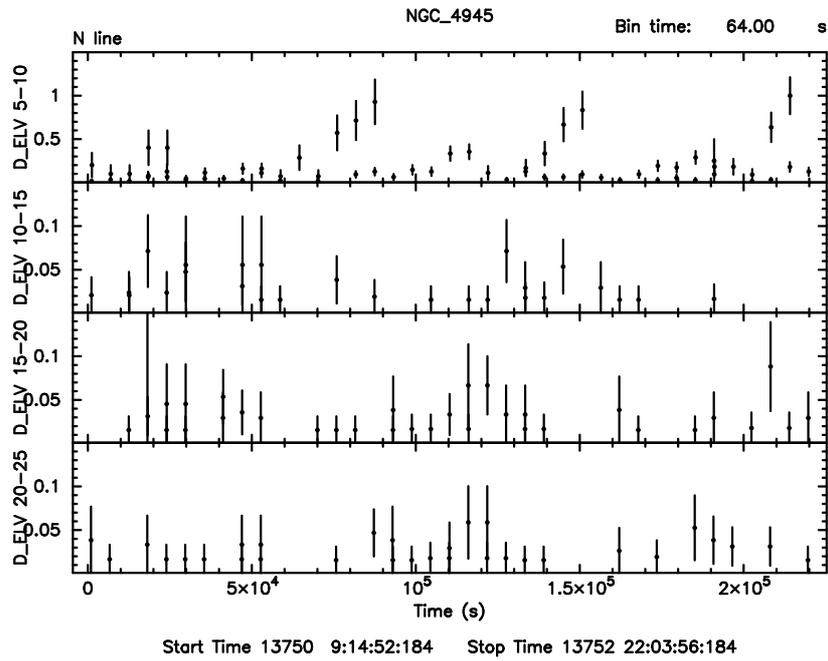


図 4.10: NGC 4945 窒素蛍光輝線バンド ($0 < \text{NTE_ELV} < 15$)

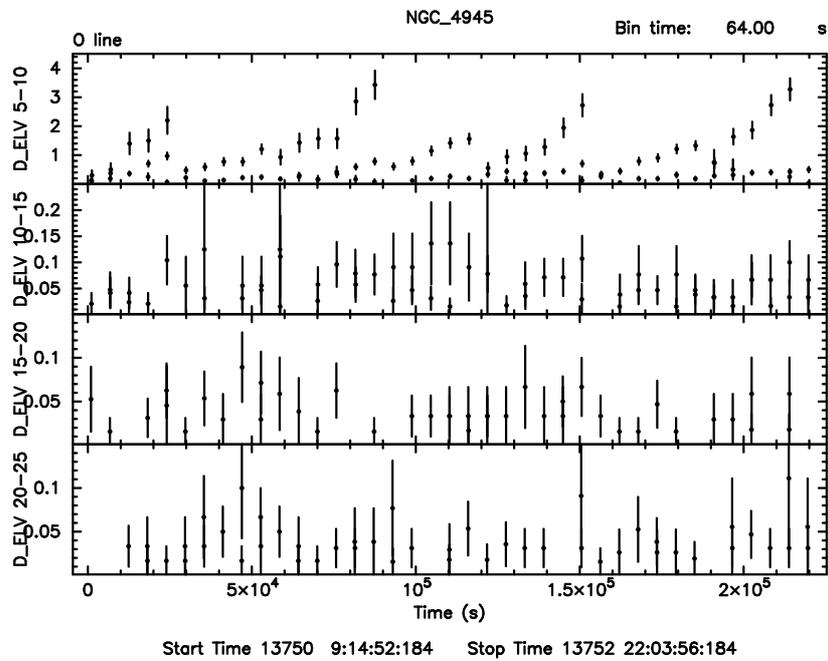


図 4.11: NGC 4945 酸素蛍光輝線バンド ($0 < \text{DYE_ELV} < 15$)

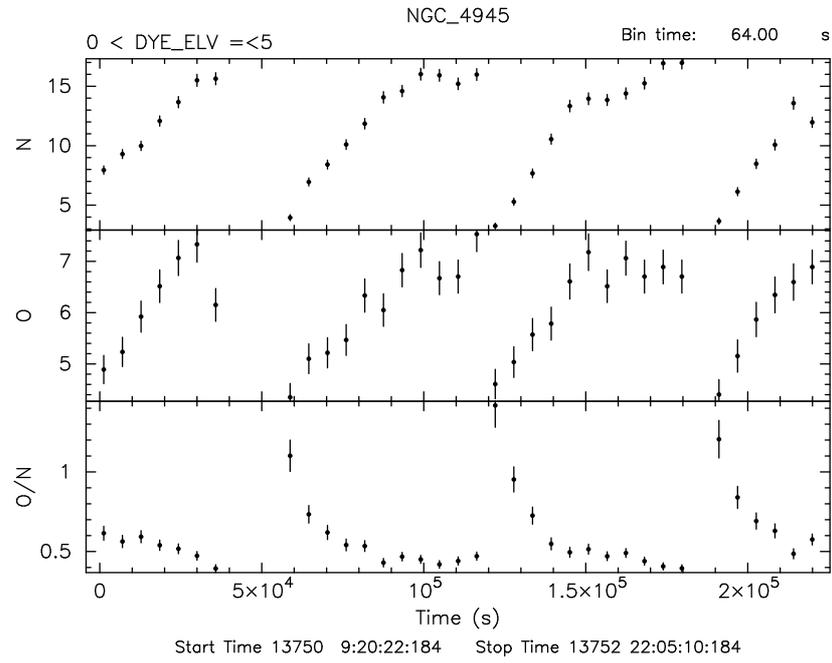


図 4.12: 窒素と酸素の強度比 ($0 < \text{NTE_ELV} < 5$)

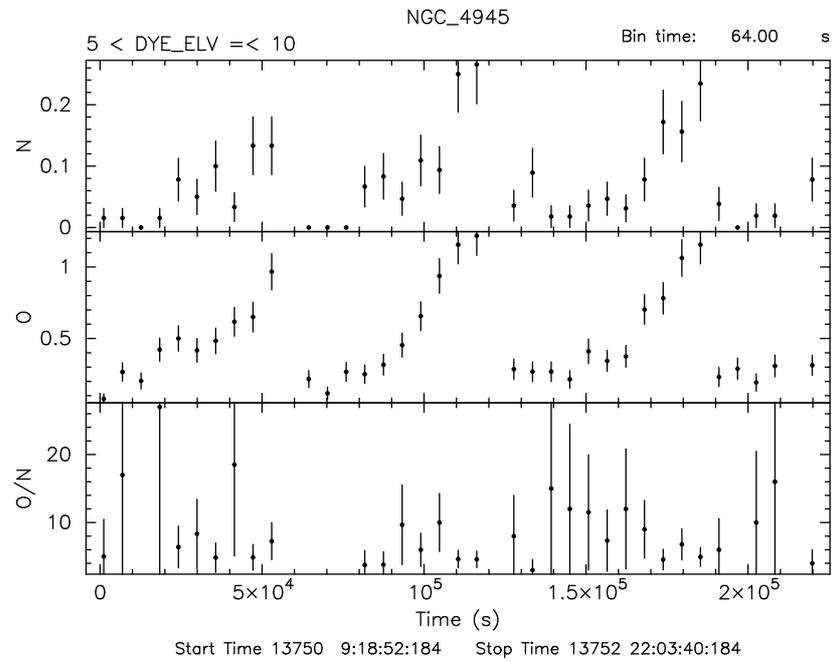
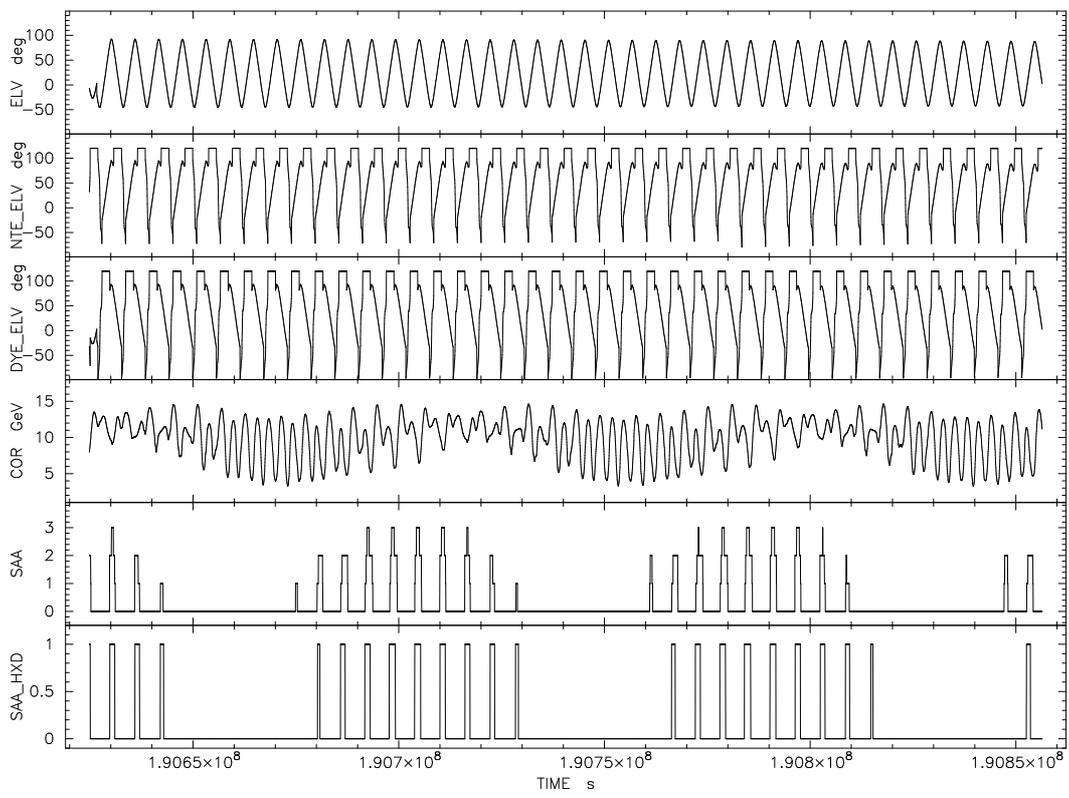


図 4.13: 窒素と酸素の強度比 ($5 < \text{DYE_ELV} < 10$)

NGC 4945



☒ 4.14: NGC 4945 EHK

4.6 NGC 720

4.6.1 イメージ

4.6.2 ライトカーブ

輝線強度比

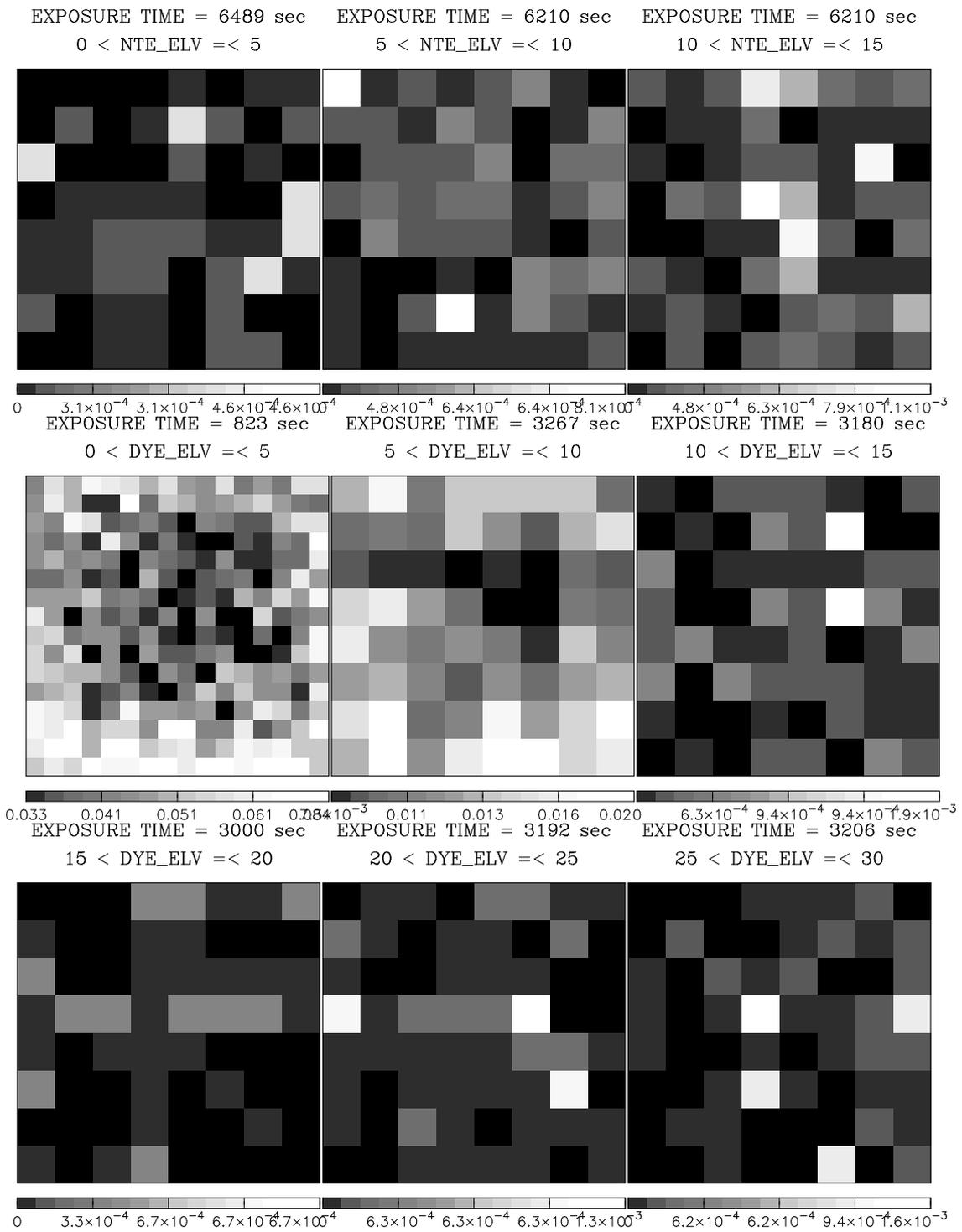


図 4.15: NGC 720 窒素蛍光輝線バンド

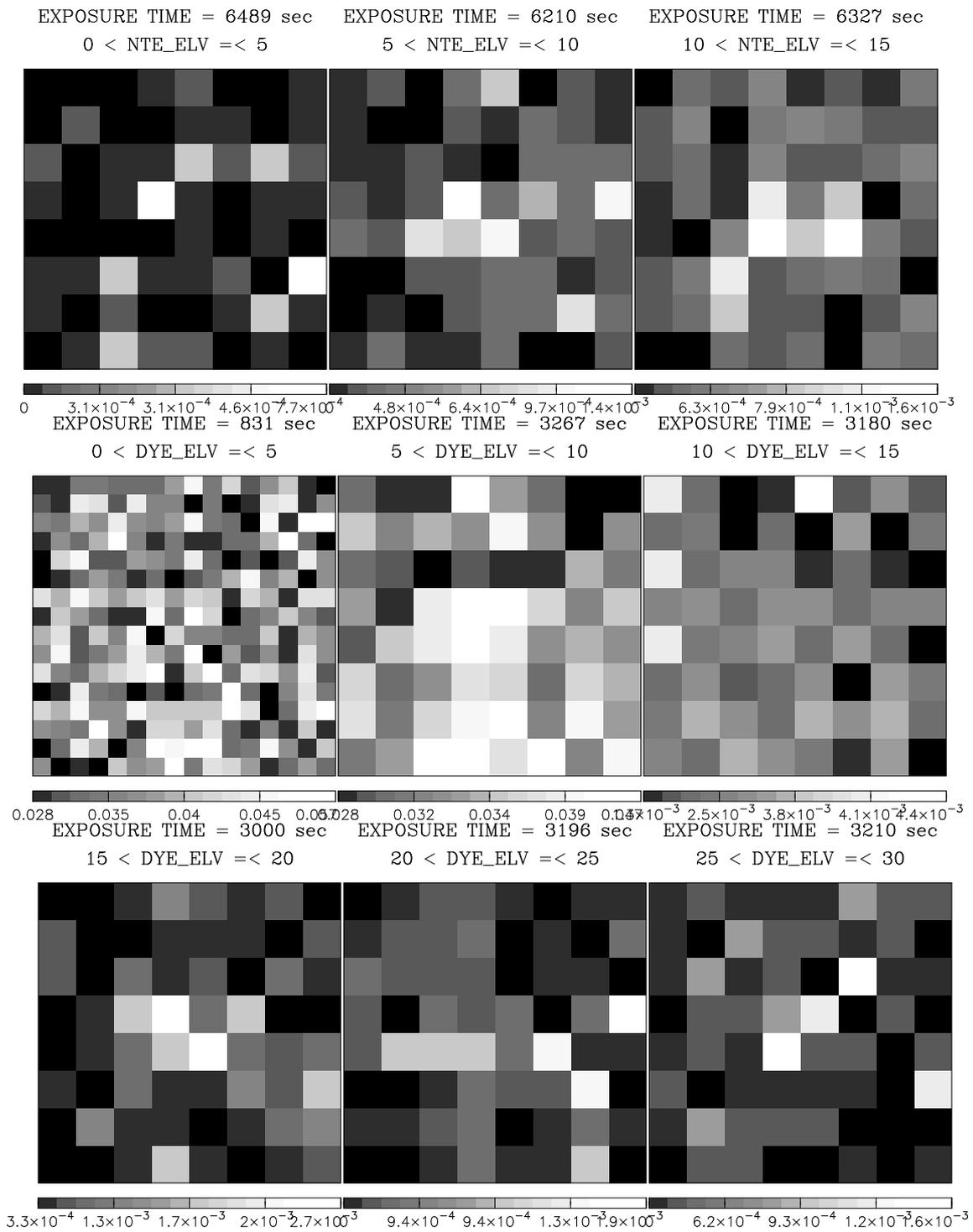


図 4.16: NGC 720 酸素蛍光輝線バンド

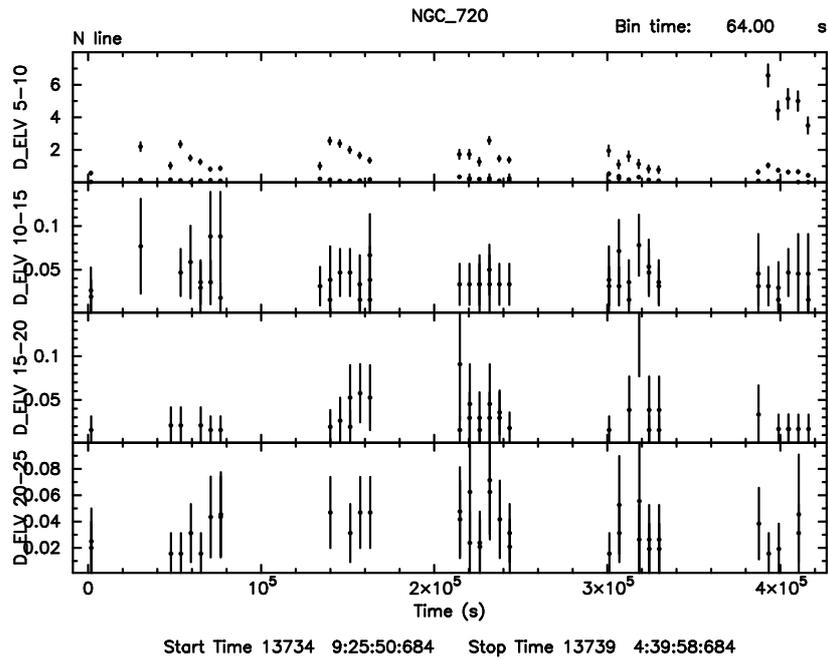


図 4.17: NGC 720 窒素蛍光輝線バンド ($0 < \text{NTE_ELV} < 15$)

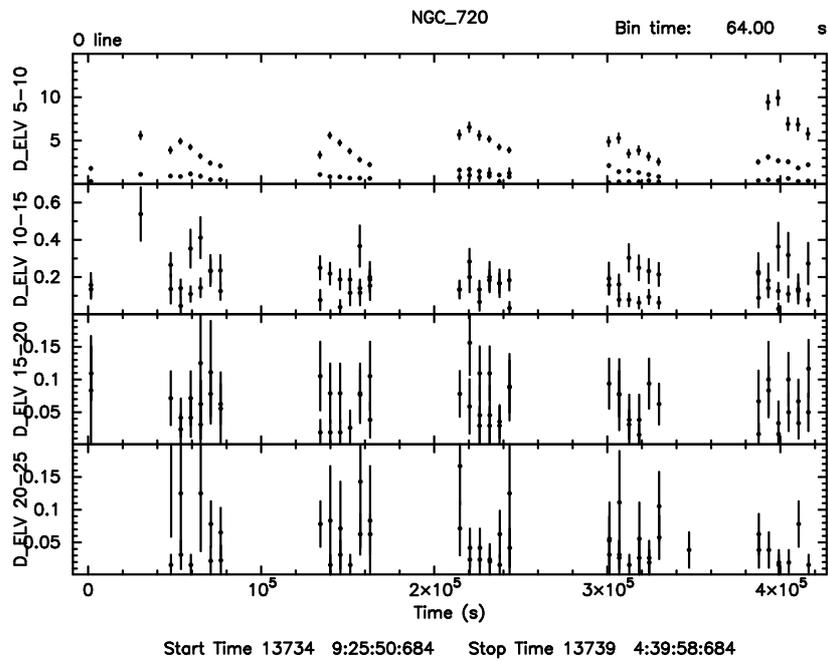


図 4.18: NGC 720 酸素蛍光輝線バンド ($0 < \text{DYE_ELV} < 15$)

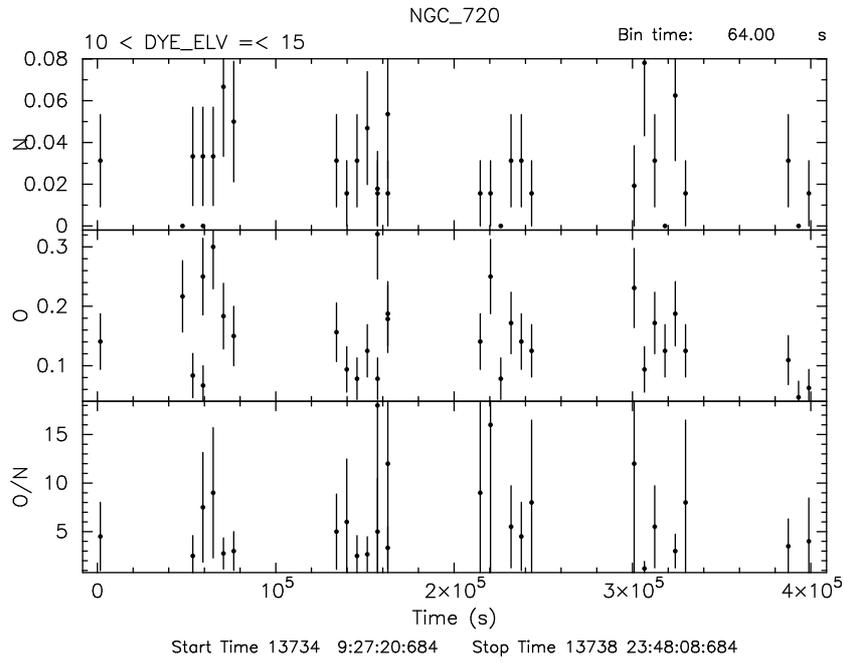


図 4.19: 窒素と酸素の強度比 ($5 < NTE_ELV < 10$)

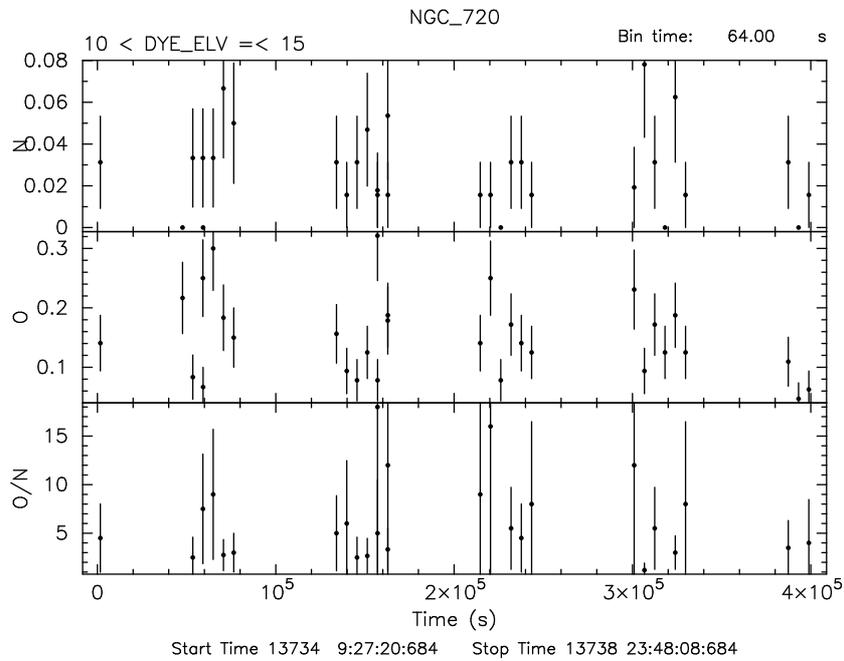
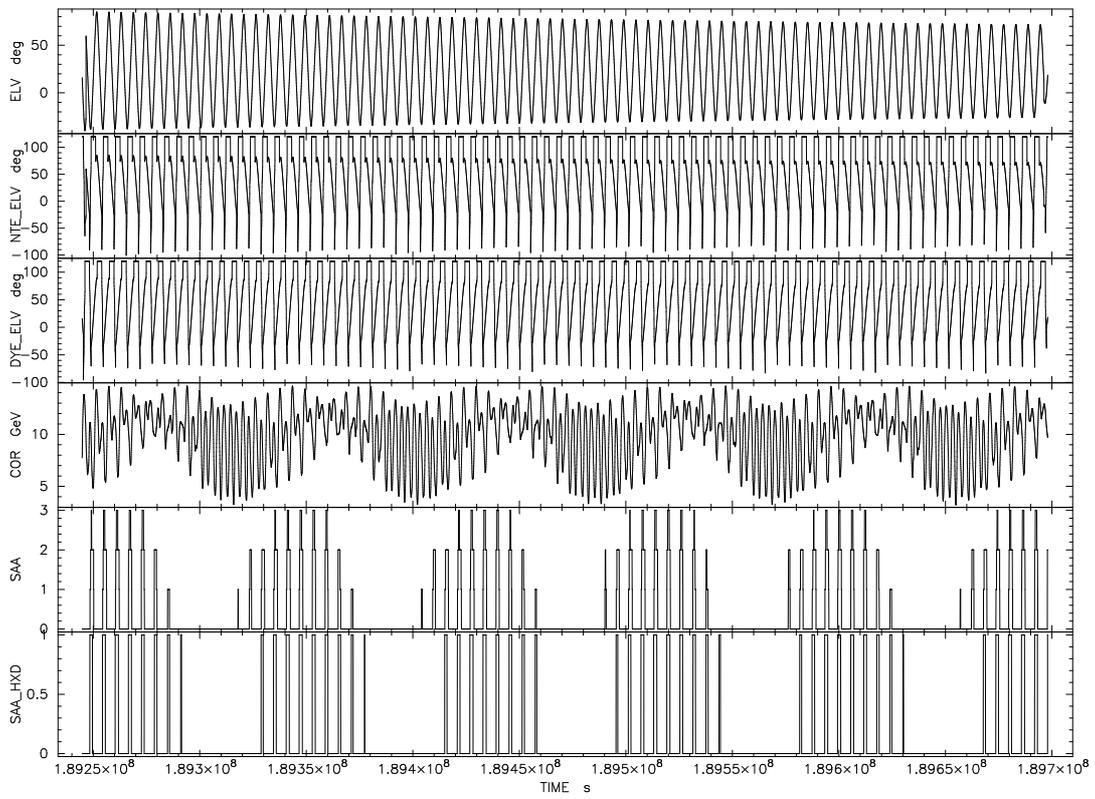


