

セイファート銀河が示す広帯域 X 線 スペクトル変動の統一的な解釈

東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 修士課程
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
kusunoki@astro.isas.jaxa.jp

楠 絵莉子

学籍番号 35-156120

指導教員 海老沢 研 教授

提出日：2017 年 1 月 23 日

概要

セイファート銀河が示す特徴の一つとして、X線強度とスペクトルの激しい時間変動が挙げられる。これは、活動銀河核 (AGN) における X 線放射源である中心ブラックホール近傍および降着円盤周辺の物理構造を反映していると考えられる。

特に、セイファート銀河で特徴的な「広がったように見える鉄輝線構造」を説明するために、複数の X 線スペクトルモデルが提唱されてきた。一般相対論的な効果によって鉄輝線が広がったと解釈する「相対論的反射モデル」や、連続成分が部分的な吸収を受けたと解釈する「部分吸収モデル」などである。しかし、どのモデルを適用しても時間平均スペクトルを説明することができ、長年の論争に未だ決着はついていない。そこで着目すべきは、スペクトルの時間変動に対する整合性である。提唱されているモデルの一つに“Variable Double Partial Covering (VDPC)”モデルがある。このモデルでは、中心ブラックホール周辺に視線を横切る二層の電離吸収体を仮定し、それによる部分吸収に起因した構造が特徴的な X 線スペクトルを説明する。これまでの検証では、VDPC モデルによって、10 keV 以下におけるスペクトル変動を、主に部分吸収体が視線上で X 線源を覆い隠す割合 (カバリングファクタ) の変化のみで再現することができている。しかし、高エネルギー側ほどモデルとのずれが顕著になることから、別の変動成分が存在することが示唆されていた。

本研究では、3–78 keV で高い感度をもつ X 線天文衛星 NuSTAR と、0.2–10 keV に感度をもつ XMM-Newton または「すざく」衛星との同時観測によるアーカイブデータを活用して、セイファート銀河が示す 0.2–78 keV に渡る広帯域 X 線スペクトル変動に VDPC モデルを適用し、その適合性を検証した。顕著な時間変動を示す MCG-6-30-15, NGC 4593, NGC 1365, Swift J2127.4+5654 と MCG-5-23-16 の 5 天体 (16 観測) について解析を行った結果、天体の個性による多少の違いを除き、全てのエネルギースペクトルを VDPC モデルに基づく同じ関数型でフィットすることができた。また、観測される激しい時間変動は、主に 10 keV 以下で顕著なカバリングファクタ変化と、25 keV 以上で直接観測される冪型連続成分の強度変化という二つのパラメータの独立な変化で説明できることを明らかにした。これにより、これらのセイファート銀河から観測されるスペクトル変動とライトカーブおよび変動率のエネルギー依存性 (RMS スペクトル) のいずれも、VDPC モデルによって再現された。複数のセイファート銀河に対して統一的に VDPC モデルの解釈が成功したことは、AGN の中心ブラックホール周辺の物理構造として、同モデルの考え方が汎用的であることを意味する。

さらに、VDPC モデルに基づく仮想的な AGN について、様々な観測装置の応答関数を用いて観測シ

ミュレーションを行い、VDPC モデルと他のモデルを区別することができるか調査した。その結果、現在の観測装置の性能で、VDPC モデルとは異なるモデルを判別することはほぼ不可能であることがわかった。そこで、将来、X 線マイクロカロリメータを用いた精密分光観測を行った場合に、異なるモデルを判別することが可能かどうか検討した。マイクロカロリメータの高いエネルギー分解能を以てすれば、電離吸収体による Fe Ly α の 21 eV だけ離れた二重吸収線の縮退を解くことができる。これが観測されると、その吸収線の深さから直接カバリングファクタの値が求まる。この手法を用いれば、「ひとみ」衛星搭載 SXS の性能で、モデルを仮定することなく部分吸収が起きているかどうかを調べることができる。さらに、より大口径の Athena 衛星ならば、そのカバリングファクタが変化しているのかも明らかになる。すなわち、カバリングファクタの変化で主なスペクトル変動を説明する VDPC モデルと、他のモデルとを判別することが可能となる。

目次

第 1 章	序論	15
1.1	活動銀河核の概観	16
1.1.1	セイファート銀河	16
1.1.2	AGN の統一モデル	16
1.2	セイファート銀河の X 線スペクトル	17
1.2.1	軟 X 線超過成分 (soft excess)	17
1.2.2	電離吸収成分 (warm absorber)	18
1.2.3	蛍光鉄輝線 (~ 6.4 keV) と硬 X 線反射成分 (hard tail)	18
1.2.4	トーラスによる吸収	20
1.3	セイファート銀河の時間変動	20
1.4	X 線スペクトル変動を説明するモデル	22
1.4.1	相対論的反射 (disk-line) モデル	22
1.4.2	部分吸収 (partial covering) モデル	24
1.4.3	その他のモデル	25
1.5	Variable Double Partial Covering (VDPC) モデル	27
1.6	本研究の目的	30
第 2 章	X 線天文衛星と観測装置	31
2.1	NuSTAR 衛星	32
2.1.1	概要	32
2.1.2	光学モジュール	32

2.1.3	焦点面モジュール	33
2.2	XMM-Newton 衛星	35
2.2.1	概要	35
2.2.2	X 線望遠鏡	35
2.2.3	X 線 CCD カメラ EPIC	36
2.2.4	反射型回折格子 RGS	38
2.3	すざく衛星	39
2.3.1	概要	39
2.3.2	軟 X 線望遠鏡 XRT	40
2.3.3	軟 X 線 CCD カメラ XIS	42
第 3 章	観測データ	45
3.1	観測天体	46
3.2	データ処理	48
3.2.1	NuSTAR のデータ処理	50
3.2.2	XMM-Newton のデータ処理	53
3.2.3	すざくのデータ処理	54
第 4 章	解析と結果	57
4.1	VDPC モデル関数	58
4.2	時間平均スペクトル	60
4.2.1	時間平均スペクトルの作成	60
4.2.2	スペクトルフィッティング	60
4.3	時間スライススペクトル	67
4.3.1	時間スライススペクトルの作成	67
4.3.2	時間スライススペクトルの同時フィッティング	67
4.4	強度スライススペクトル	75
4.4.1	強度スライススペクトルの作成	75

4.4.2	強度スライススペクトルの同時フィッティング	75
4.5	RMS スペクトル	86
4.5.