図 4.20: 窒素と酸素の強度比 ($10 < DYE_ELV < 15$)

Plot of file ae20051230_0830_1330.ehk



☒ 4.21: NGC 720 EHK

4.7 地球大気バックグラウンドの長期変動

前の節でみたように、地球大気バックグラウンドの輝線強度は、地球の縁からの角度に大きく依存する。ところが、同じ DYE_ELV の範囲を選んでも観測時期が異ると、その強度は一桁以上異なる。この原因としては、太陽 X 線強度の時間変化が考えられる。太陽 X 線強度は太陽 X 線観測衛星によってモニターされている。太陽 X 線強度との相関を調べるのは今後の課題である。

しかしながら、DYE_ELV の値が 25 度をこえても輝線の影響がみえていることからすると、どの程度の混入があるか個々の観測で調べる必要があることを示している。

4.7.1 窒素

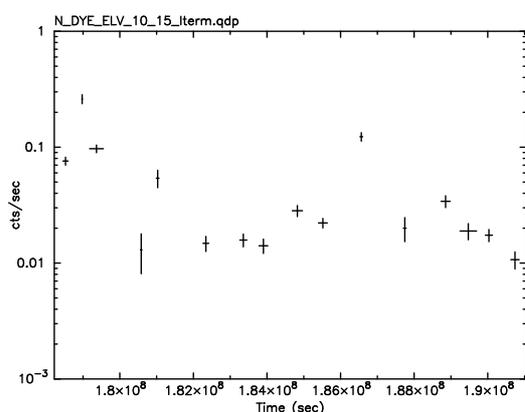


図 4.22: 窒素輝線バンド。
10 < DYE_ELV < 15

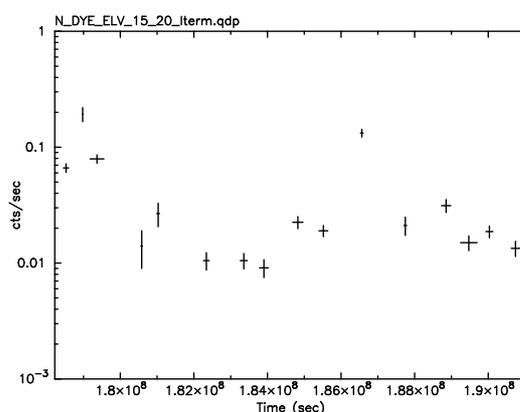


図 4.23: 窒素輝線バンド。
15 < DYE_ELV < 20

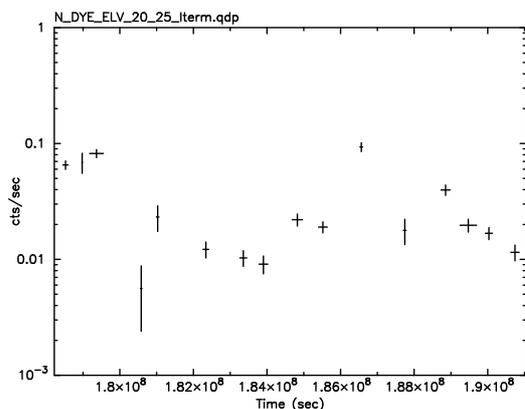


図 4.24: 窒素輝線バンド。
20 < DYE_ELV < 25

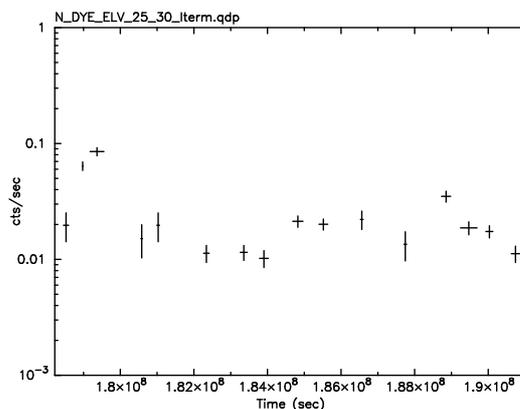


図 4.25: 窒素輝線バンド。
25 < DYE_ELV < 30

4.7.2 酸素

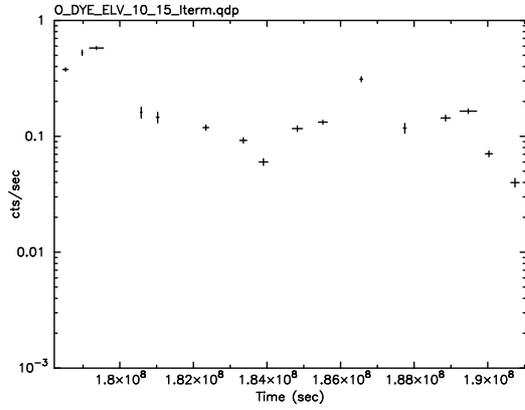


図 4.26: 酸素輝線バンド。
10<DYE_ELIV<15

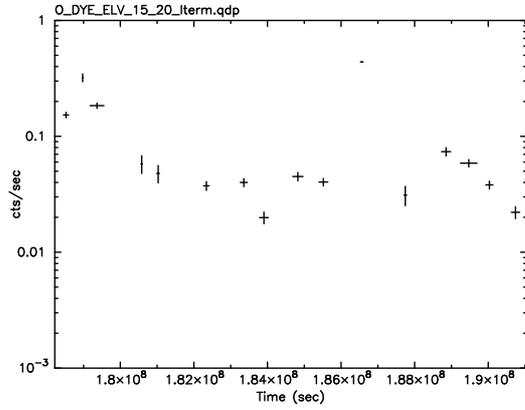


図 4.27: 酸素輝線バンド。
15<DYE_ELIV<20

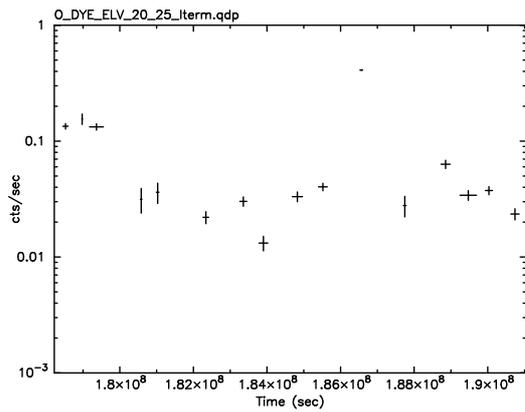


図 4.28: 酸素輝線バンド。
20<DYE_ELIV<25

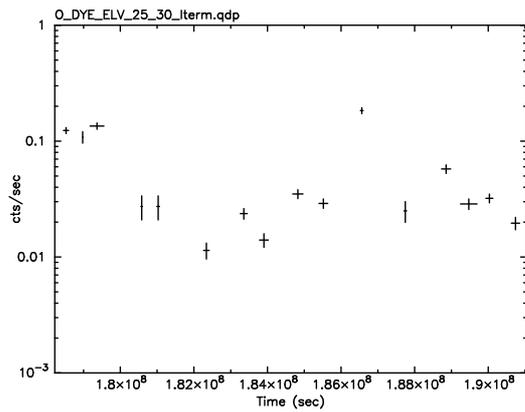


図 4.29: 酸素輝線バンド。
25<DYE_ELIV<30

図 4.30:

4.7.3 コンタミネーション評価へ利用

XIS 視野内での窒素輝線の分布 ($0 < \text{DYE_ELV} < 5$) をみると、中心部と周辺部分で明かに強度が異なることがわかる。しかも、興味ふかいことに 2005 年 8 月のデータでは視野中心部が高いのに観測時期があとになるに従い、中心部の強度が現象し、2005 年 11 月には明かに逆点していることがわかる。

付録-A に示したように、すざく XIS の低エネルギー側の検出効率が、おそらくは炭素を含む物質の OBF への吸着のために時間とともに減少していることが知られている。ここに示した振舞いは、その結果として起ったことと考えられる。同時に、XIS 視野内での窒素輝線の分布をを調べることで、今後も、吸収物質の変化を定量的に追跡できることを示している。

ちなみに、窒素輝線、酸素輝線のエネルギーの X 線の炭素に対する平均吸収距離は $0.182\mu\text{m}$ 、 $0.375\mu\text{m}$ である。

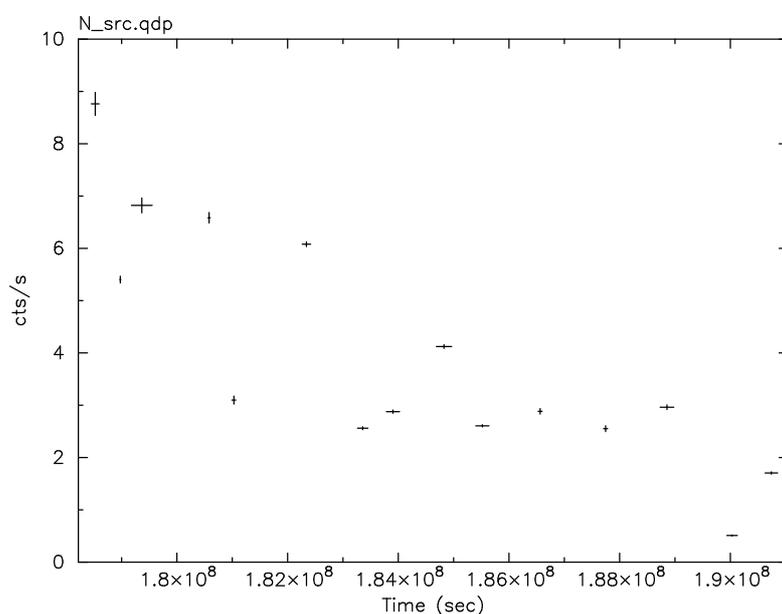


図 4.31: 窒素蛍光輝線バンドのカウントレート。半径 6 mm の中心領域。

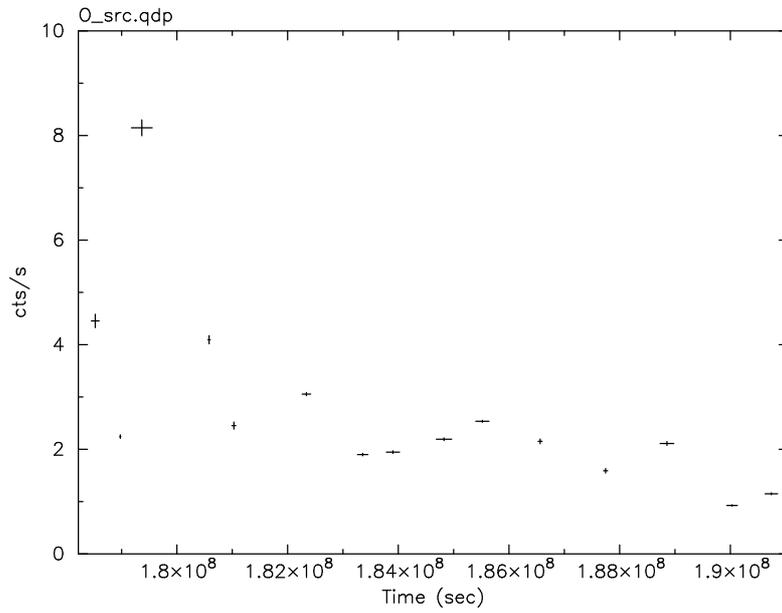


図 4.32: 酸素蛍光輝線バンドのカウント比。半径 6 mm の中心領域。

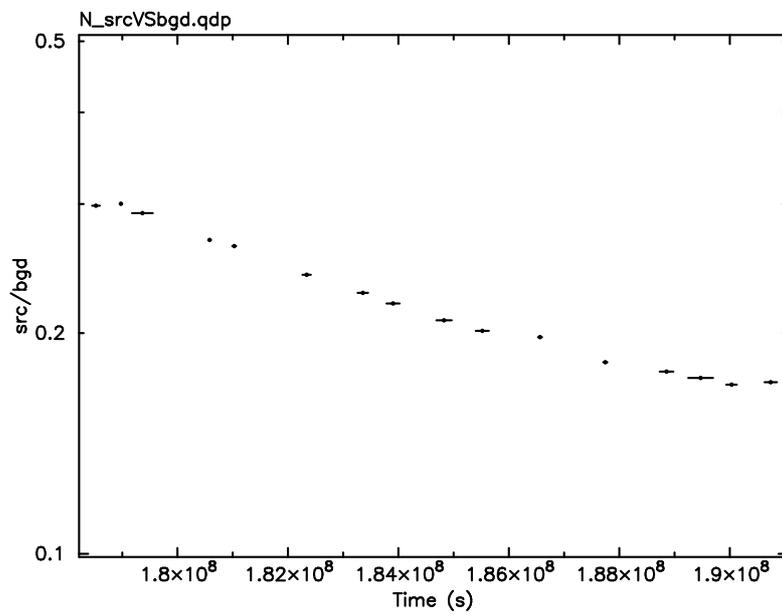


図 4.33: 窒素蛍光輝線バンドのカウント比。半径 6 mm の中心領域のカウントをそれ以外の領域のカウントで割った。

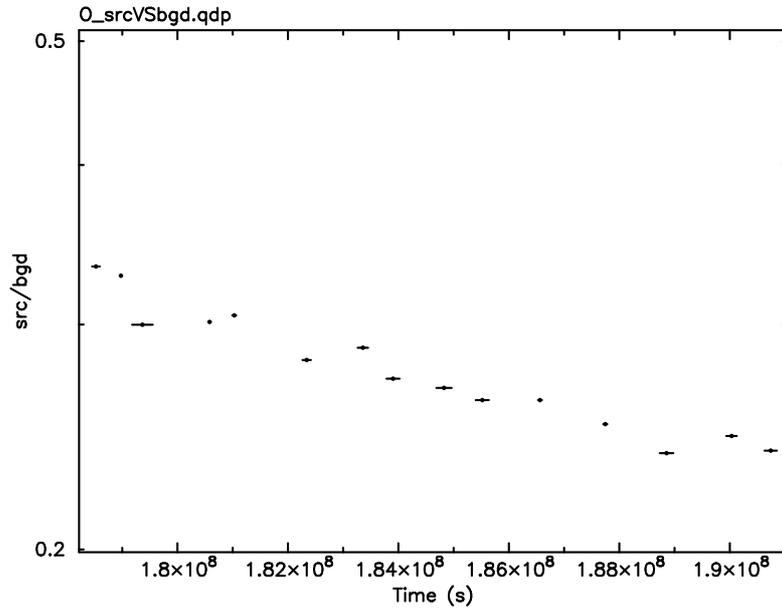


図 4.34: 酸素蛍光輝線バンドのカウント比。半径 6 mm の中心領域のカウントをそれ以外の領域のカウントで割った。

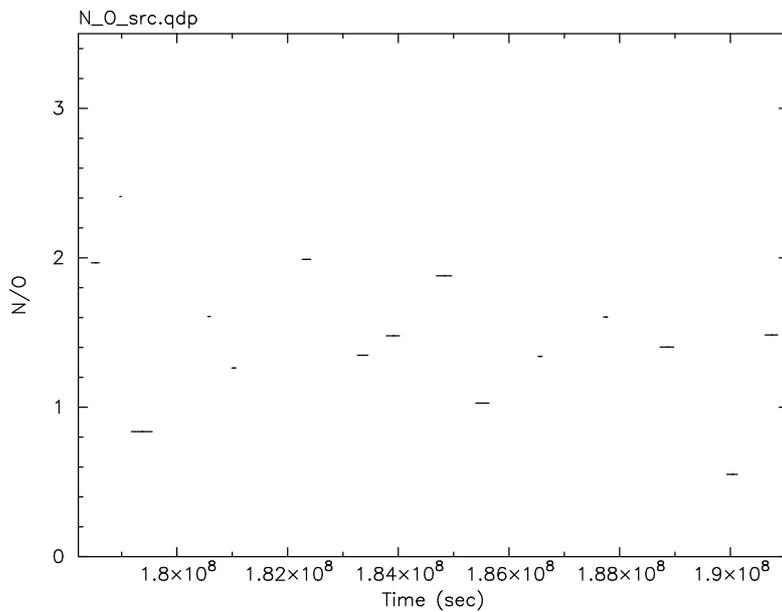


図 4.35: 半径 6 mm の中心領域のカウントレート比。窒素蛍光輝線バンド/酸素蛍光輝線バンド。

第5章 まとめ

放射線損傷によって生じた格子欠陥に電荷がトラップされることで失われる電荷の割合、電荷転送非効率 (CTI) は、徐々に悪化することが分かっている。この現象に対応するために、今回、軌道上のデータから電荷洩れ補正と CTI 補正の二つの補正パラメータを決定した。

電荷洩れ補正のパラメータは、軌道上で得られたキャリブレーションソースのデータから求めた値が地上較正試験の結果とほとんど変わらないことが分かった。また、実際に天体のデータへ補正をし、少なくとも 2005 年 10 月末の時点でこの補正が現在のパラメータで有効なものとなっていることを確認した。

壁キャリブレーションソース ^{55}Fe の中心パルスハイトの時間変化を追うことで電荷転送効率が徐々に低下することを確認した。また、時間-中心パルスハイトの関係を求めることで、CTI 補正のパラメータを決定した。実際に天体を観測したデータに適用した。

その結果以下のことが分かった。

1. CTI 補正前では最大 30eV 程度、中心エネルギーが低く評価されていたのが、CTI 補正によって全般的にずれが小さくなった。
2. XIS1 (BI) に関しては、特に読みだし口から遠い領域で補正が過剰に働いている。
3. 低エネルギー側のラインに関しては、読みだし口から遠い領域では補正が適当に働いているものの、読み出し口に近い領域では不足している。

蓄積領域での電荷転送非効率を考慮する必要があるかもしれない。また、今回解析したデータは、CCD の温度が -80degC のものであった。このため、特に XIS1 では満足する補正の結果を得られなかった。 -90degC のデータを用いてパラメータを決めなおす予定である。

地球大気による酸素・窒素輝線の混入について傾向を調べた。その結果、酸素・窒素輝線の振舞がコンタミネーションの評価へ利用できることが分かった。

いずれも、今後 XIS が稼働し続ける限り、随時調査しなければならないデータ処理方法である。また、軌道上較正には、他にもたくさんの項目がある。これらも全てふまえ、XIS が高い性能を発揮するために、今後の調査が必要不可欠となる。

付録 A XIS 検出効率の時間変化

第 3 章で示したように、XIS の応答関数は放射線損傷により変化する。宇宙環境で放射線損傷を受けた CCD の応答が変化する現象は、すざく衛星以前のあすか衛星、Chandra 衛星、あるいはハッブル宇宙望遠鏡でも知られており、地上での放射線照射試験も繰り返し行われている。その結果、放射線損傷によって生じた格子欠陥が電荷転送効率の劣化を招くこと、そのために、信号電荷が減少し、入射 X 線のエネルギーと波高の関係 (Ex-PH 関係) の変化を引き起こしていることが理解されている。これに対して CCD の場所、観測時間の関数として、電荷転送効率の補正をデータに施すことは第 3 章で示したとおりである。

電荷転送効率の変化は、また、X 線イベントに対する検出効率の変化を引き起こす可能性にも注意すべきである。XIS のように、グレード判定法で grade 02346 を X 線イベントとして選択する場合、電荷転送非効率によって電荷の漏れ出しが生じると X 線イベントでも grade 7 以上となり棄却される。第 3 章で記した電荷漏れ補正は、このための対策である。現時点では、電荷漏れ補正のパラメータは地上実験で決めた値と変化なく、したがって補正も有効に働いていると考えている。ところが、すざく衛星打ち上げ後、XIS の低エネルギー側の検出効率が時間的に低下する現象が報告されている。この現象に関して、現時点までにわかっていることをまとめておく。

A.1 XIS+XRT の有効面積を決めている構成要素とその地上較正

XIS+望遠鏡 (XRT) の有効面積は、XRT の外側についている熱遮断フィルタ (Thermal Shield) の透過率 XRT の有効面積 XIS の光遮断フィルタ (Optical Blocking Filter; 以下 OBF) の透過率 XIS-CCD の検出効率の掛け算で決まる。XIS と XRT を組み合わせた状態での X 線照射実験は地上では行っていないが、それぞれの要素は較正試験がなされている。熱遮断フィルタと OBF の X 線透過率は、放射光施設による実験でエネルギーの関数として稠密に測定されている (Kitamoto et al., 2003, NIM A 505, p.683-p.687)。望遠鏡の有効面積は、X 線ビームラインで Al, Ti, Cu の特性 X 線を利用して測定されている。XIS-CCD の検出効率に関しては、MIT、大阪大学、京都大学で独立な方法で測定している (Hayashida et al., 2004, SPIE Proc 5488, p.73-84, 勝田 2005)。

しかし有効面積、X 線検出効率に関して、地上実験で決定した結果をそのまま利用できるわけではない。まず、地上実験では対象とする範囲のデータ点を稠密に測定できるわけではない。測定点を補間するモデル化が必要である。XIS-CCD の場合には不感層と空乏層の組成、構造と厚みを決めることに相当し、望遠鏡の場合は、形状誤差や表面粗さをレイトレーシングシミュレーションの結果と比較して決めることに対応する。仮に地上での較正実験をもとに精度の高いモデルの作成に成功したとしても、軌道上でそのまま適応できるとは限らない。例えば、X 線望遠鏡の鏡面形状は地上の重力の影響で変形を受け、軌道上の無重力状態との違いは避けられない。また、特に軟 X 線に対する検出効率が低下する現象が過去の X 線天文衛星でしばしば問題になった。これはフィルタや検出器表面へ汚染物質が吸着したためと考えられている。このような観点から、軌道上での XIS+XRT の有効面積を何らかの方法で検証することが求められている。

A.2 XIS+XRT の有効面積の軌道上での検証

既知の X 線強度、スペクトルをもった天体を観測することで、XIS+XRT の有効面積を軌道上で検証する。過去の X 線天文衛星で繰り返し観測されてきたのが、かに星雲である。かに星雲は、星間吸収を受けたべき関数型のスペクトルをもち、33ms のパルス成分に比べて長いタイムスールでは X 線強度、スペクトルとも安定で、2keV 以上のエネルギー域での有効面積の検証には現在でも最適と考えられている。すざく衛星もこの天体を観測した。ただし、XIS に対しては強度が強すぎるため、CCD のクロックをバーストモードにして観測する必要性が生じた。観測結果に関しては、XRT チームによる解析がすすんでいる (森英之 et al., 2006 宇宙科学シンポジウム) が、地上実験で決定した XRT の有効面積や、XIS-CCD の空乏層厚から予想される値と大きなずれはみえない。

一方、かに星雲は 1keV 以下の低エネルギー側では星間吸収を強く受けるため、他の天体を参照する必要がある。しかし、時間変動しない天体の X 線スペクトルは、1keV 以下の低エネルギー側では一般に複雑な構造をもち、しかも高いエネルギー分解能による観測が可能になったのが最近であるため、かに星雲に匹敵するような標準天体は存在しない。すざく衛星でも、複数の天体の観測結果を参照し、地上実験で決めた応答関数で矛盾がないかどうか検証した。

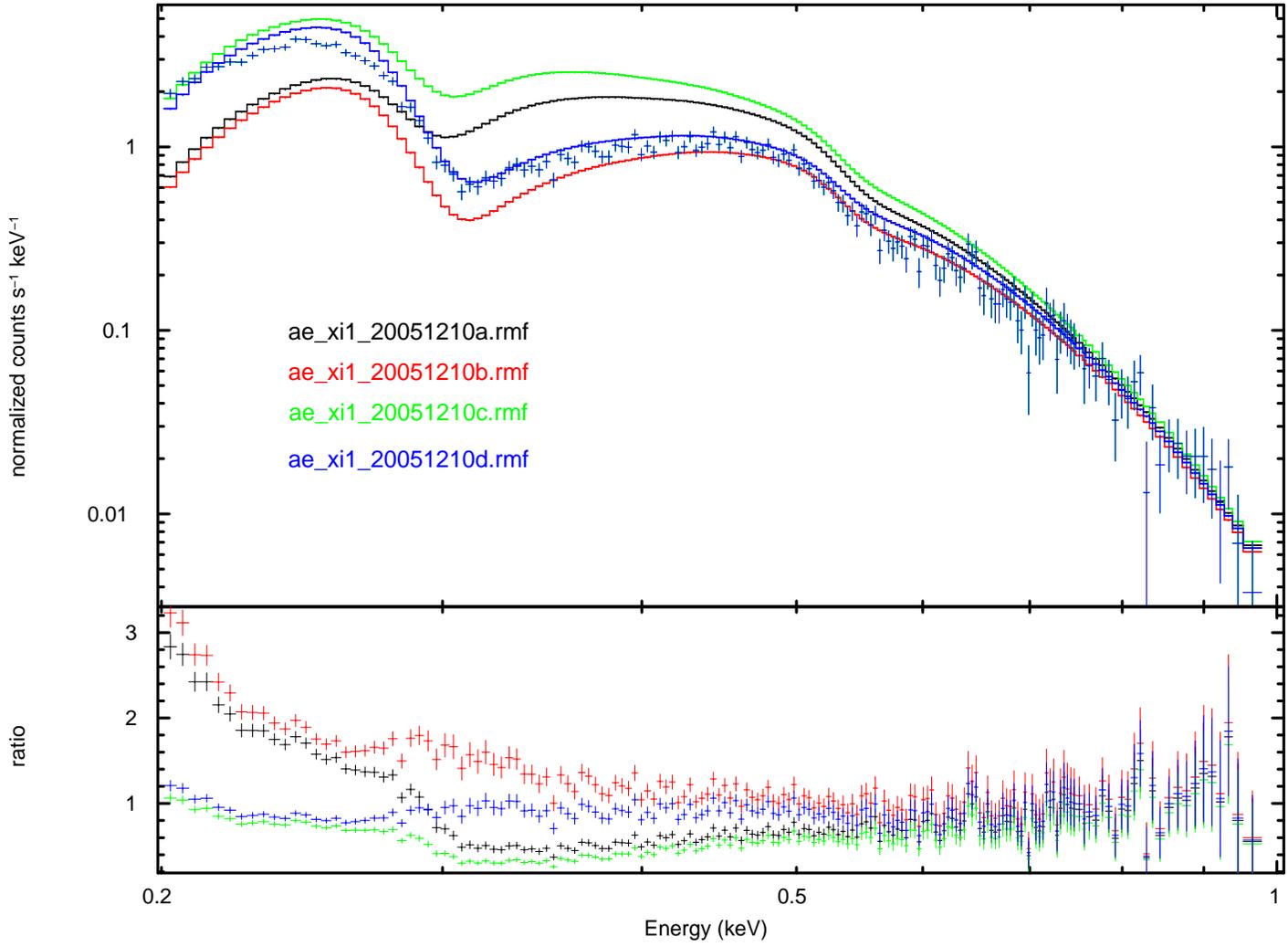
A.2.1 RXJ1856.5-3754 の観測

RXJ1856.5-3754 は ROSAT 衛星で発見された近傍の単独中性子星である。この天体は、XMM-Newton 衛星、Chandra 衛星のグレーディングによる長時間観測され、X 線スペクトルが星間吸収は $NH=0.2-1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ を受けた温度 63eV の黒体放射で近似できることが知られている (Burwitz et al., 2003, A&A, 1109 and referencetherein)。Drake et al. (2002, ApJ, 572, 996) は X 線観測から求めた黒体放射半径を 3.8-8.2 km と見積もり、クォーク星の候補としている。

RXJ1856.5-3754 はすざく衛星によって 2005/10/24-10/26 に観測された。rev0.3 processing のデータで XIS に対する有効観測時間は 78.5ks となる。しかし、観測されたスペクトル (特に BI-CCD である XIS1) を地上実験をもとに作成した応答関数でフィットさせると、低エネルギー側で期待値と大きな食い違いがみられた (林田 清 他, 2006, 宇宙科学シンポジウム) (図 A.1)。具体的には、炭素の吸収端 (0.28keV) より高いエネルギーで期待値より深い吸収がみられ、炭素の吸収端 (0.28keV) より低いエネルギーでは地上の較正実験をもとにした応答関数から期待されるより約 2 倍の X 線強度が得られた。地上実験では、XIS-BI-CCD の X 線入射面不感層の設計値に比べて 0.277keV での検出効率測定値が約 1/2 という結果がでていた。原因は、必ずしも明らかでないが、XIS-BI-CCD の X 線入射面不感層の厚みに関して設計値を採用することで食い違いを解消することができる。一方、炭素の吸収端 (0.28keV) より高いエネルギーでの吸収は、余分な炭素がいずれかの表面に付着したと考えることで説明できる。ただし、その厚みは炭素の密度を 2.2g/cc と仮定して 0.15micron にも達する。

A.2.2 E0102 の観測

E0102 は小マゼラン星雲に存在する超新星残骸で、低エネルギー側 0.4keV 程度まで X 線スペクトルが伸びているため、軌道上較正のためのソースとして過去の衛星で繰り返し観測されてきた。すざく衛星でも、打ち上げ以前から低エネルギー側での有効面積検証のために定期的に観測することが計画されていた。現時点までに、5 回の観測がなされ、そのうち 4 回分の観測に関して XIS のスペクトル解析がされている (E. Miller et al., 2006 private communication)。 図 A.2



☒ A.I. RXJ1856

に示したように、同じ天体を同じ XIS カメラで観測しているにもかかわらず、低エネルギー側のカウント数が観測時期を追うごとに減少している。この傾向は、特に XIS3 で顕著である。

Milleret al. はこのスペクトルから、余分な炭素の吸収量を求めている。現時点までの結果では、炭素の吸収体の厚みは時間とともに単調に増加する関数で近似できる (図 A.3)。逆に、この期間に観測したデータに関しては、この経験式から導かれる炭素の吸収体を X 線スペクトルモデルに導入することで、天体のスペクトルフィットを行うことができる。

A.2.3 Cyg Loop の観測

白鳥座にある Cyg Loop は、近傍にある年老いた超新星残骸で、軟 X 線領域では視直径 3 度のシェル型超新星残骸として観測される。すざく衛星は、2005 年 11/23-11/30 の期間に、Cyg Loop は北東のシェル領域を 4 点観測した。この観測では、電離した炭素の輝線が検出されている。Tsunemi & Katsuda (2006, private communication) は、この観測データをもとに、XIS 視野内での (電離した炭素の輝線 0.36keV を含むバンド) / (中性炭素の吸収端 0.28keV 以下のバンド) のカウント数の比のマップをつくった。(図 A.4) これで見られるように、周辺部の方が中心に比べて炭素の吸収体が薄いことが示唆される。カウント数の比からするおよそ 1/2 と推定される。

A.3 原因の追究と対策

以上 3 天体の観測以外にも、低エネルギー側の検出効率の低下を示唆する結果は報告されている。すざく衛星 XIS の特徴のひとつは、低エネルギー側での高い検出効率とエネルギー分解能である。現在のまま、低下が続けばそのメリットを失うことになりかねず、原因の追究と対策の検討が続けられている。

原因に関しては、議論が続けられているが、炭素を含む何らかの有機物が衛星内の機器から発生し、それが低温で動作している XIS カメラ、特にその入射面の OBF に付着したと考える説がもっとも有力である。この立場にたつと、Cyg Loop の観測、あるいは第 4 章で示した大気 X 線の解析で示されているように、付着は OBF の中心部でより進行している。OBF はその中心部でより低温になっていると考えられていることと、定性的には矛盾しない。逆により低温-90degC の CCD 表面だとすると、中心部と周辺部で差がでる理由が考えにくい。

付着物の同定を含めて、より定量的な解析がすすめられている。例えば Chandra 衛星でも、量的には一桁程度小さいものの付着物によりと思われる検出効率の低下が報告されており、その結果も参考になる。もし、OBF に何らかの有機物が付着している場合、OBF の温度を高くすると付着物を蒸発できる可能性もある。この点に関しても、検討がすすめられている。

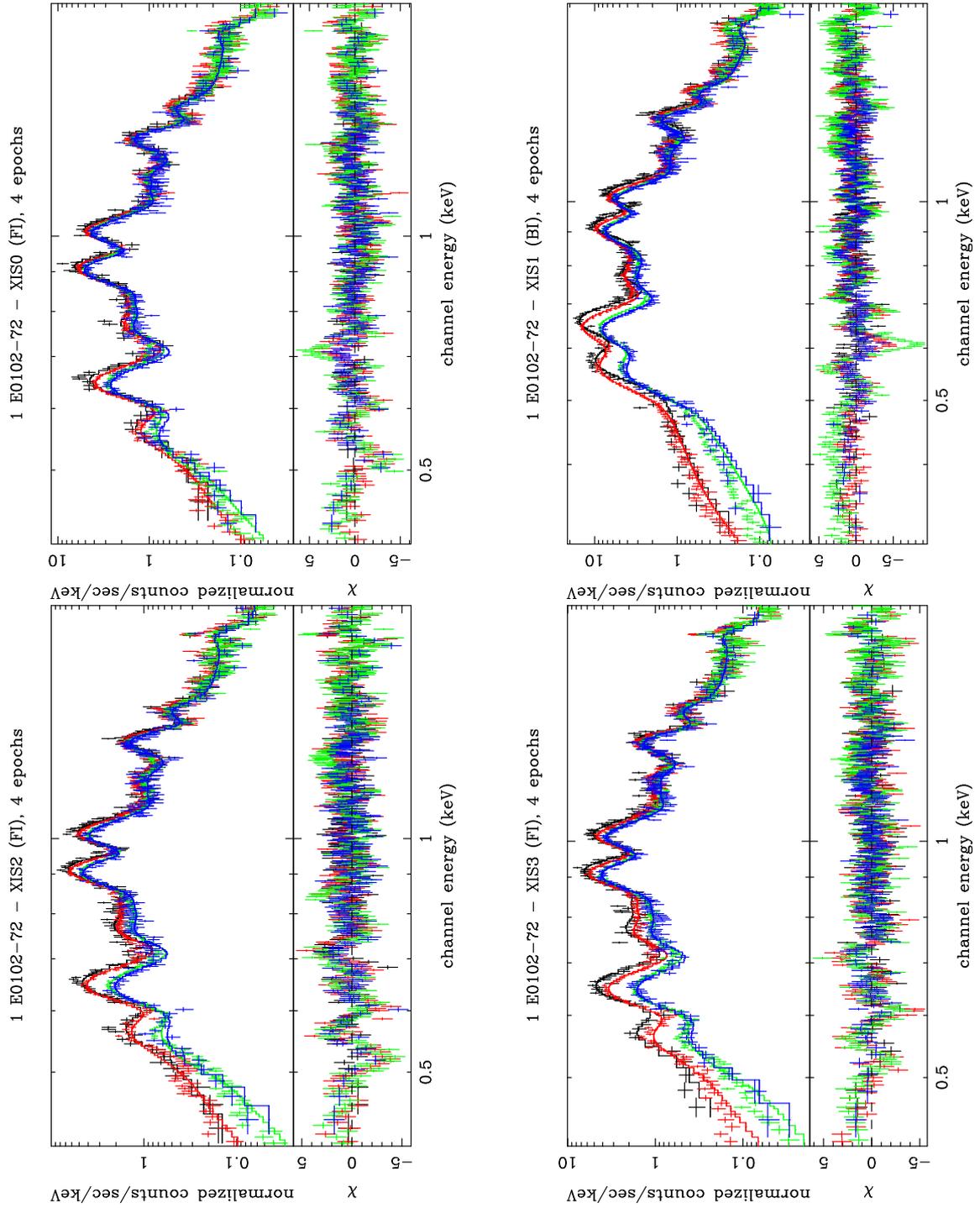


図 A.2: E0102 各センサー

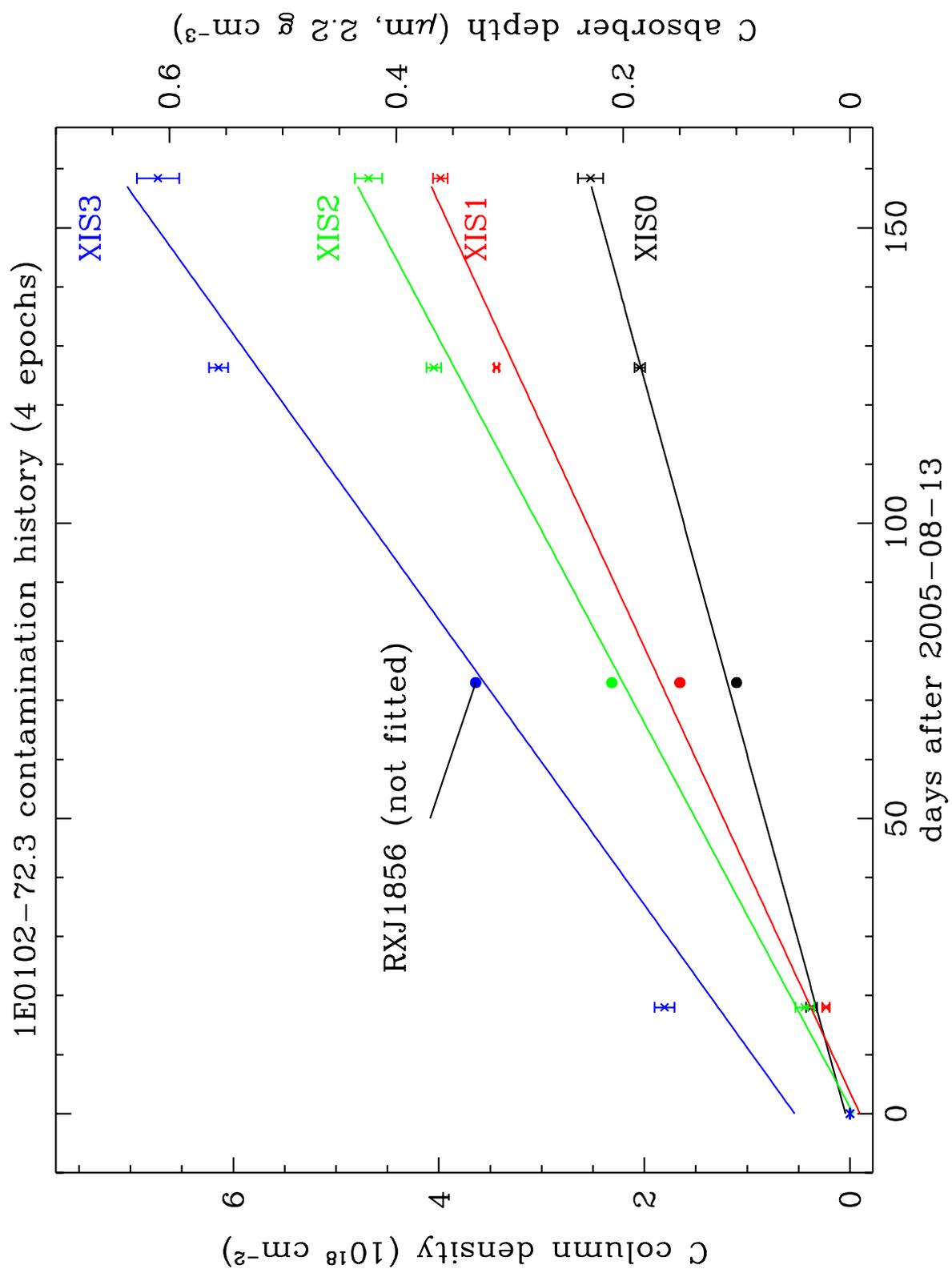


図 A.3: E01002 カウント数の時間変化。

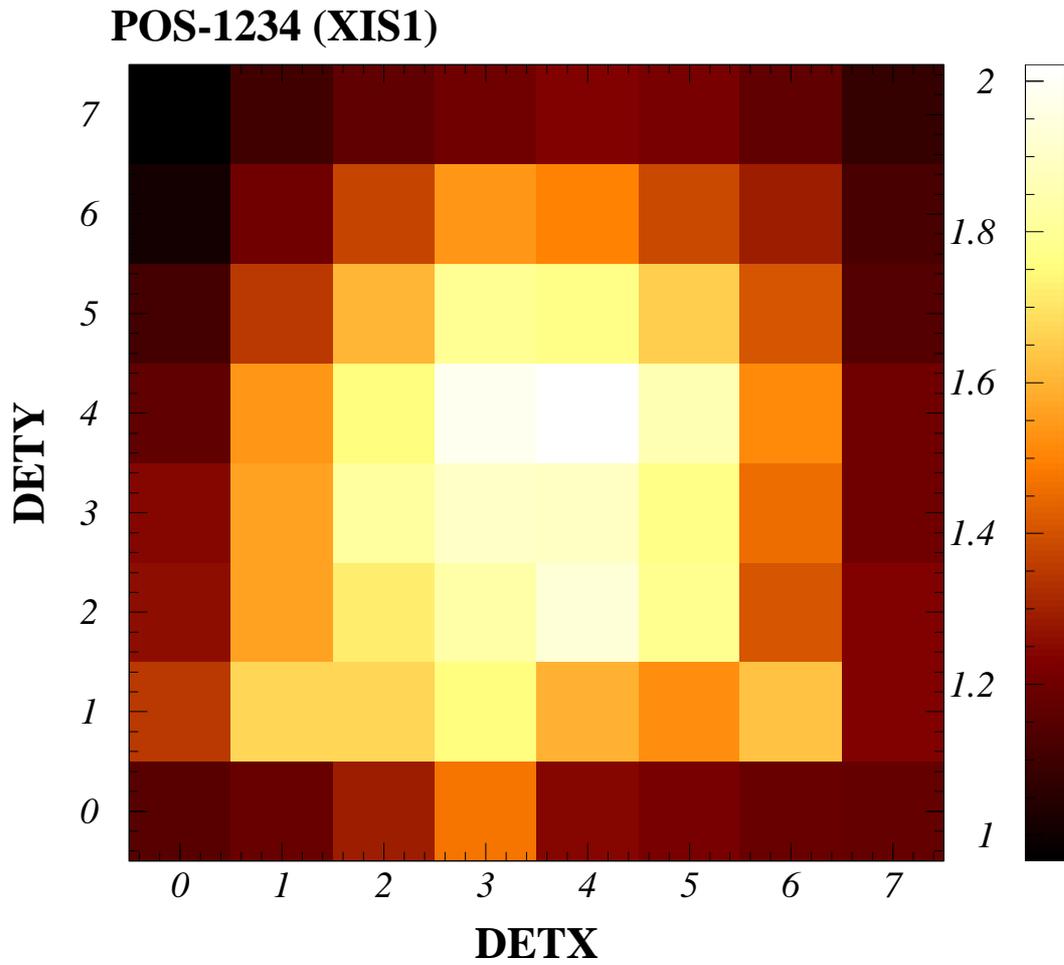


図 A.4: Cyg Loop 電離した炭素の輝線(0.36keV を含むバンド) / (中性炭素の吸収端 0.28keV 以下のバンド) のカウント数の比

付録B 地球大気による酸素・窒素輝線バックグラウンド

B.1 DYE_ELV毎のスペクトル

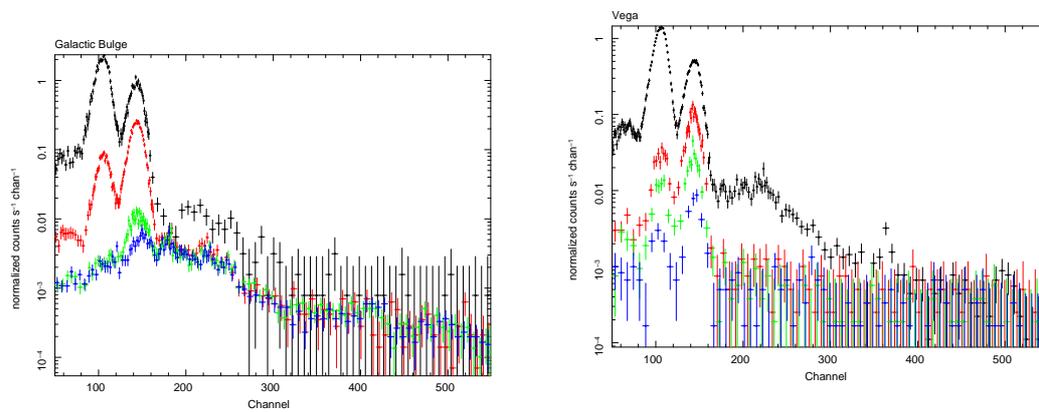


図 B.1: Vega

図 B.2: (左) Galactic Bulge (右) Vega (黒: $0 < \text{DYE_ELV} < 5$, 赤: $5 < \text{DYE_ELV} < 10$, 緑: $10 < \text{DYE_ELV} < 20$, 青: $20 < \text{DYE_ELV} < 30$)

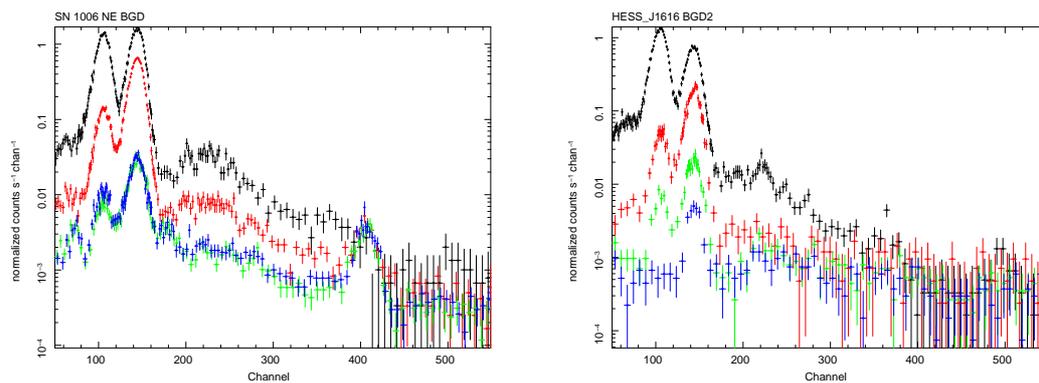


図 B.3: (左) SN1006 NE BGD (右) HESS J1616 BGD2 (黒: $0 < \text{DYE_ELV} < 5$, 赤: $5 < \text{DYE_ELV} < 10$, 緑: $10 < \text{DYE_ELV} < 20$, 青: $20 < \text{DYE_ELV} < 30$)

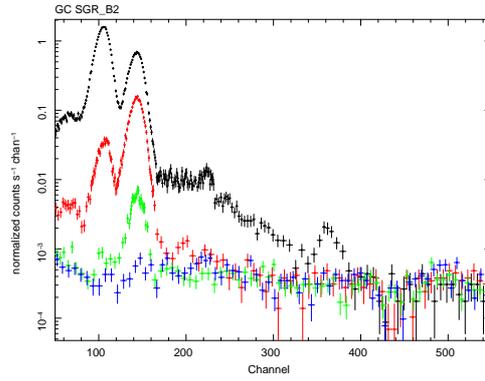
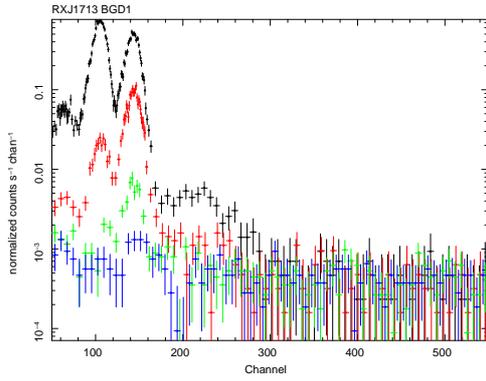


図 B.4: (左) RXJ1713 BGD1 (右)GC SGR B2 (黒: $0 < \text{DYE_ELV} < 5$, 赤: $5 < \text{DYE_ELV} < 10$, 緑: $10 < \text{DYE_ELV} < 20$, 青: $20 < \text{DYE_ELV} < 30$)

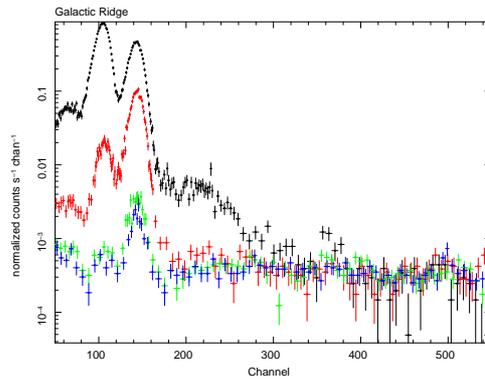
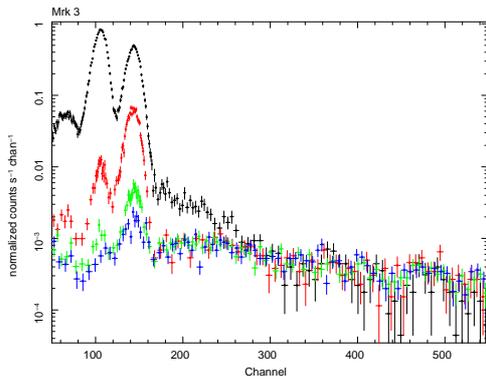


図 B.5: (左) Mrk 3 (右) Galactic Ridge (黒: $0 < \text{DYE_ELV} < 5$, 赤: $5 < \text{DYE_ELV} < 10$, 緑: $10 < \text{DYE_ELV} < 20$, 青: $20 < \text{DYE_ELV} < 30$)

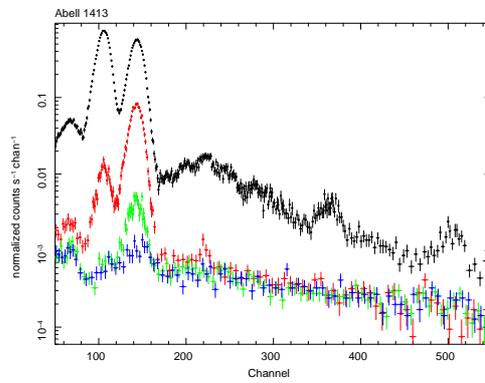
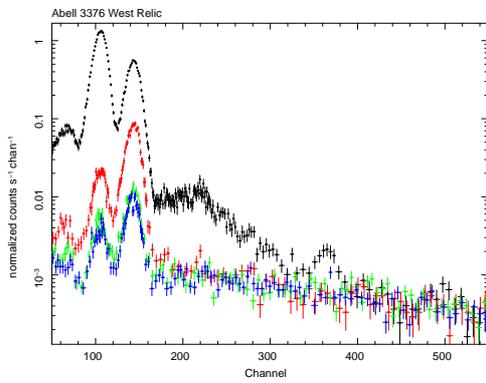


図 B.6: (左) Abell 3376 West Relic (右) Abell 1413 (黒: $0 < \text{DYE_ELV} < 5$, 赤: $5 < \text{DYE_ELV} < 10$, 緑: $10 < \text{DYE_ELV} < 20$, 青: $20 < \text{DYE_ELV} < 30$)

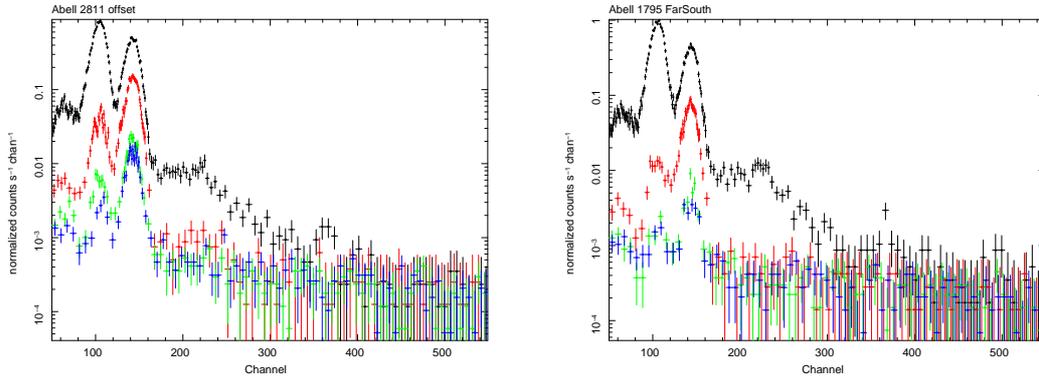


図 B.7: (左) Abell 2811 offset (右) Abell 1795 FarSouth (黒: $0 < \text{DYE_ELV} < 5$, 赤: $5 < \text{DYE_ELV} < 10$, 緑: $10 < \text{DYE_ELV} < 20$, 青: $20 < \text{DYE_ELV} < 30$)

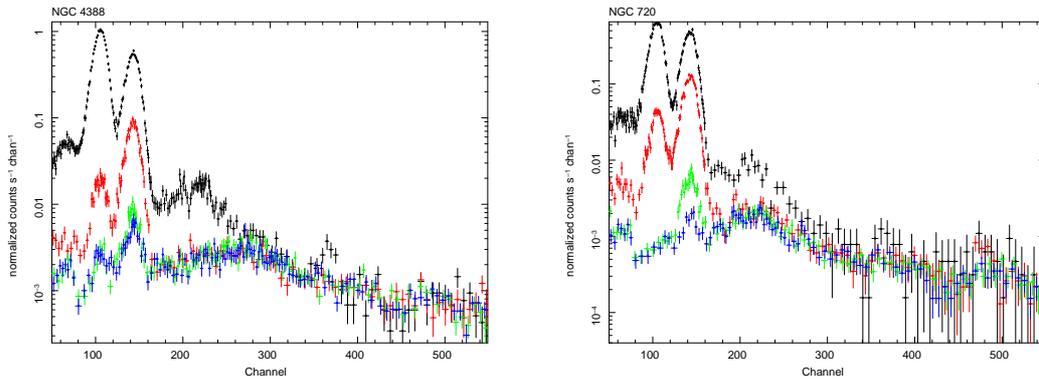


図 B.8: (左) NGC 4388 (右) NGC 720 (黒: $0 < \text{DYE_ELV} < 5$, 赤: $5 < \text{DYE_ELV} < 10$, 緑: $10 < \text{DYE_ELV} < 20$, 青: $20 < \text{DYE_ELV} < 30$)

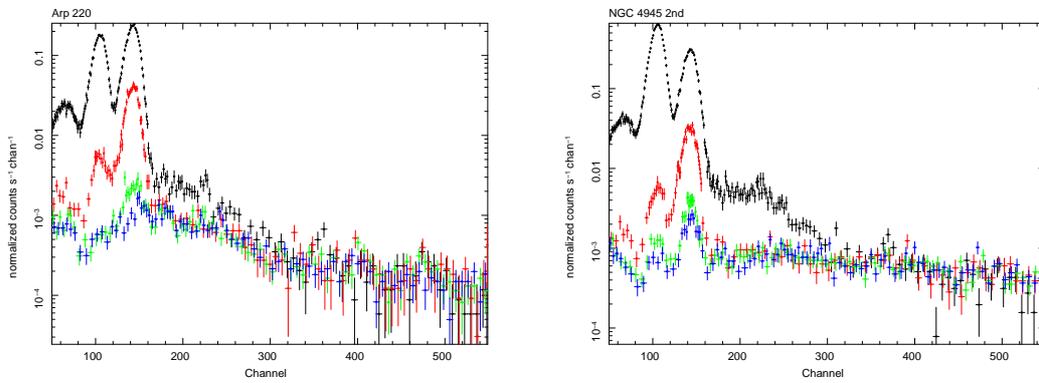


図 B.9: (左) Arp 220 (右) NGC 4945 2nd (黒: $0 < \text{DYE_ELV} < 5$, 赤: $5 < \text{DYE_ELV} < 10$, 緑: $10 < \text{DYE_ELV} < 20$, 青: $20 < \text{DYE_ELV} < 30$)

B.2 DYE_ELIV 毎の Light Curve

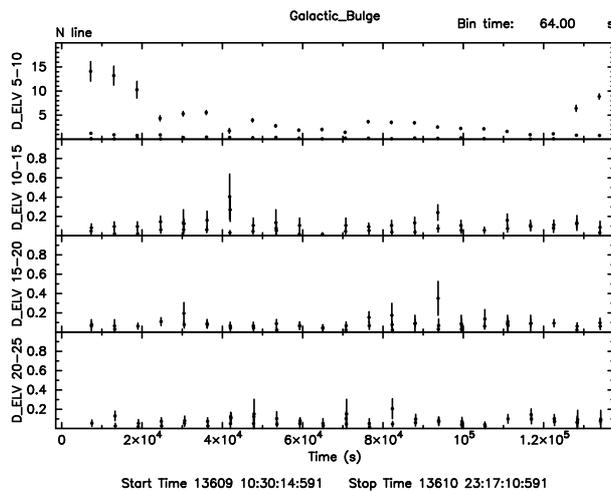


図 B.10: Galactic Bulge 窒素蛍光輝線の Light Curve。

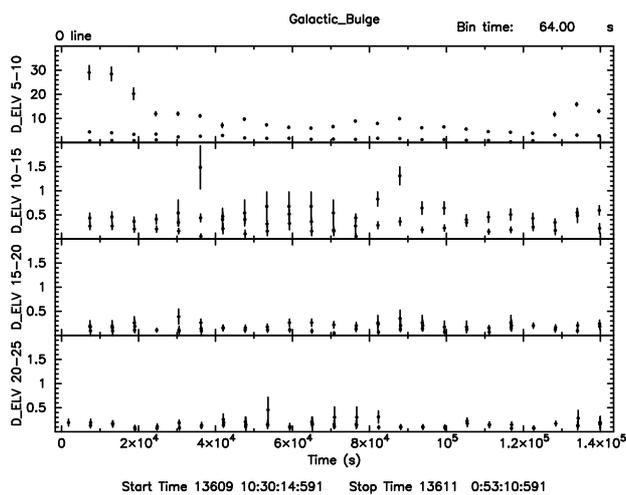


図 B.11: Galactic Bulge 酸素蛍光輝線の Light Curve。

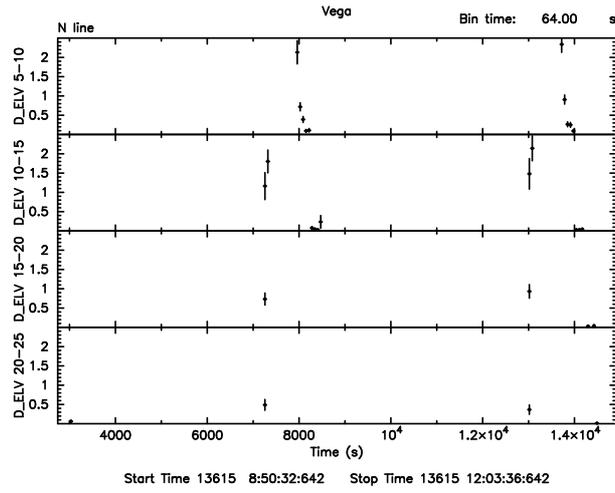


図 B.12: Vega 窒素蛍光輝線の Light Curve.

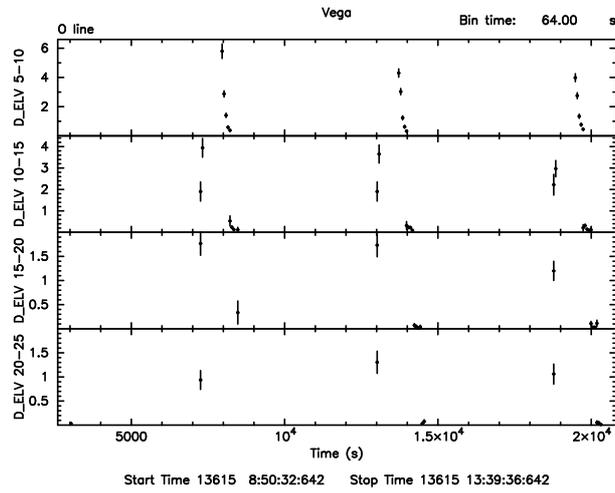


図 B.13: Vega 酸素蛍光輝線の Light Curve.

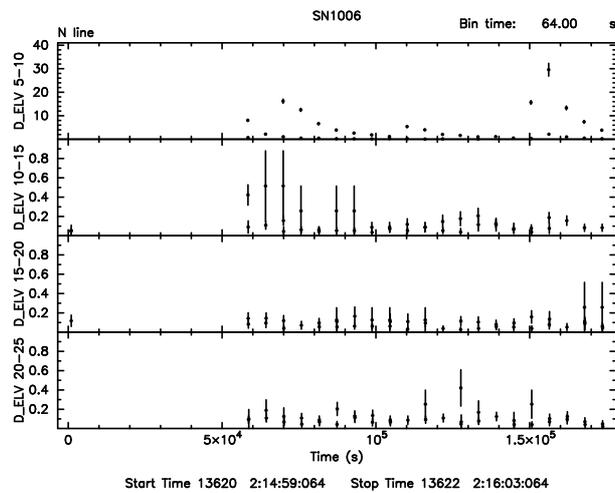


図 B.14: SN1006 NE BGD 窒素蛍光輝線の Light Curve.

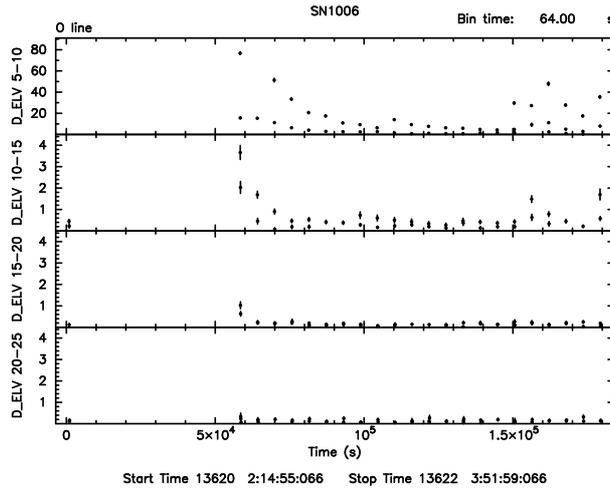


図 B.15: SN1006 NE BGD 酸素蛍光輝線 の Light Curve.

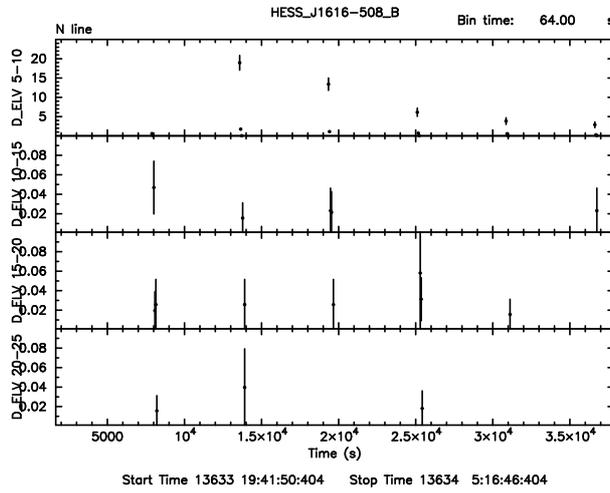


図 B.16: HESS J1616 BGD 窒素蛍光輝線 の Light Curve.

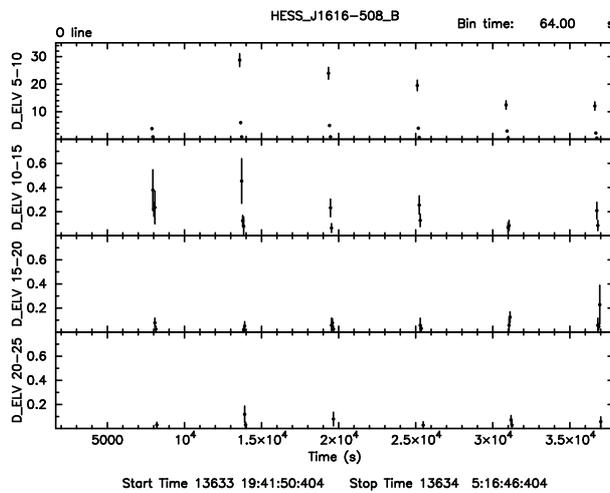


図 B.17: HESS J1616 BGD 酸素蛍光輝線 の Light Curve.

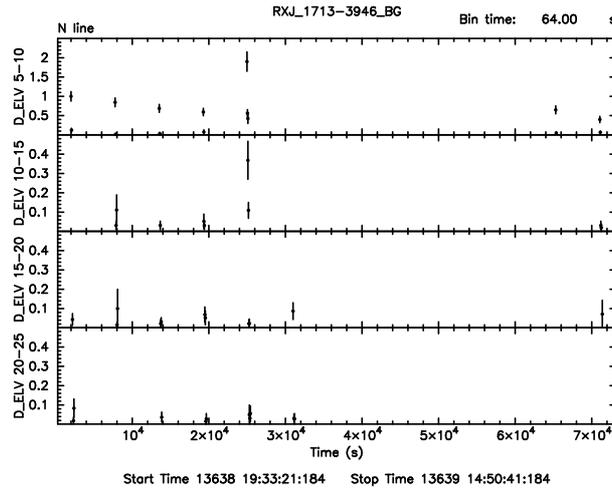


図 B.18: RXJ1713 BGD1 窒素蛍光輝線の Light Curve。

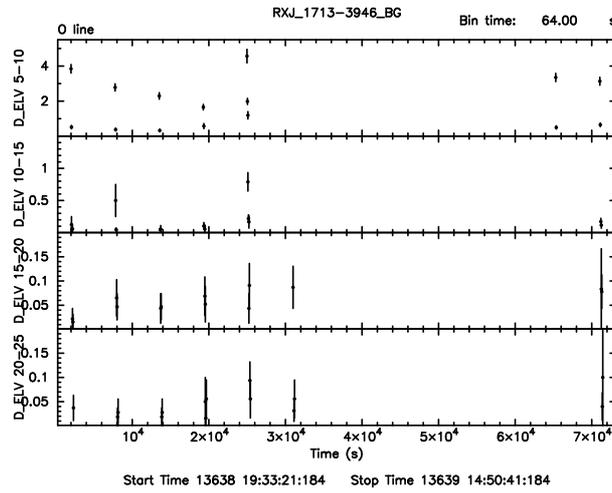


図 B.19: RXJ1713 BGD1 酸素蛍光輝線の Light Curve。

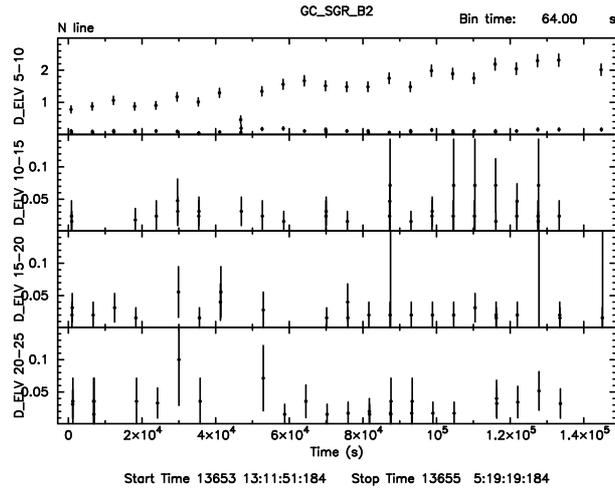


図 B.20: GC SGR B2 窒素蛍光輝線の Light Curve。

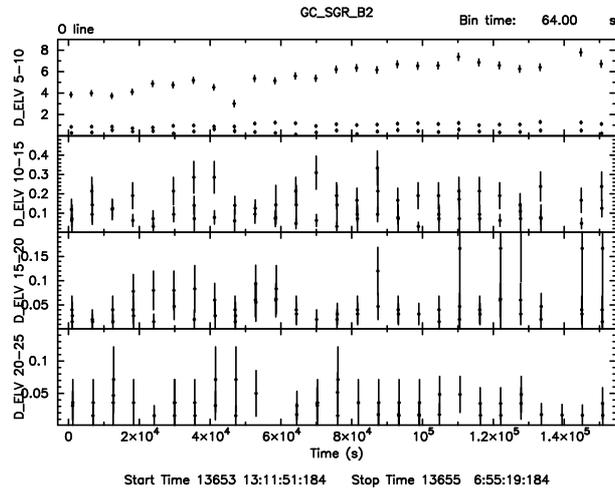


図 B.21: GC SGR B2 酸素蛍光輝線の Light Curve。

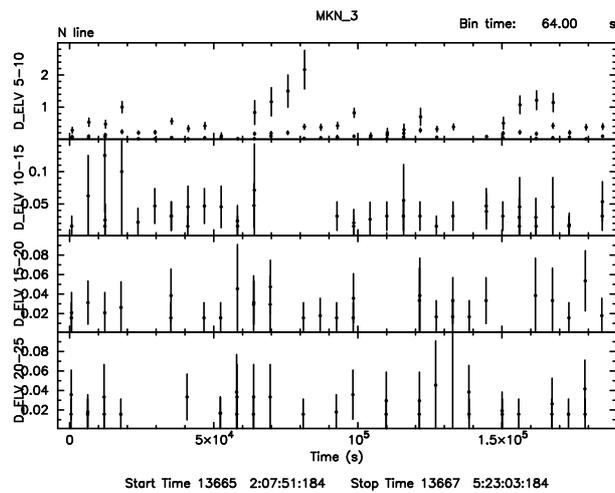


図 B.22: Mrk 3 窒素蛍光輝線の Light Curve。

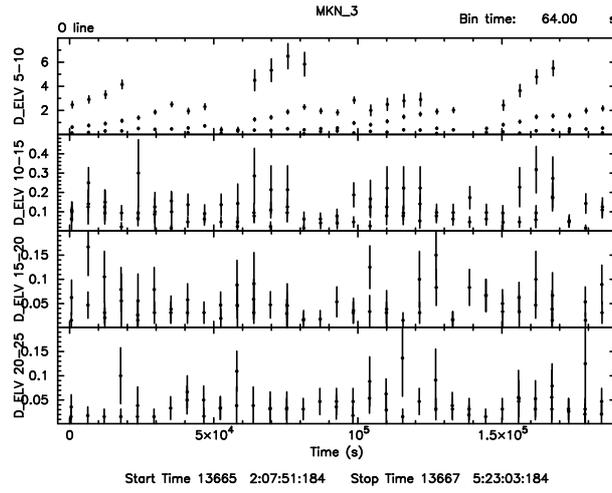


図 B.23: Mrk 3 酸素蛍光輝線の Light Curve。

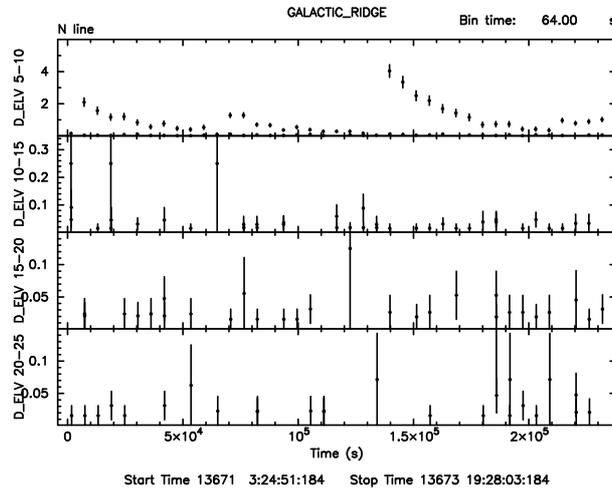


図 B.24: Galactic Ridge 窒素蛍光輝線の Light Curve。

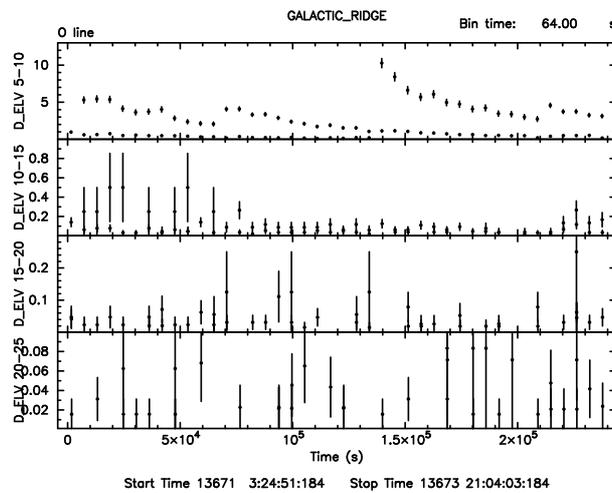


図 B.25: Galactic Ridge 酸素蛍光輝線の Light Curve。

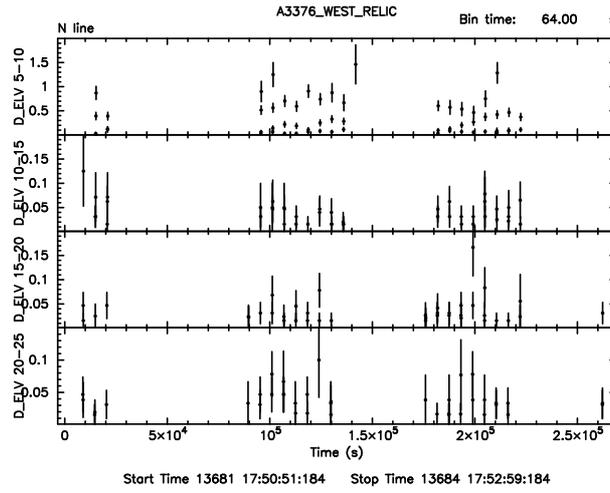


図 B.26: Abell 3376 West Relic 窒素蛍光輝線の Light Curve。

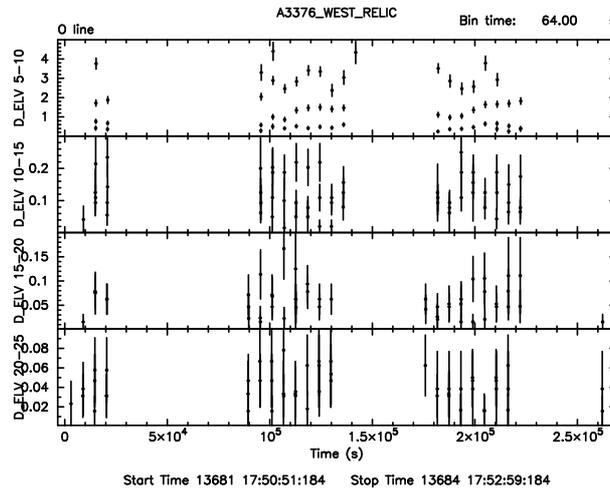


図 B.27: Abell 3376 West Relic 酸素蛍光輝線の Light Curve。

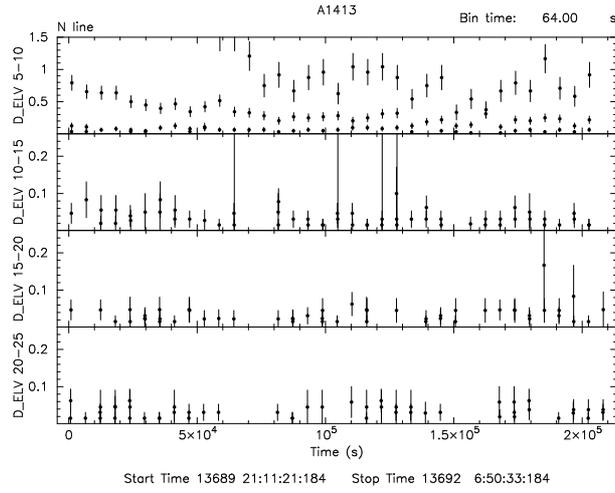


図 B.28: Abell 1413 窒素蛍光輝線の Light Curve。

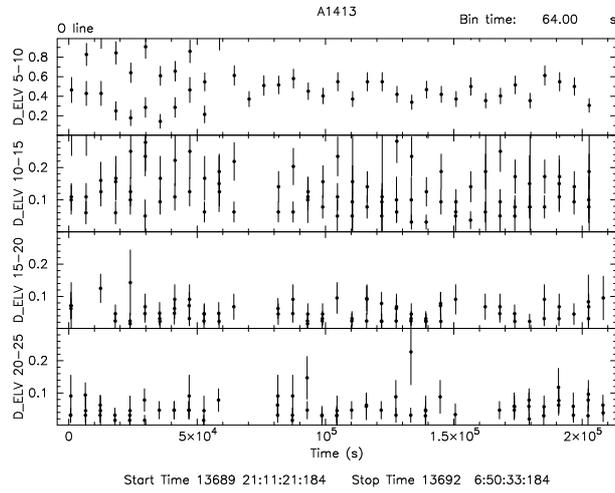


図 B.29: Abell 1413 酸素蛍光輝線の Light Curve。

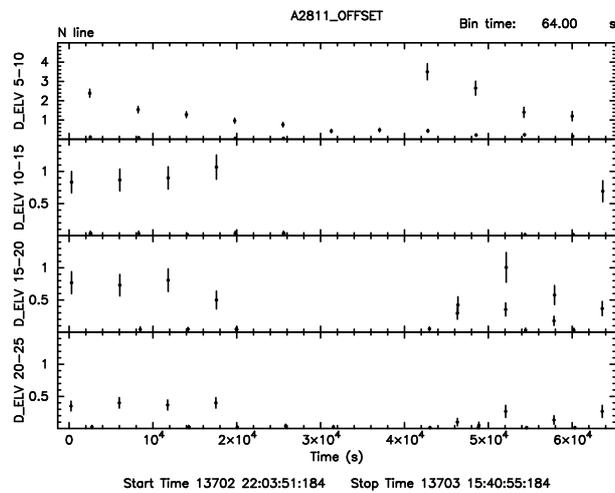


図 B.30: Abell 2811 offset 窒素蛍光輝線の Light Curve。

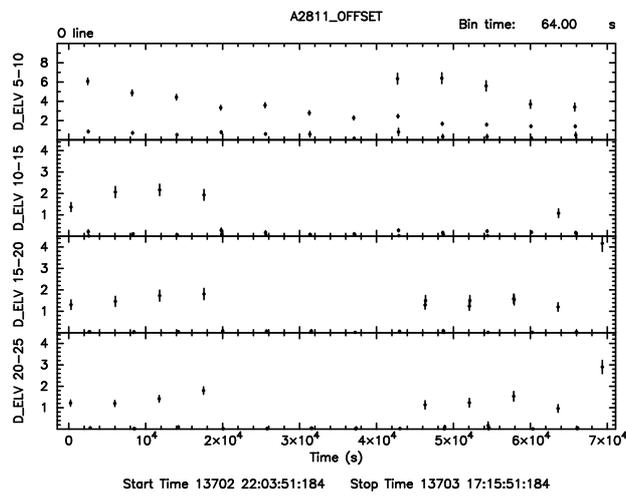


図 B.31: Abell 2811 offset 酸素蛍光輝線の Light Curve。

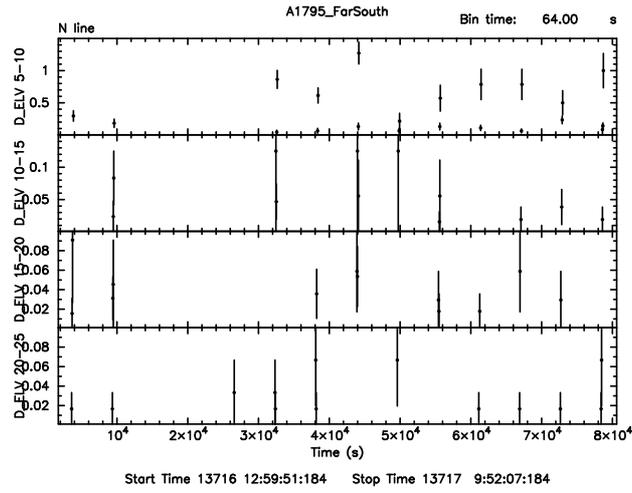


図 B.32: Abell 1795 FarSouth 窒素蛍光輝線の Light Curve。

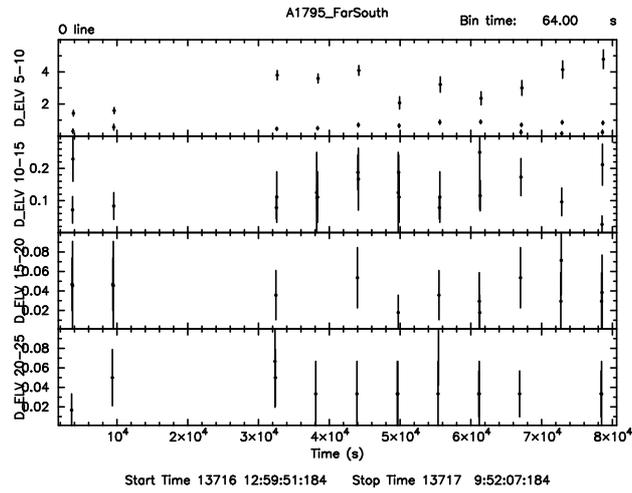


図 B.33: Abell 1795 FarSouth 酸素蛍光輝線の Light Curve。

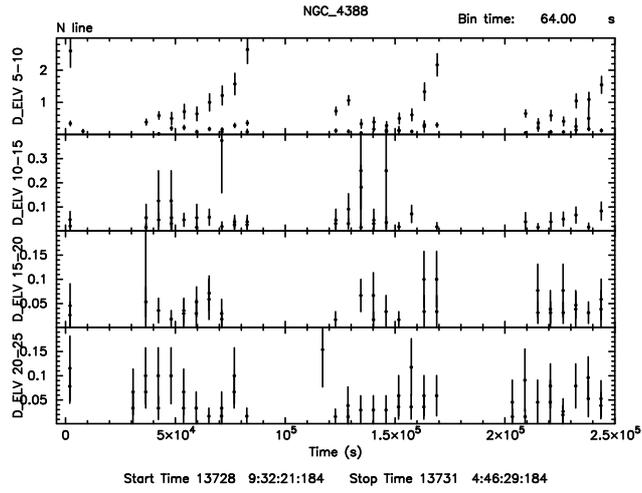


図 B.34: NGC 4388 窒素蛍光輝線の Light Curve。

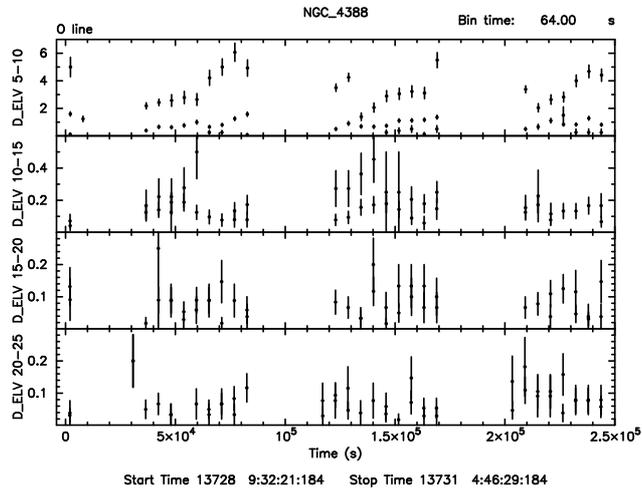


図 B.35: NGC 4388 酸素蛍光輝線の Light Curve。

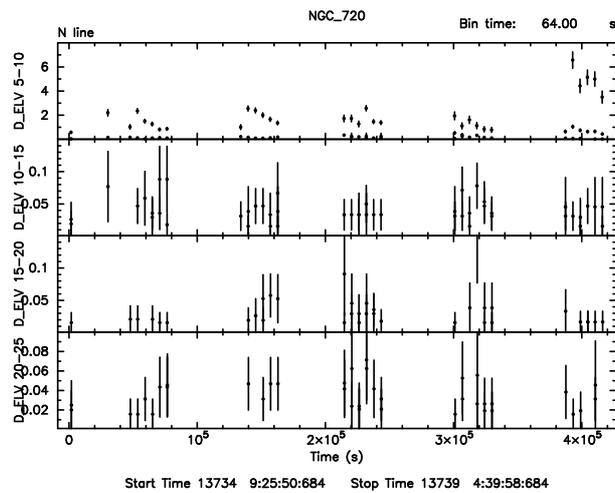


図 B.36: NGC 720 窒素蛍光輝線の Light Curve。

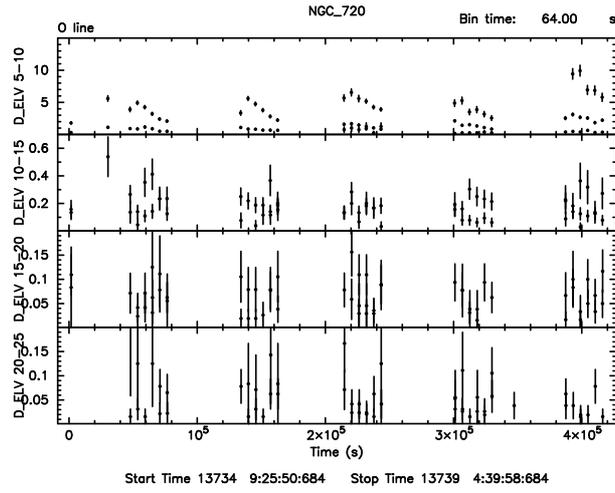


図 B.37: NGC 720 酸素蛍光輝線の Light Curve.

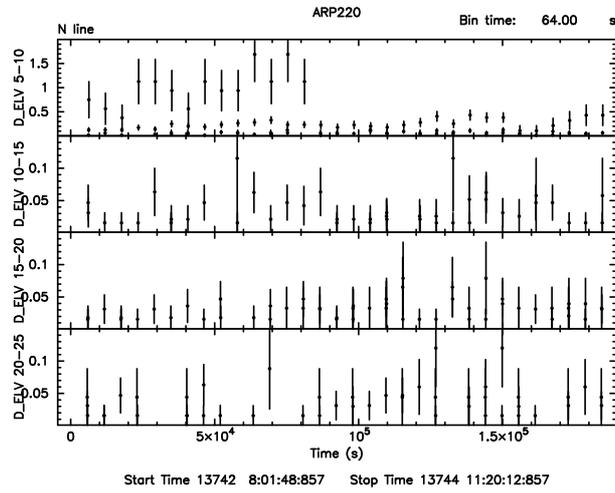


図 B.38: Arp 220 窒素蛍光輝線の Light Curve.

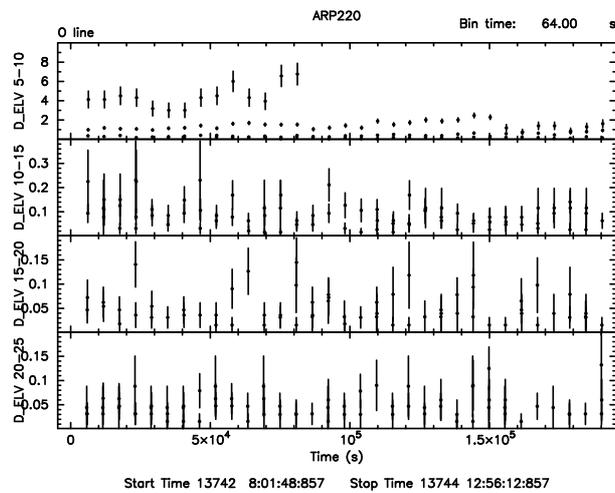


図 B.39: Arp 220 酸素蛍光輝線の Light Curve.

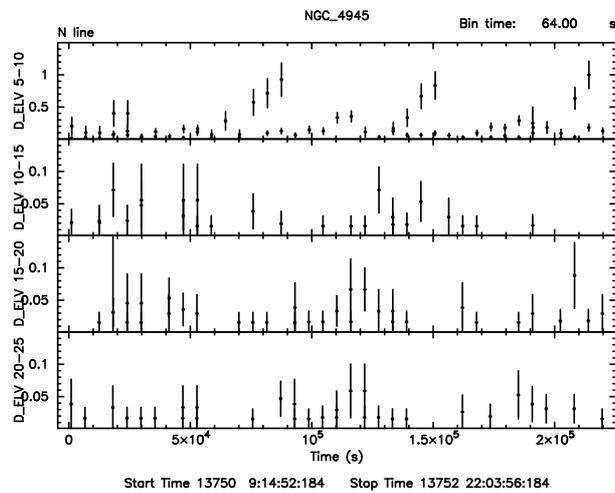


図 B.40: NGC 4945 2nd 窒素蛍光輝線の Light Curve。

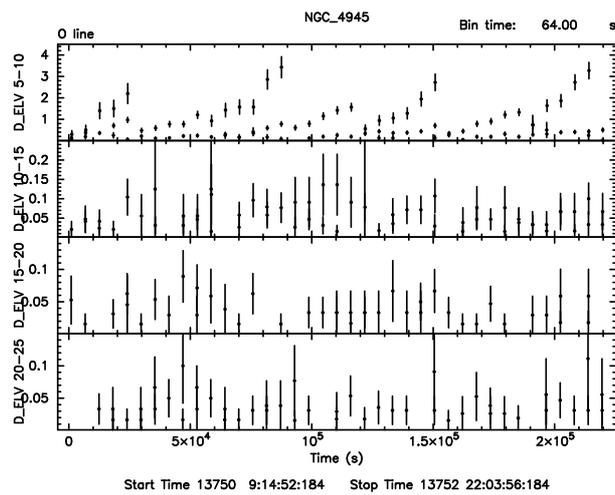


図 B.41: NGC 4945 2nd 酸素蛍光輝線の Light Curve。

B.3 全データを重ね合わせ

窒素、酸素の蛍光輝線のエネルギー帯の画像を、エレベーション毎で足し合わせた。足し合わせたデータは、Galactic Ridge North Ecliptic Pole, Abell 1413, Abell 1795 Far South, Abell 3376 West Relic, Arp 220, Galactic Center SGR_B2, HESS J1616_BGD2, Mrk 3, NGC 4388, NGC 4945, NGC 720, RXJ1713_BGD。

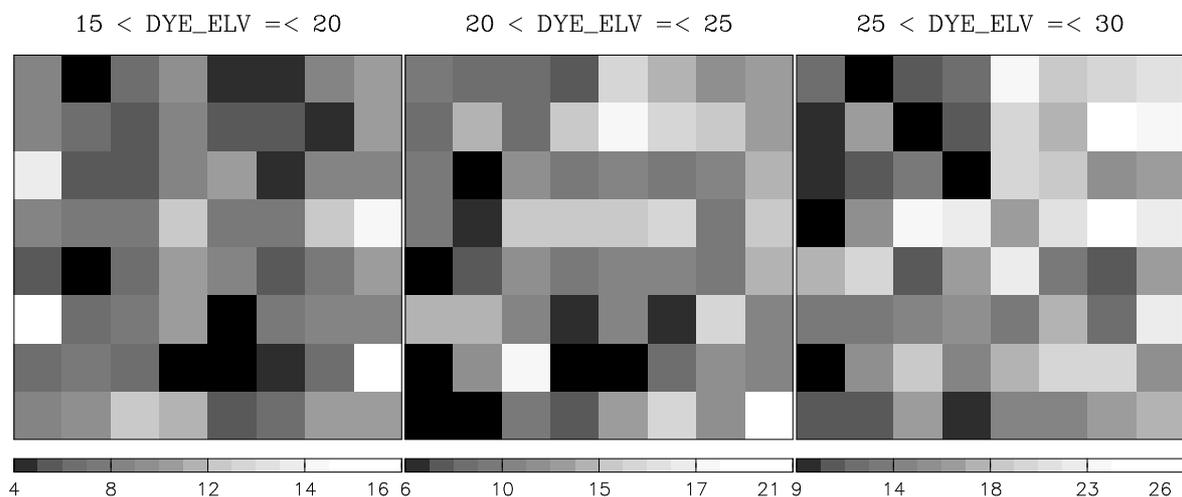


図 B.42: 昼地球の淵からのエレベーション毎で重ね合わせた、窒素蛍光輝線バンド画像。

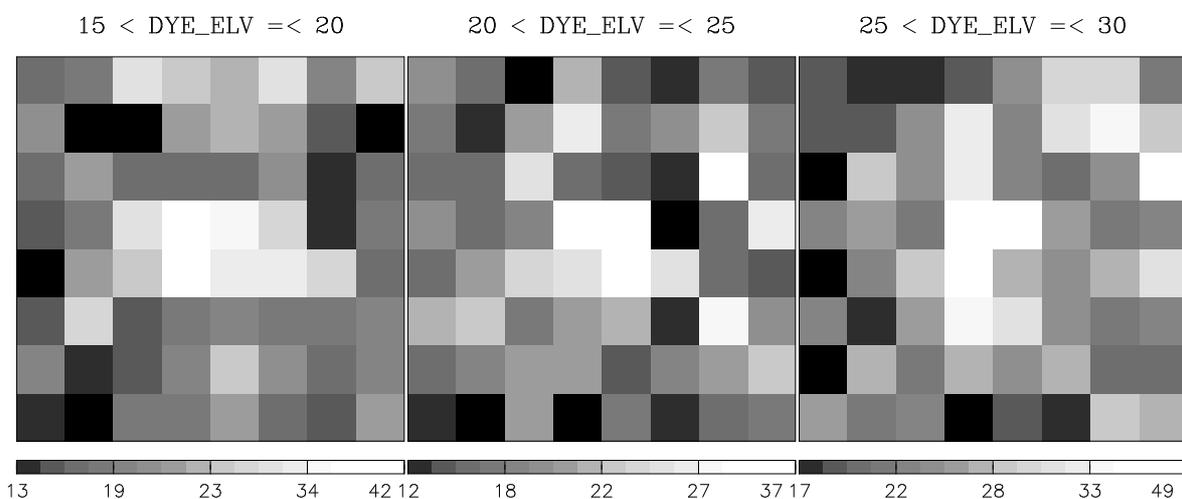


図 B.43: 昼地球の淵からのエレベーション毎で重ね合わせた、酸素蛍光輝線バンド画像。

B.4 窒素蛍光輝線バンドのイメージ

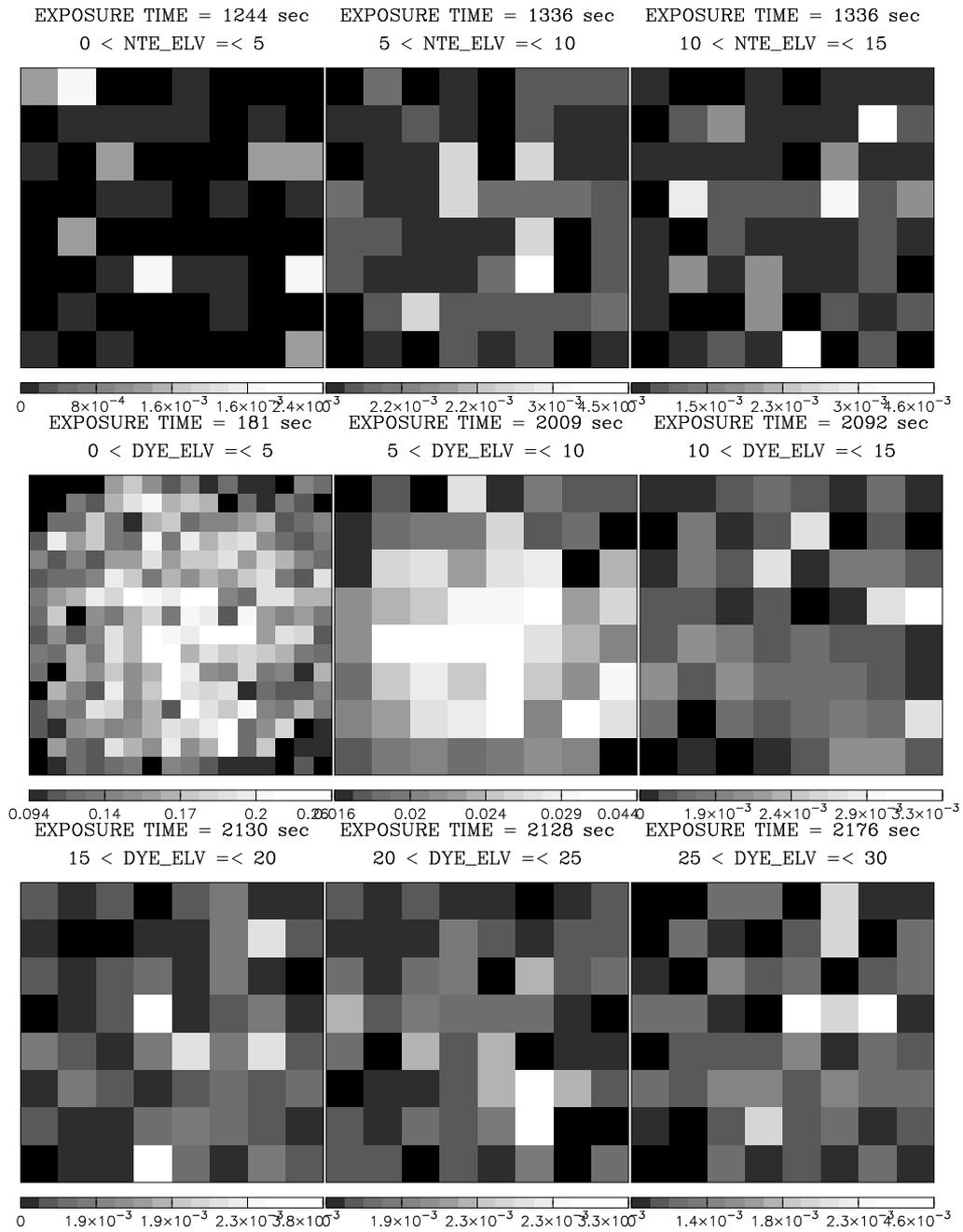


図 B.44: Galactic Bulge 窒素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

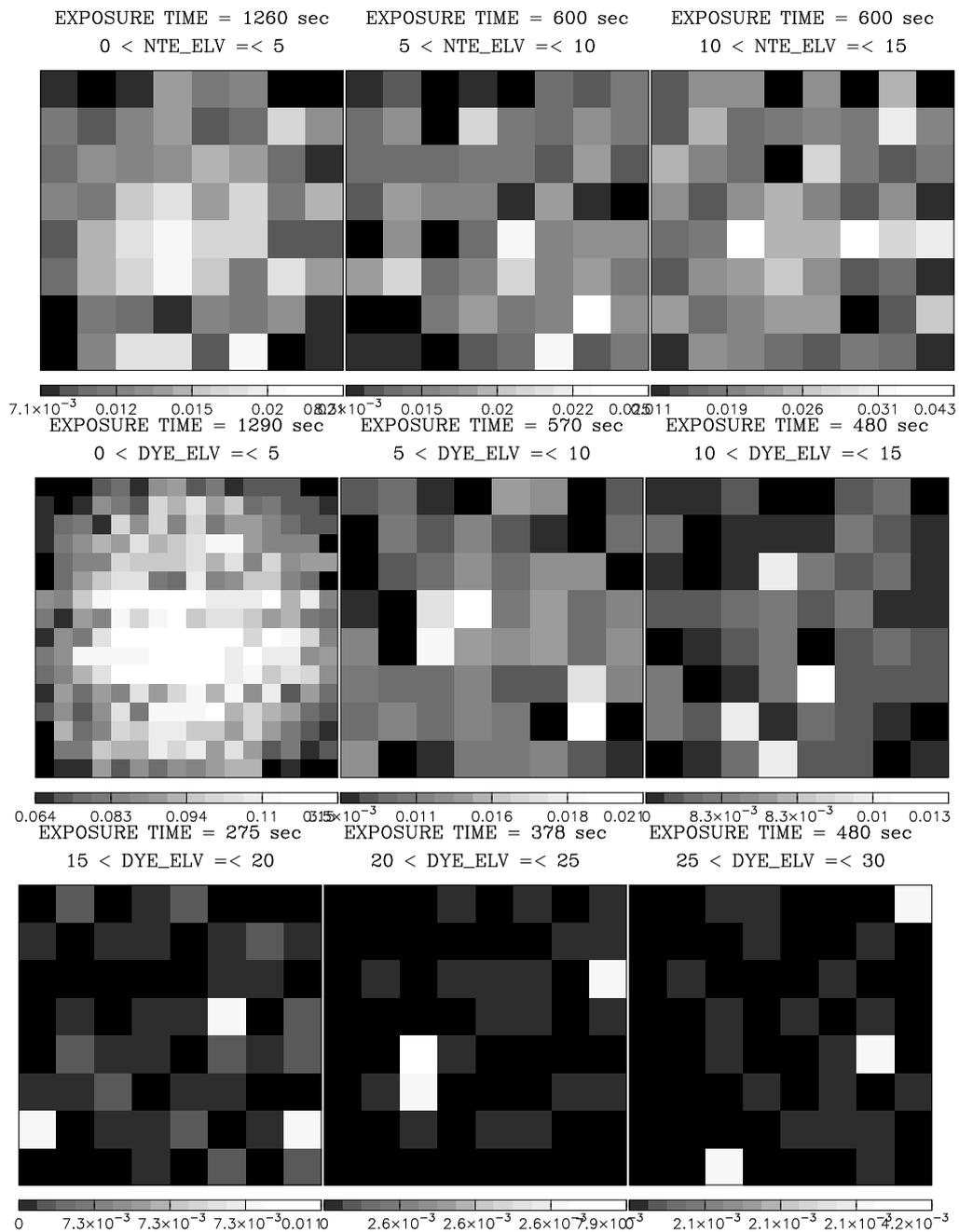


図 B.45: Vega 窒素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

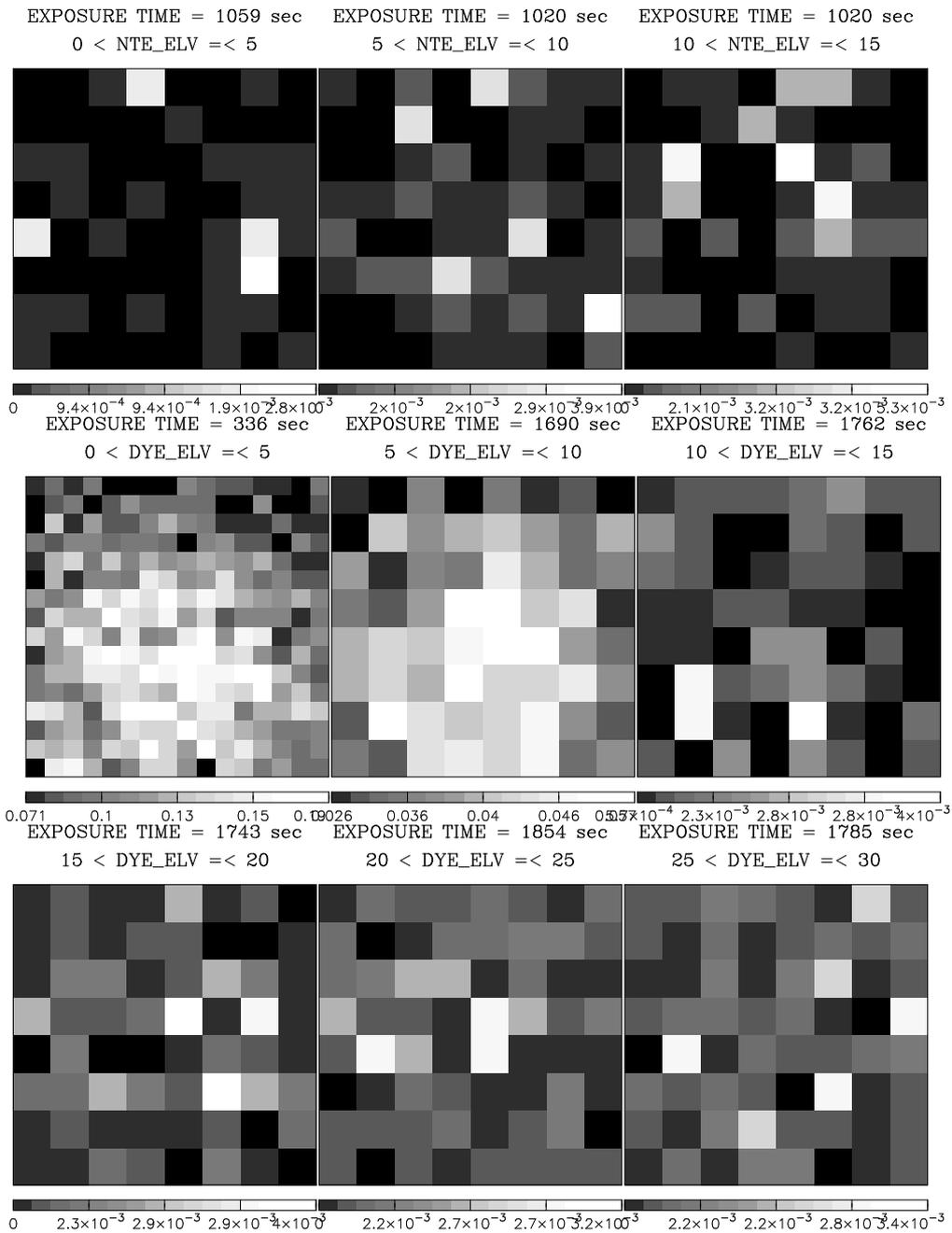


図 B.46: SN1006_NE_BGD 窒素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

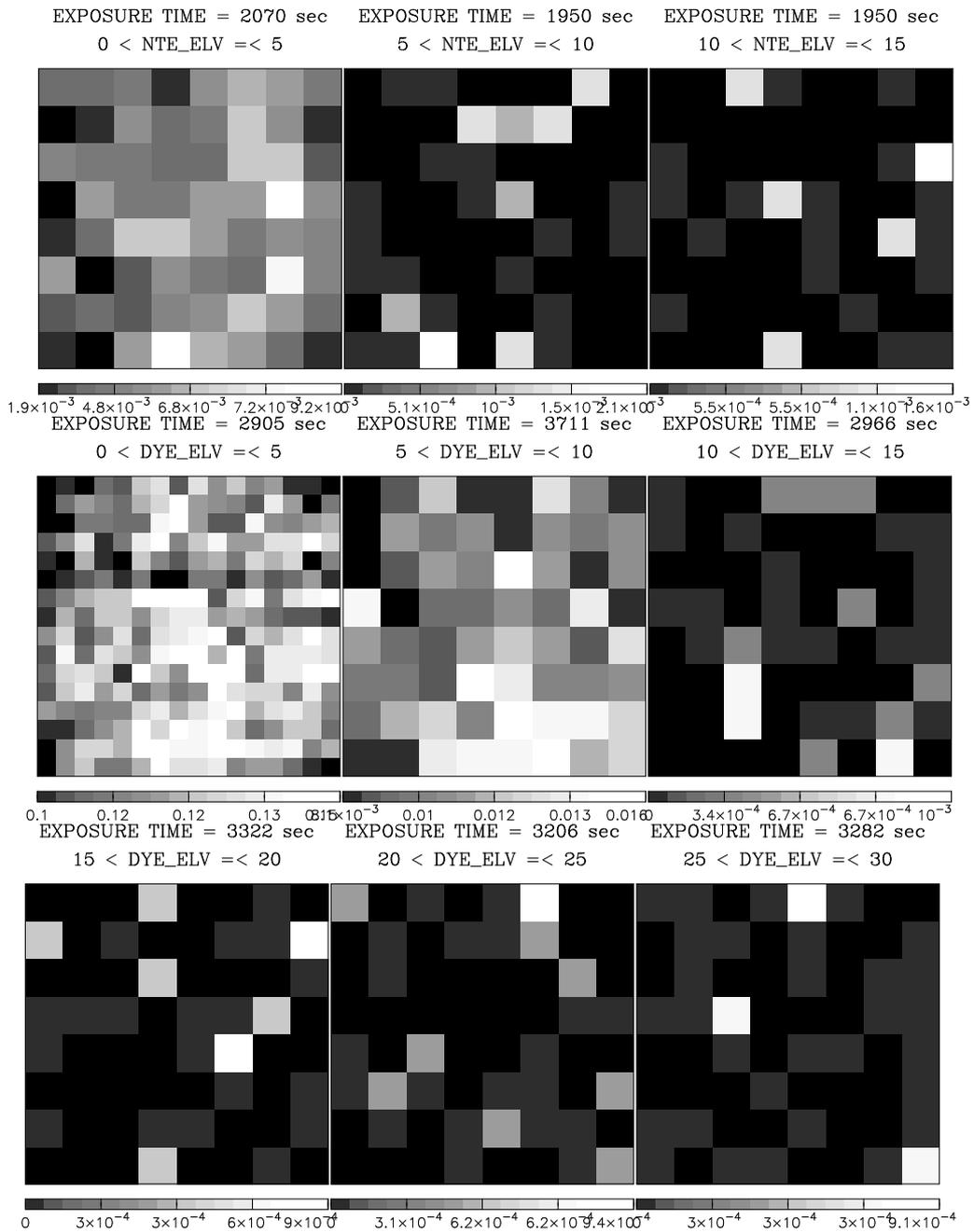


図 B.47: GC SGR B2 窒素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

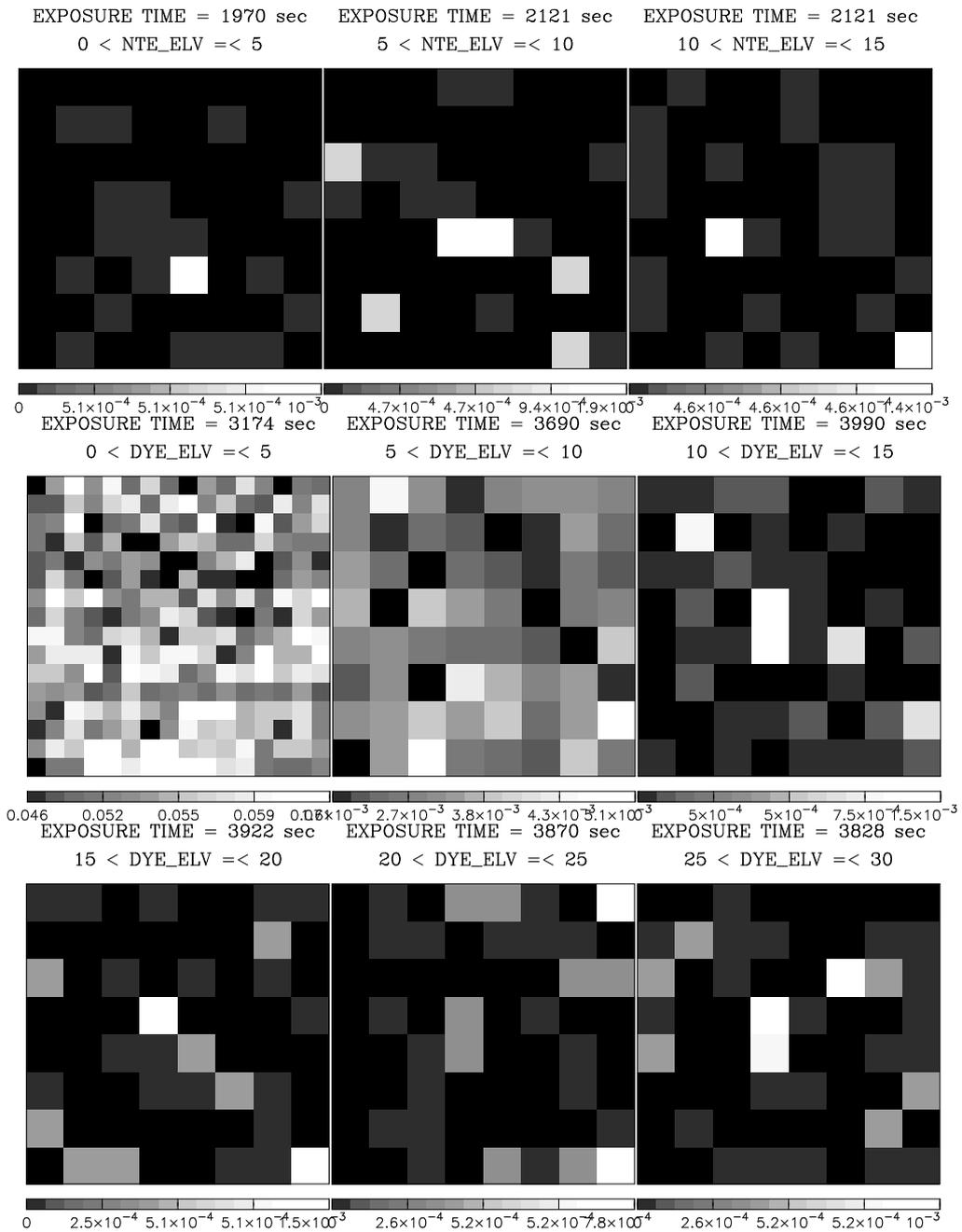


図 B.48: Mrk 3 窒素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

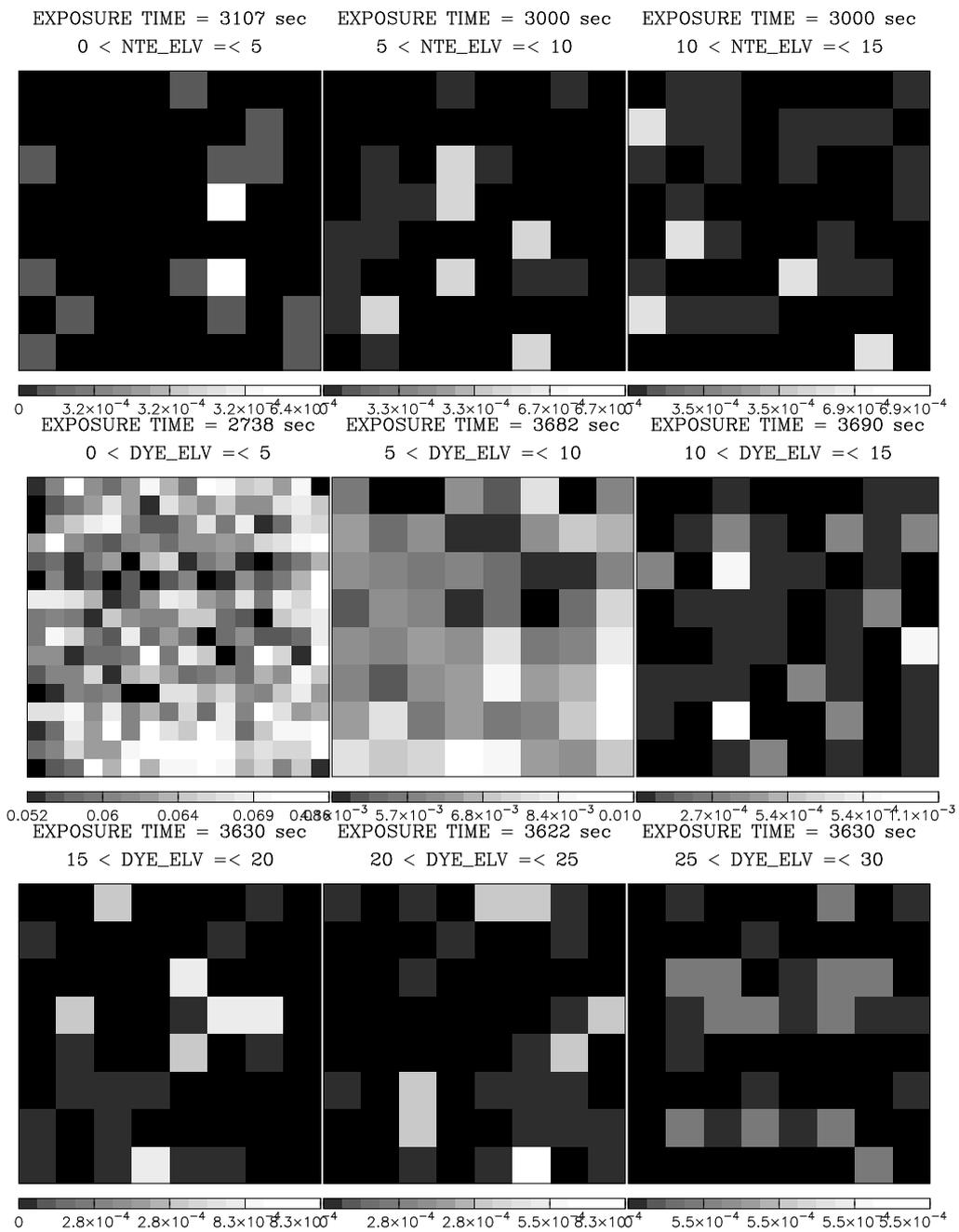


図 B.49: Galactic Ridge 窒素蛍光輝線バンドのイメージ。スケール・バーはカウントレートを表している。

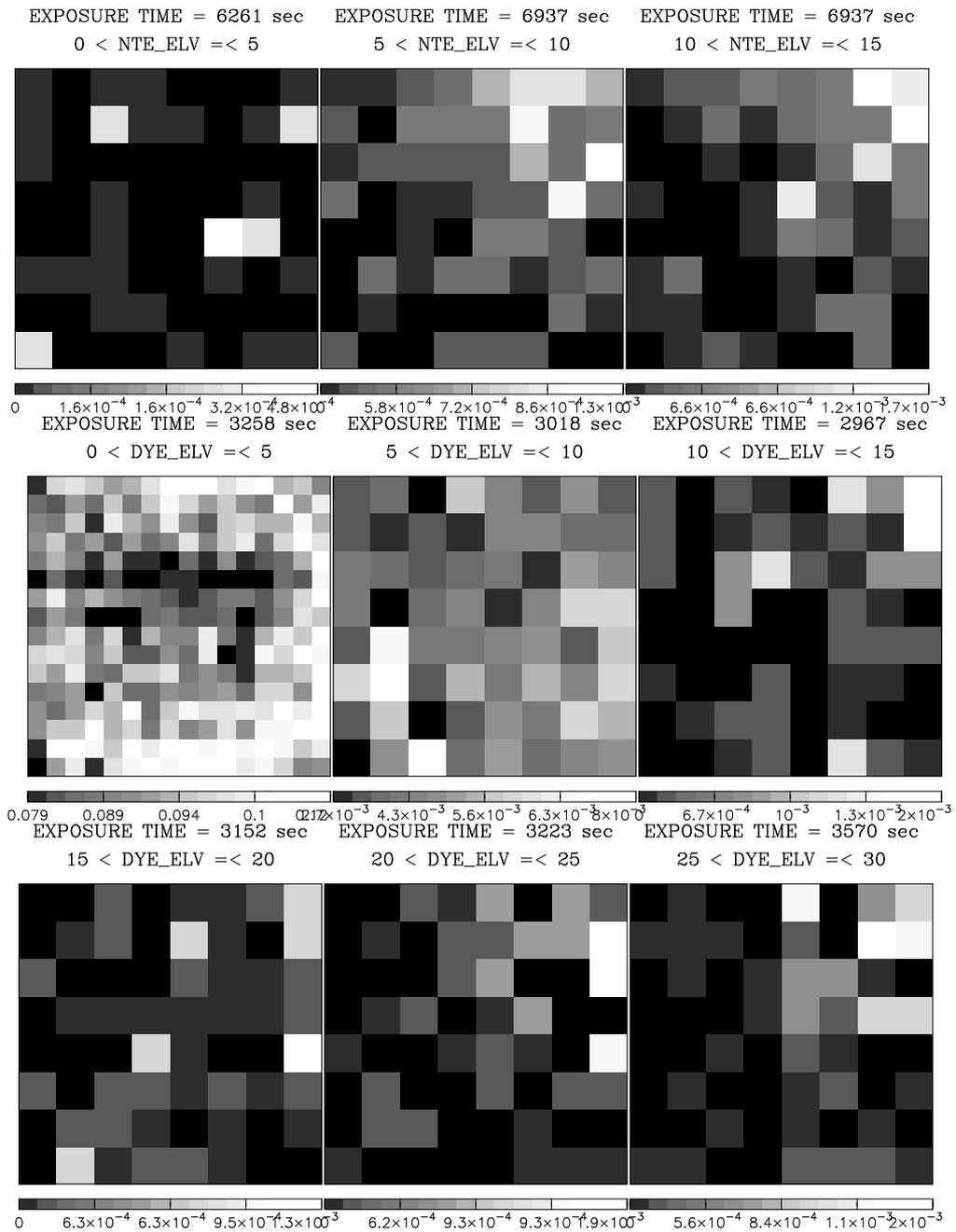


図 B.50: Abell 1413 窒素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

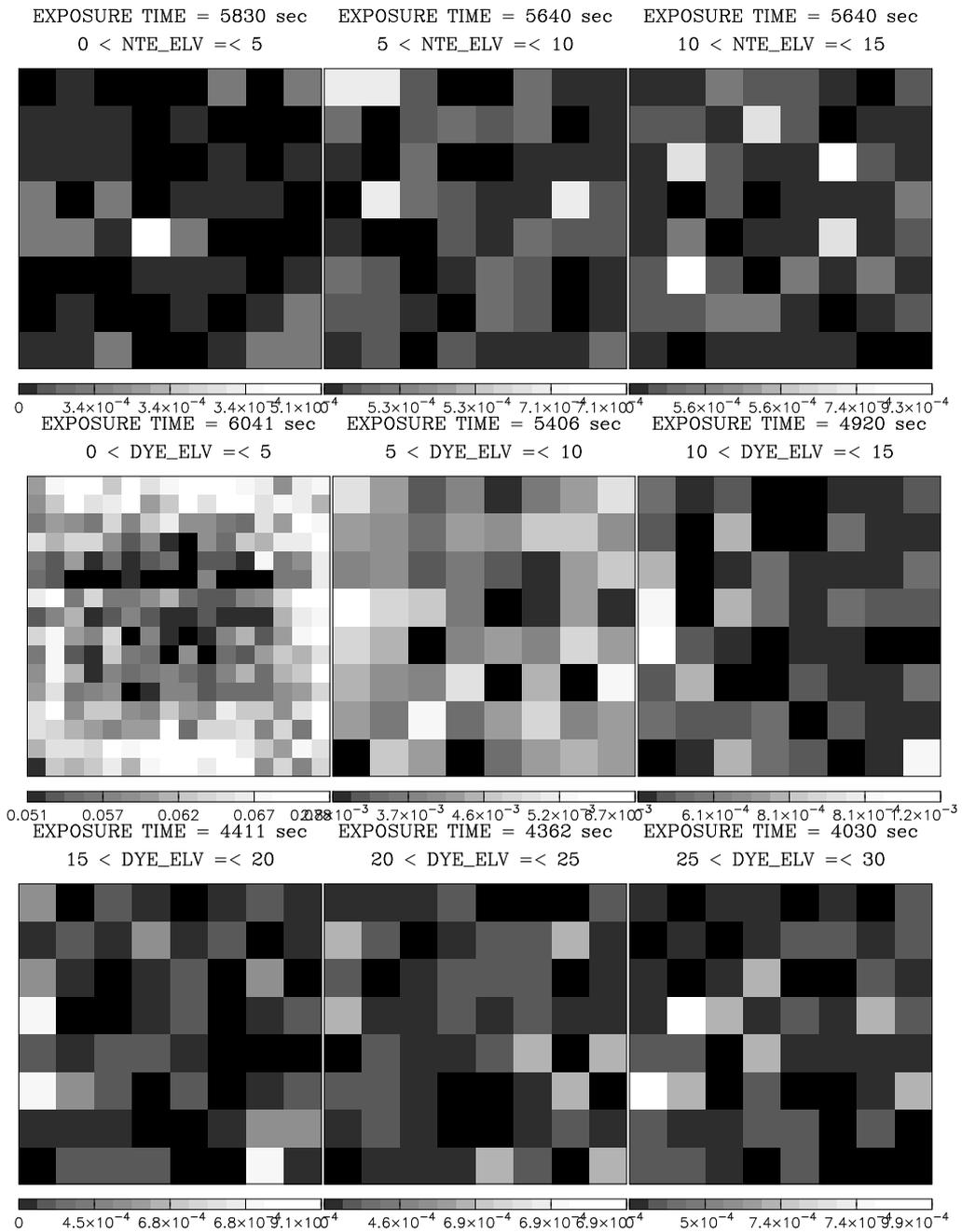


図 B.51: Abell 1413 窒素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

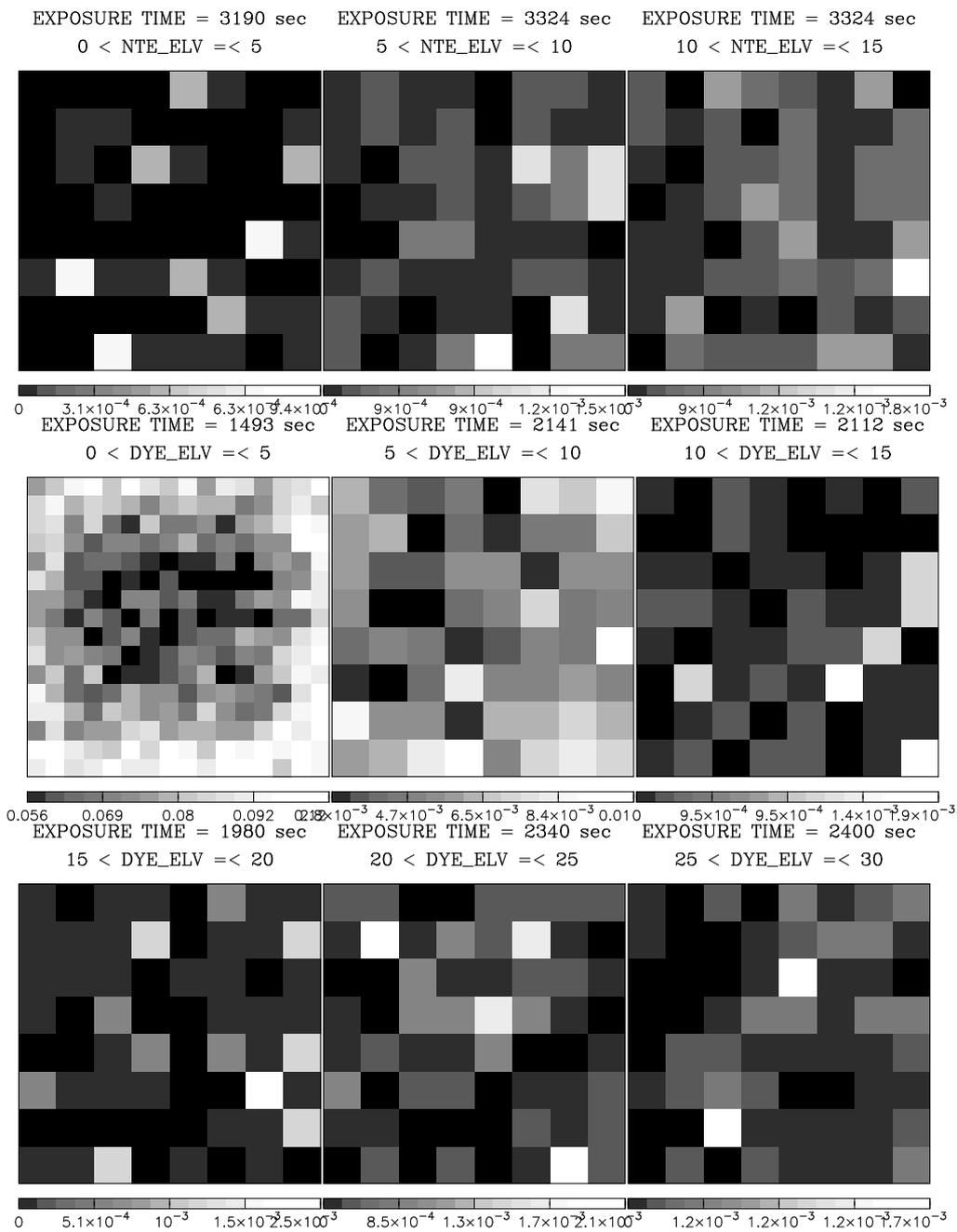


図 B.52: NGC 4388 窒素蛍光輝線バンド (15 < DYE_ELV < 30) スケール・バーはカウントレートを表している。

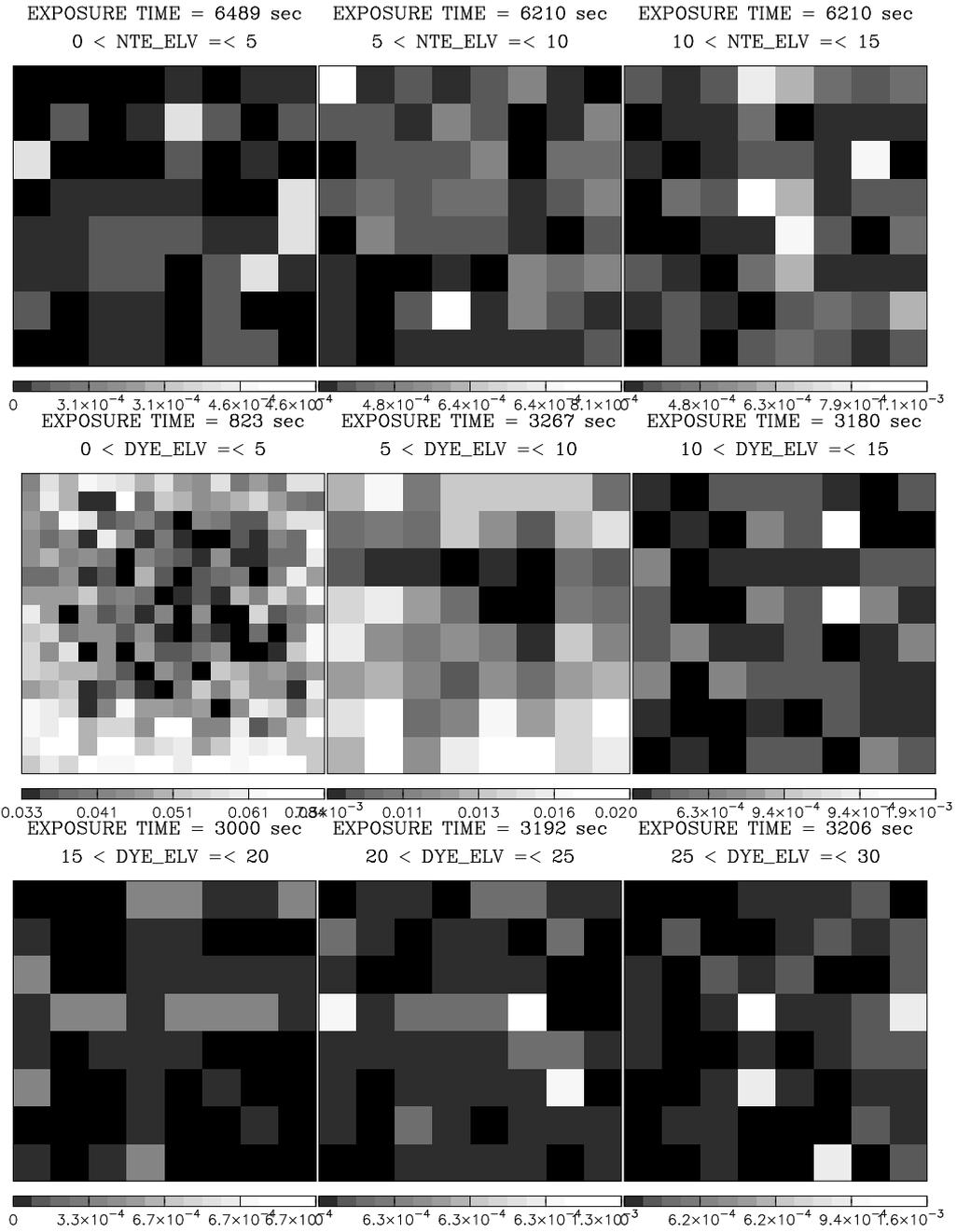


図 B.53: NGC 720 窒素蛍光輝線バンドスケール・バーはカウントレートを表している。

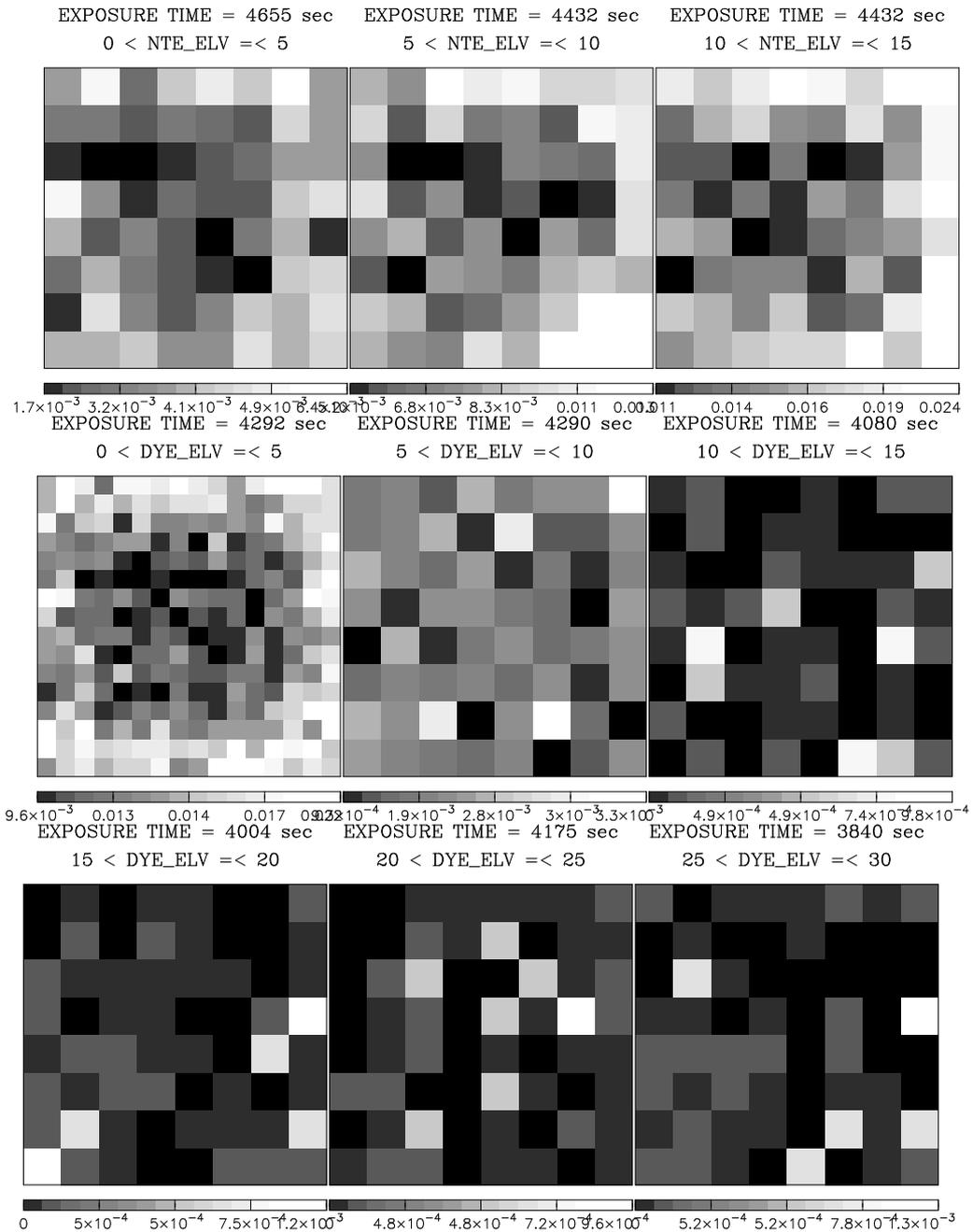


図 B.54: Arp 220 窒素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

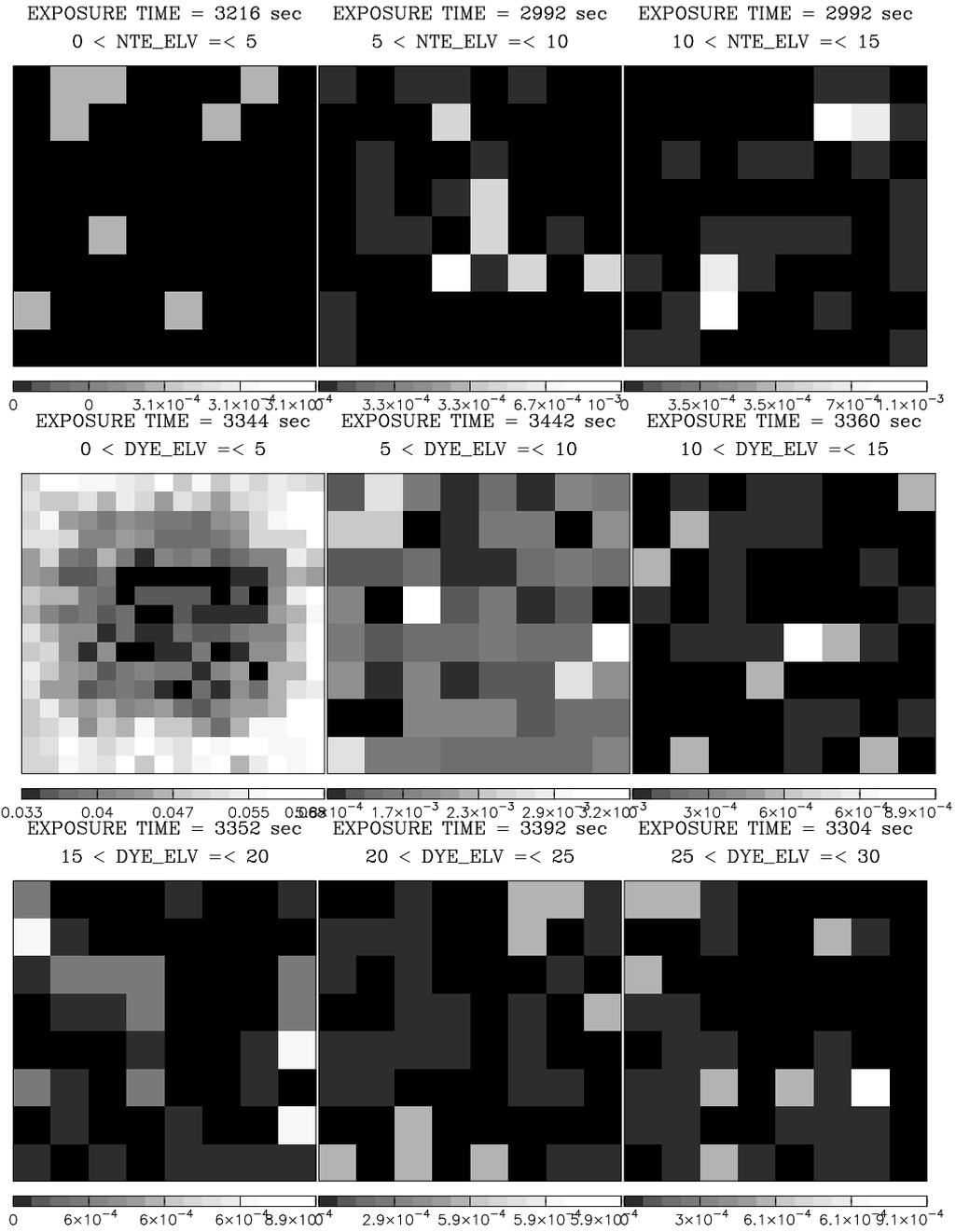


図 B.55: NGC 4945 窒素蛍光輝線バンドスケール・バーはカウントレートを表している。

B.5 酸素蛍光輝線バンドのイメージ

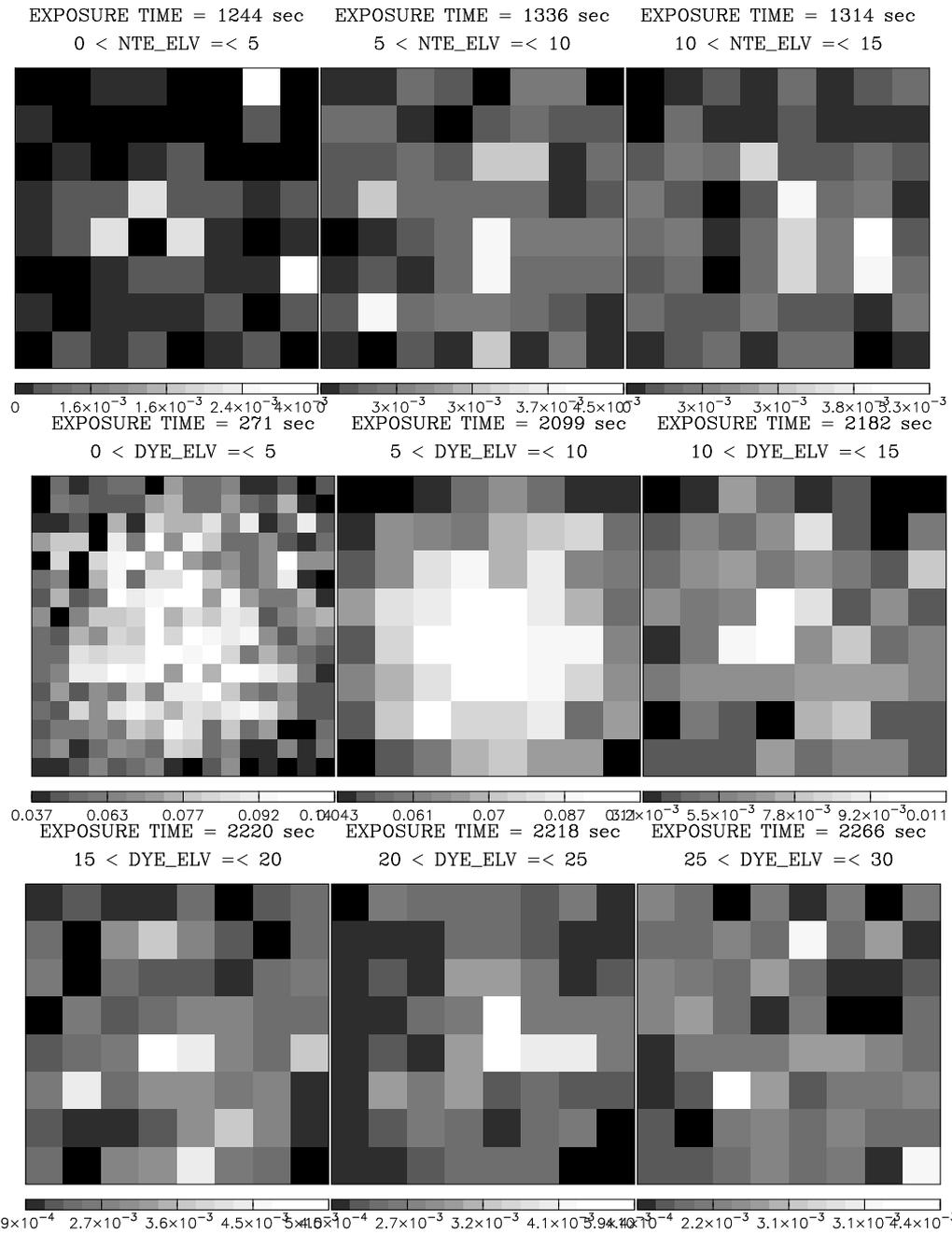


図 B.56: Galactic Bulge 酸素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

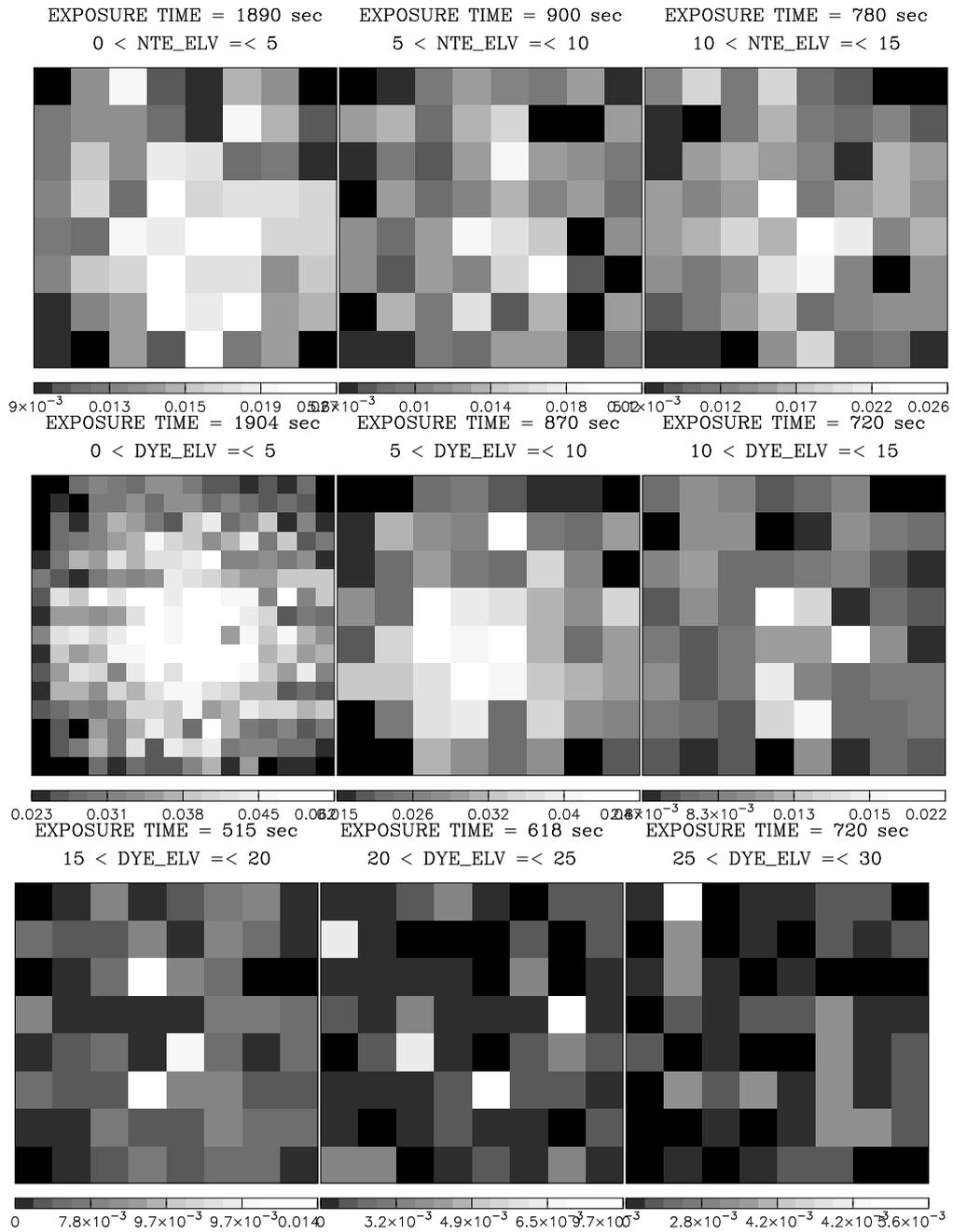


図 B.57: Vega 酸素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

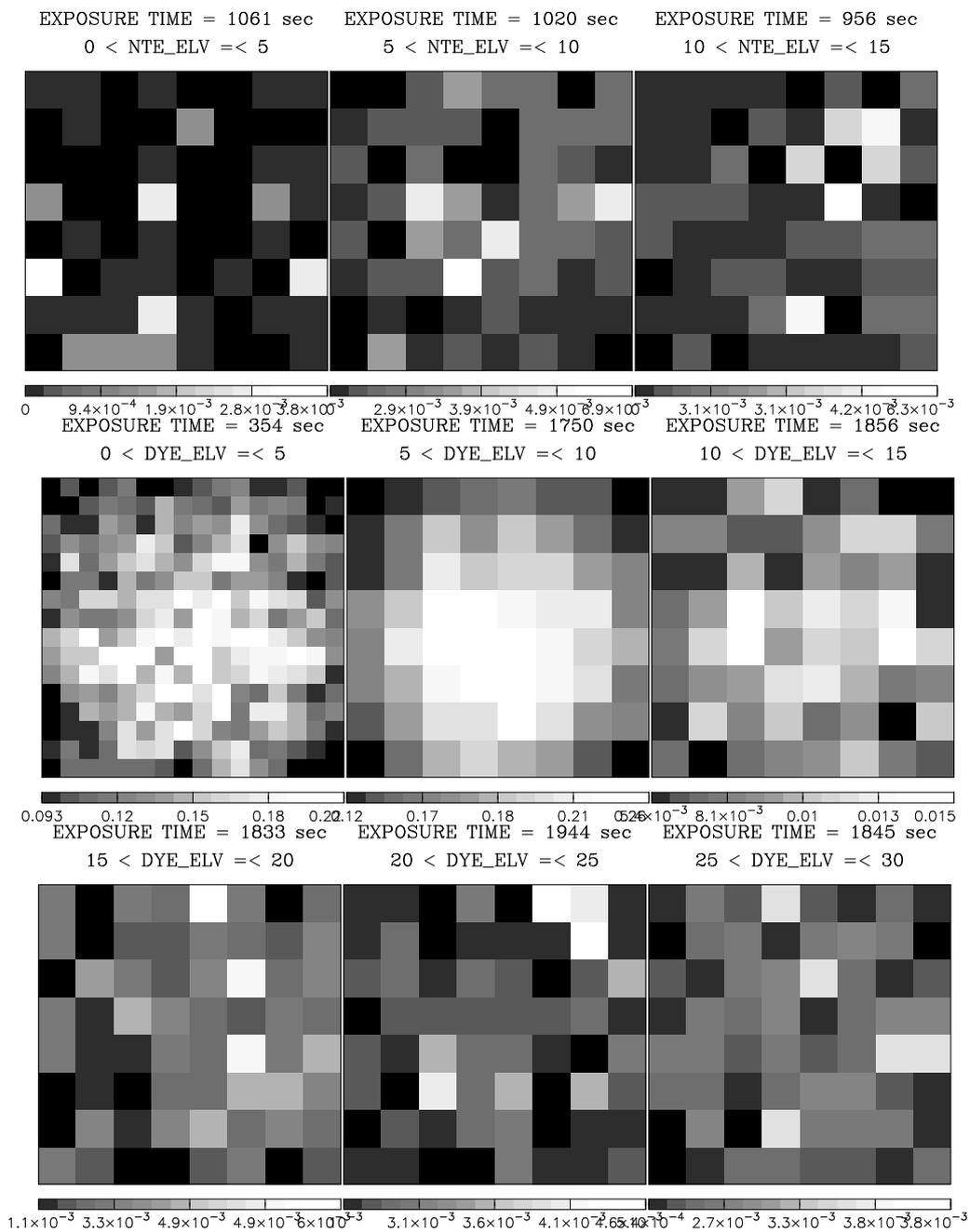


図 B.58: SN1006_NE_BGD 酸素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

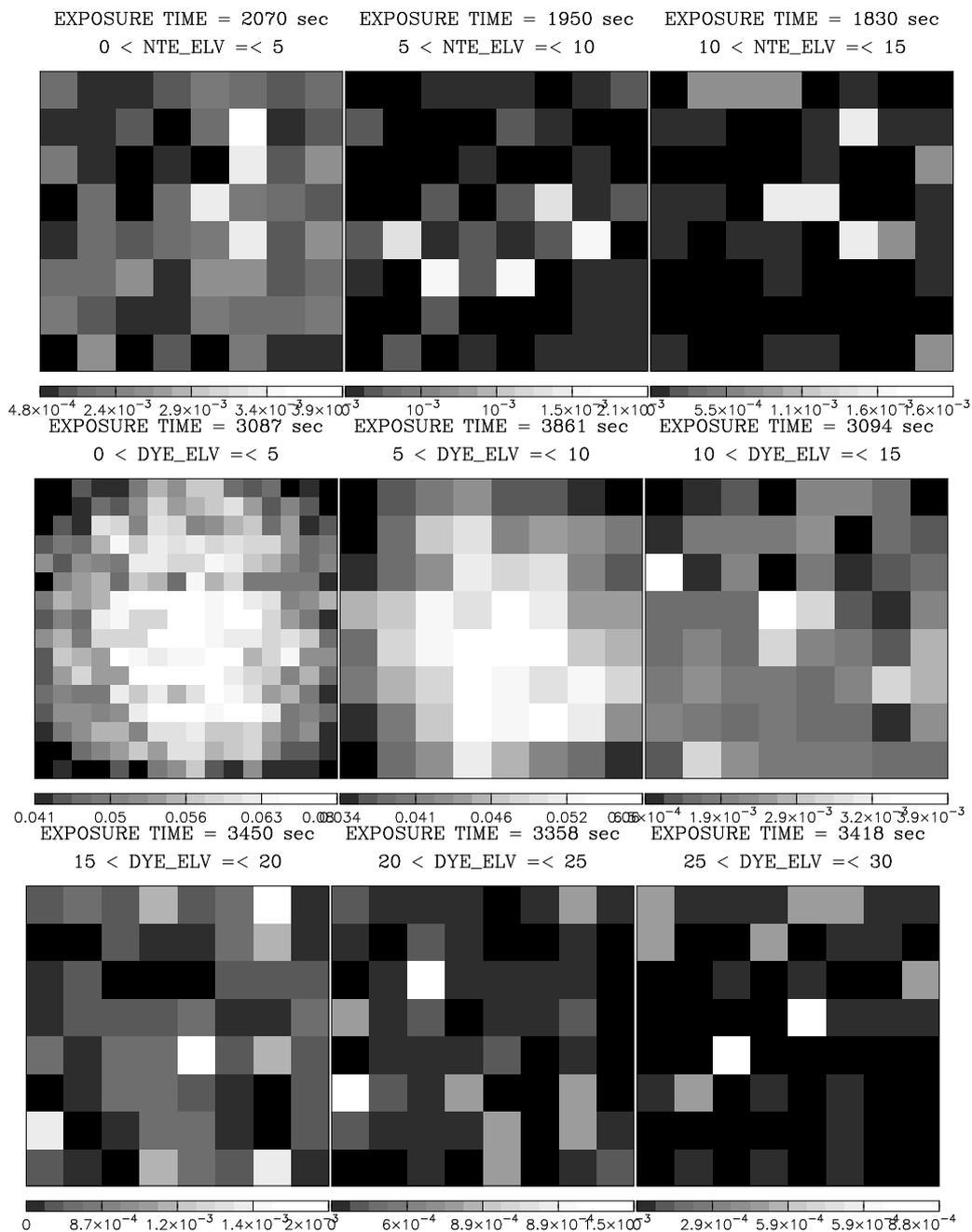


図 B.59: GC SGR B2 酸素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

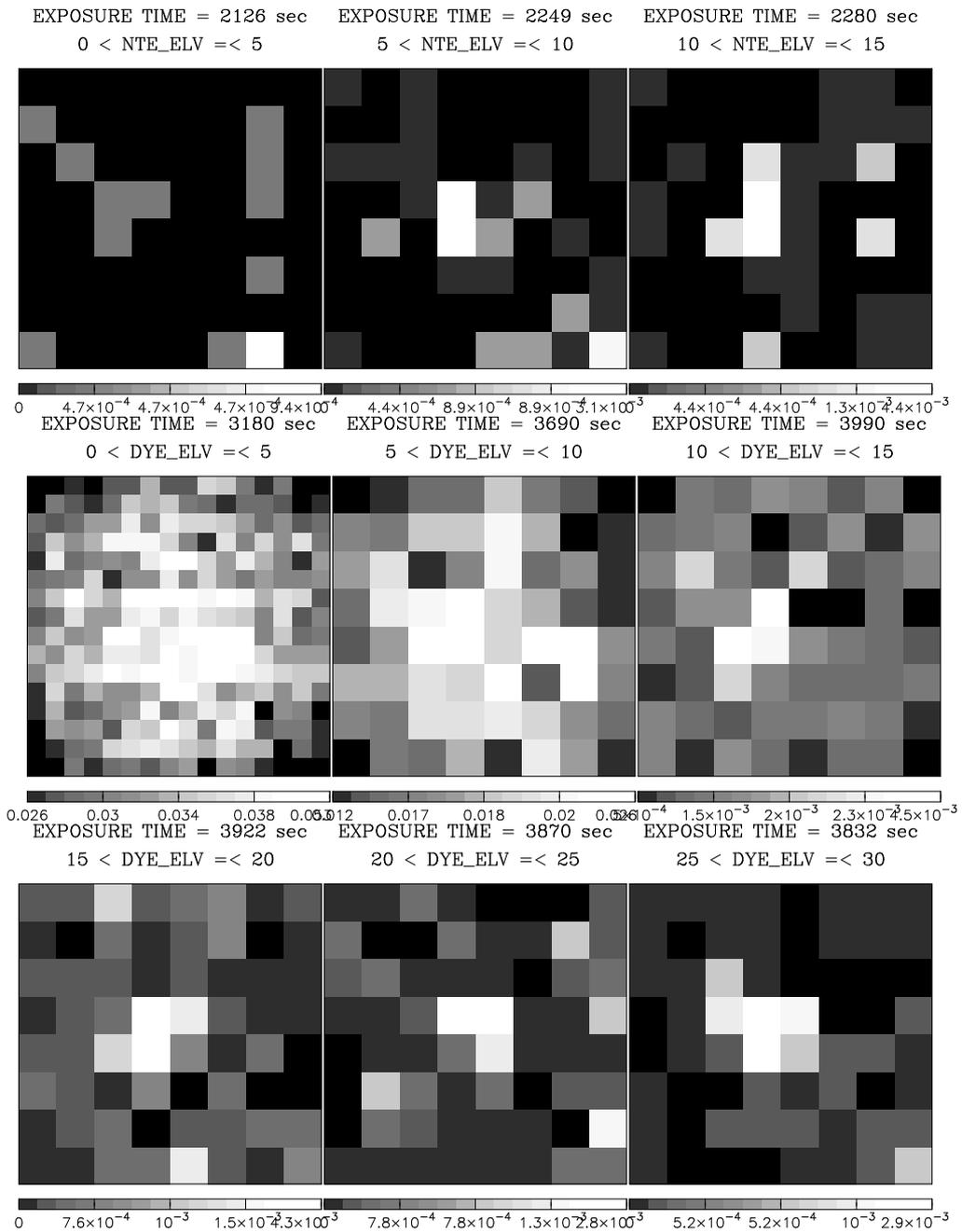


図 B.60: Mrk 3 酸素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

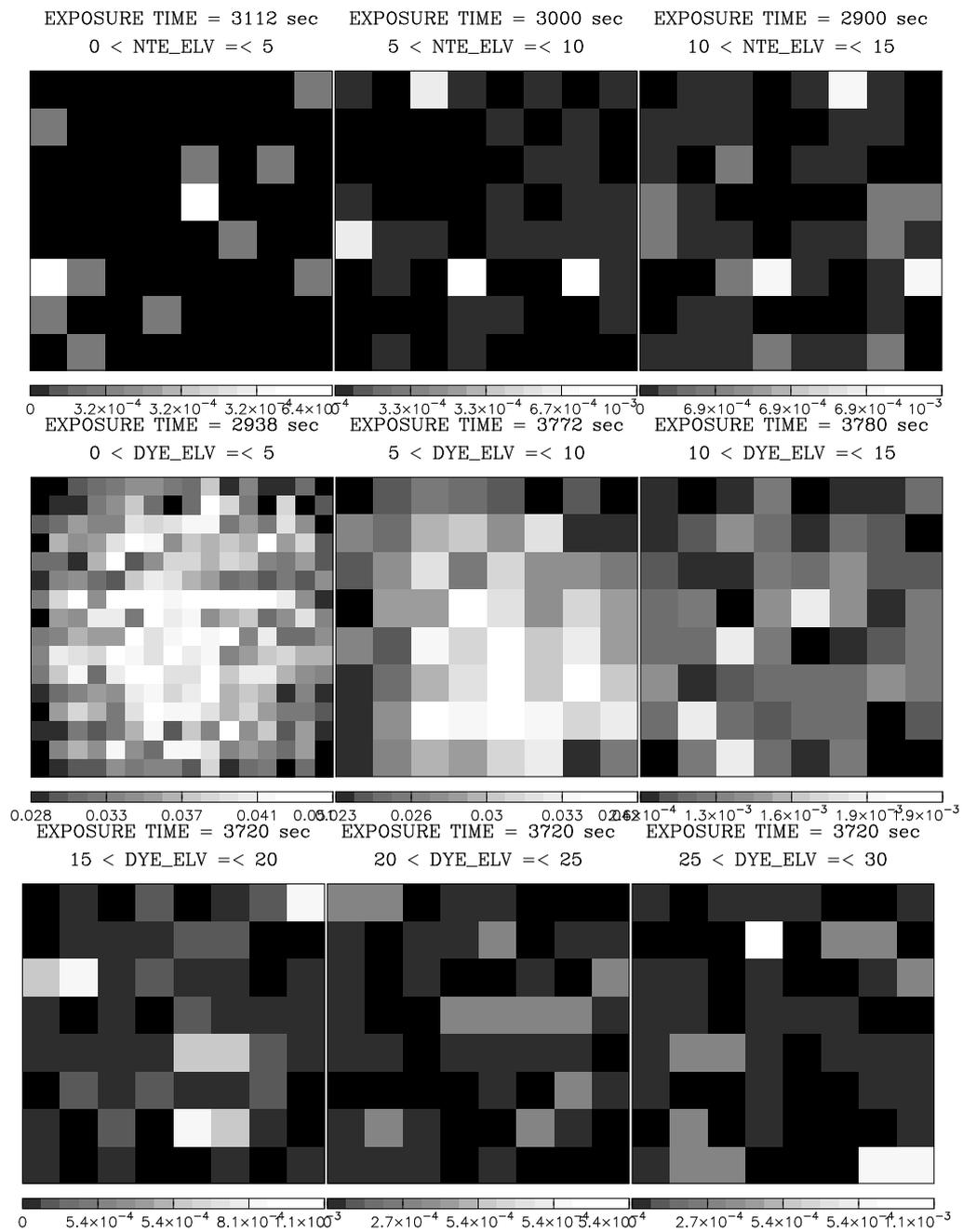


図 B.61: Galactic Ridge 酸素蛍光輝線バンドのイメージ。スケール・バーはカウントレートを表している。

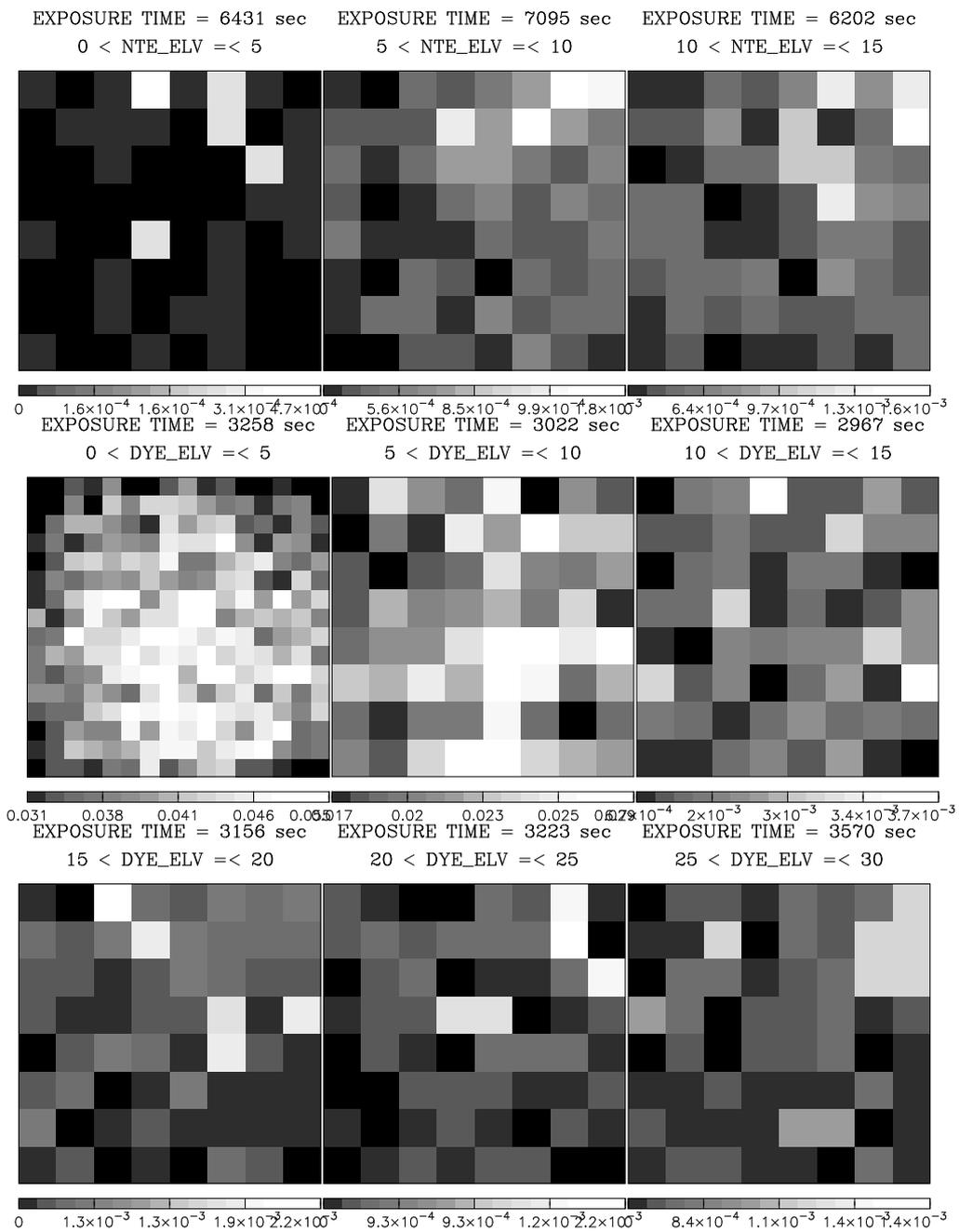


図 B.62: Abell 3376 WEST RELIC 酸素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

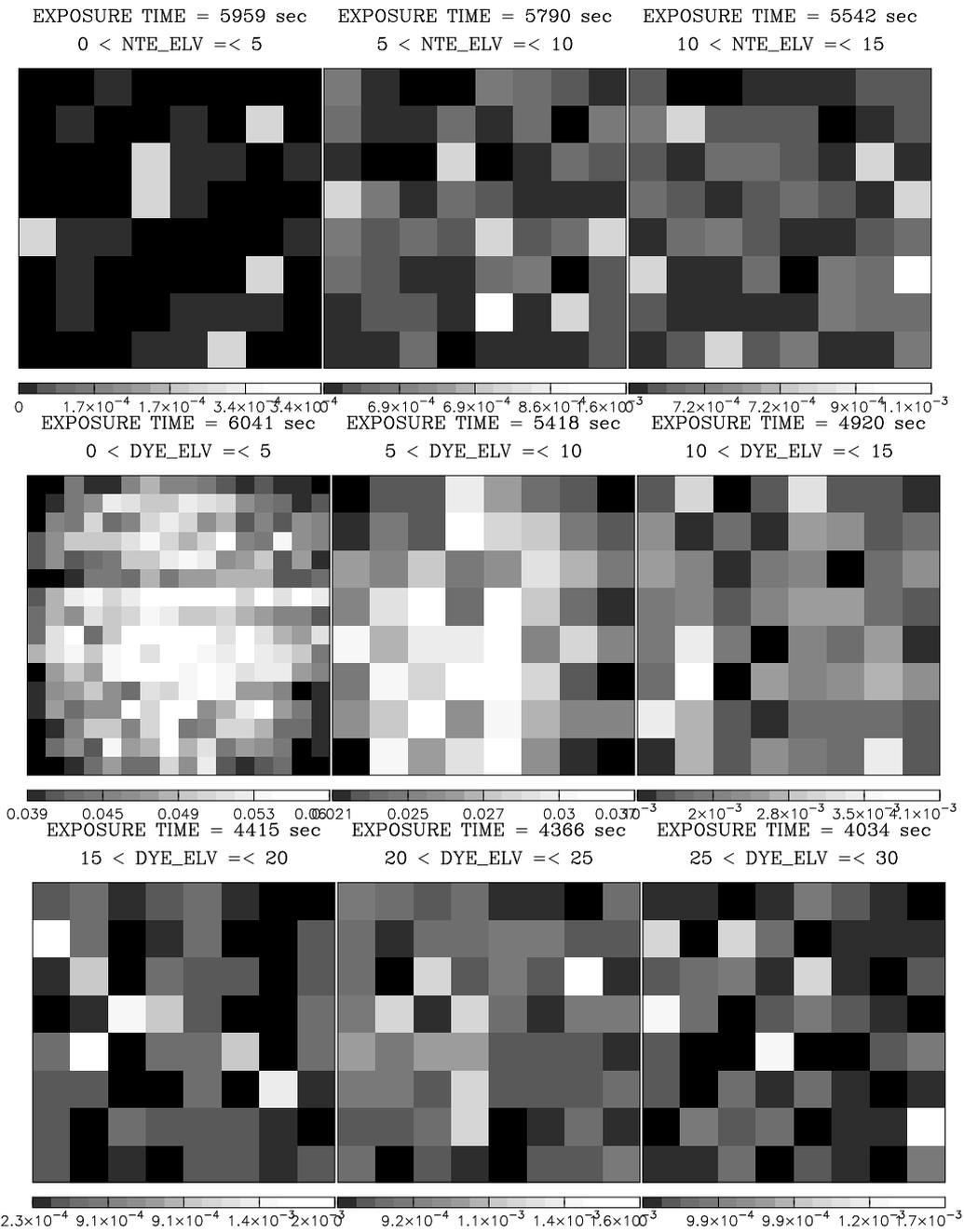


図 B.63: Abell 1413 酸素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

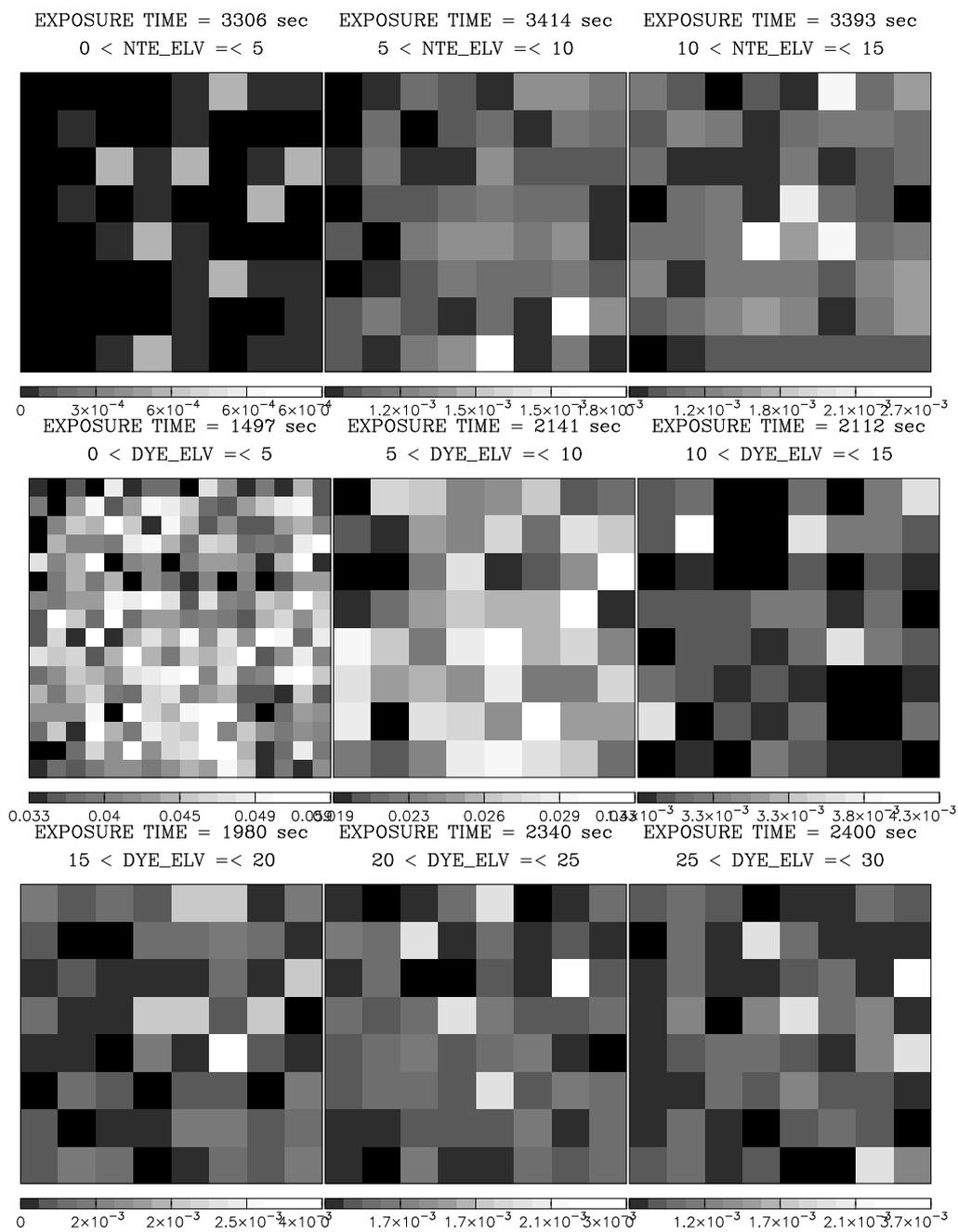


図 B.64: NGC 4388 酸素蛍光輝線バンド (15 < DYE_ELV < 30) スケール・バーはカウントレートを表している。

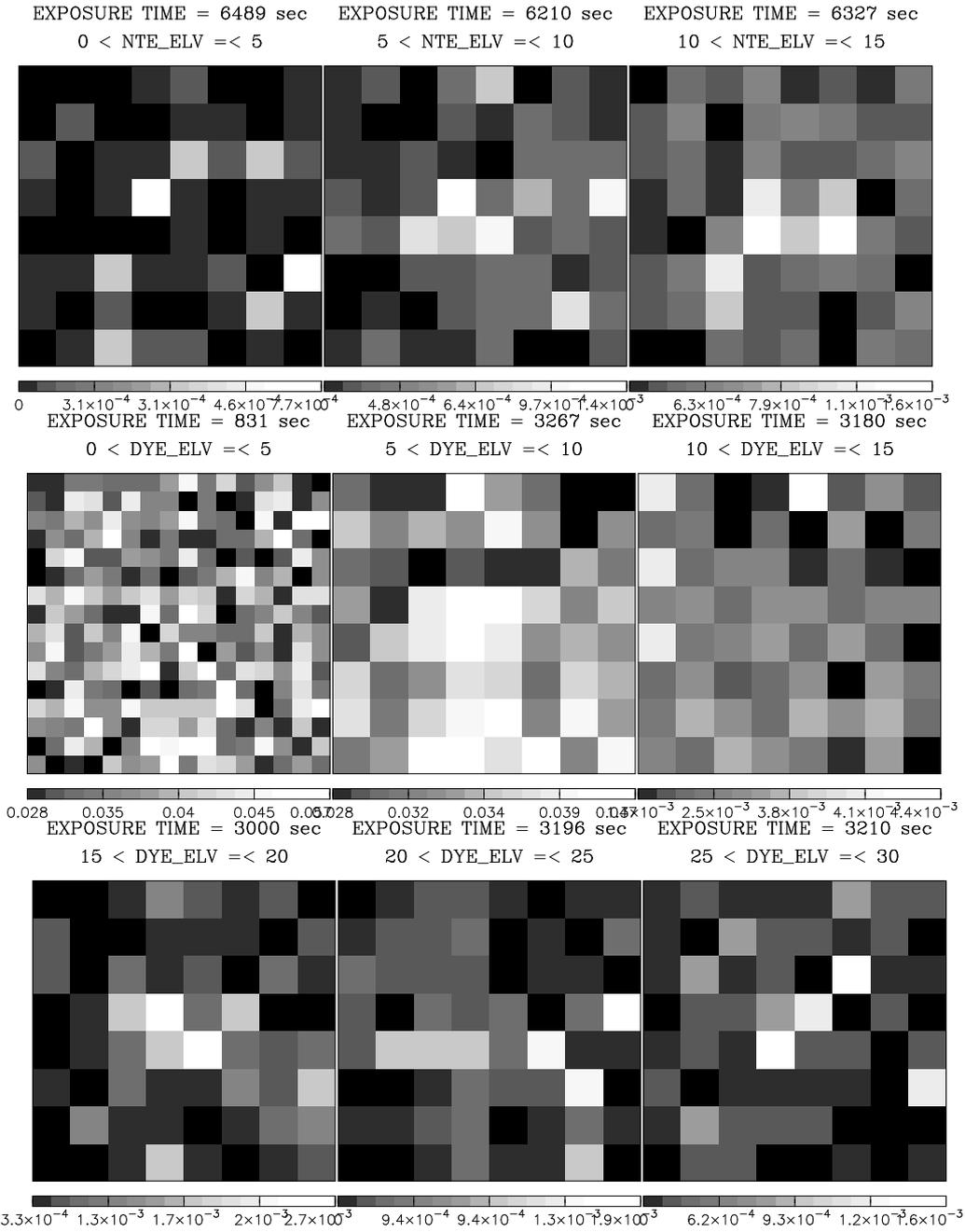


図 B.65: NGC 720 酸素蛍光輝線バンドスケール・バーはカウントレートを表している。

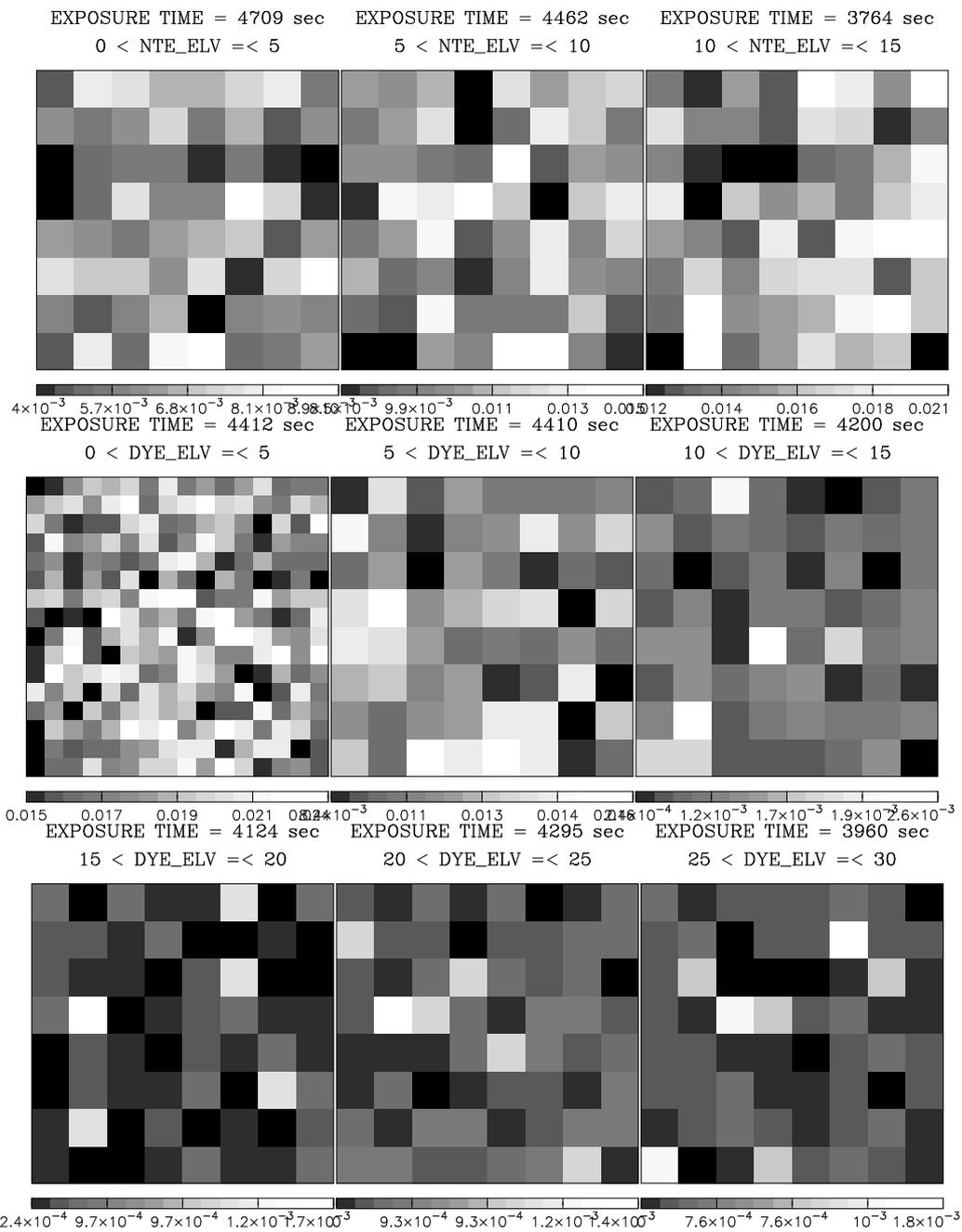


図 B.66: Arp 220 酸素蛍光輝線バンド。スケール・バーはカウントレートを表している。

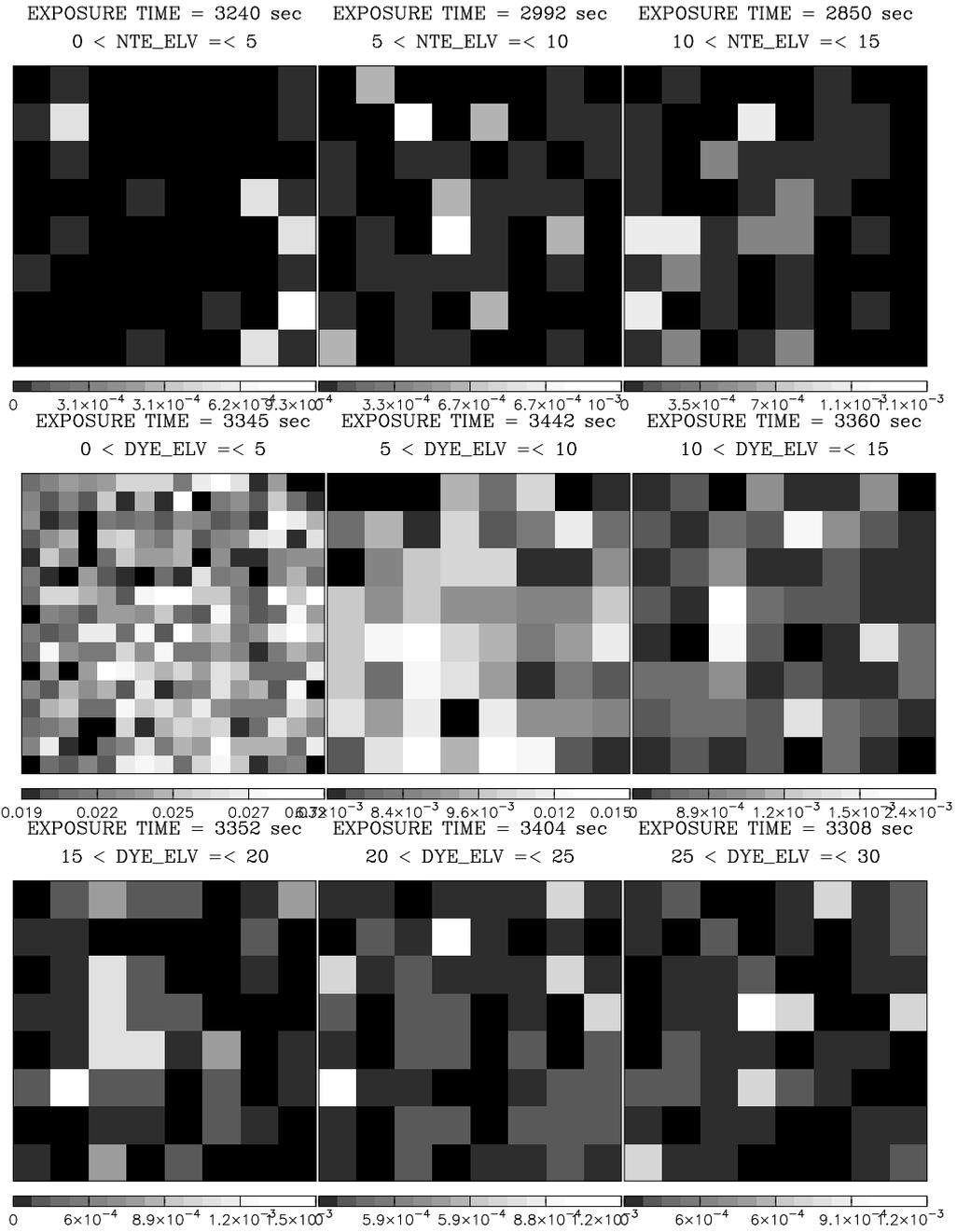


図 B.67: NGC 4945 2nd. 酸素蛍光輝線バンドスケール・バーはカウントレートを表している。

関連図書

- [1] 東海林 雅幸 修士論文 「Astro-E2 衛星搭載 XIS のデータ処理方法の最適化」 (大阪大学 2005)
- [2] 勝田 哲 修士論文 「ASTRO-E2 衛星搭載 X 線 CCD(XIS) の軟 X 線領域における検出効率測定」 (大阪大学 2005)
- [3] Marshall W. Bautz and John A. Nousek and, et al., Science Instrument (SI) Calibration Report for the AXAF CCD Imaging Spectrometer (ACIS), Tech. report, Oct 1998, Draft Version Submission, Version 2.2 mit.
- [4] 片山 晴善 修士論文 「ASTRO-E 衛星搭載 XIS の低エネルギー側の応答関数」 (大阪大学 2000)
- [5] 片山 和典 修士論文 「ASTRO-E 衛星搭載 XIS の応答関数構築」 (大阪大学 1999)
- [6] 荘保 信 修士論文 「ASTRO-E 衛星搭載 XIS の検出効率測定」 (大阪大学 2000)
- [7] 幸村 孝由 修士論文 「ASTRO-E 衛星 X 線 CCD(XIS) の低エネルギー側での性能評価」 (大阪大学 1999)
- [8] 白庄司 貴之 修士論文 「X 線検出器の軟 X 線検出効率測定」 (大阪大学 2004)
- [9] 橋本谷 磨志 修士論文 ASTRO-E 搭載用 X 線 CCD カメラ較正システムの構築 (大阪大学 1996)
- [10] 小谷 太郎 修士論文 ASTRO-D 搭載 SIS の性能評価 (東京大学 1993)
- [11] 西内 満美子 修士論文 Astro-E 搭載 CCD カメラ (XIS) の応答関数の決定 (京都大学 1998)
- [12] 「すざく」 ホームページ <http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/index.html.ja>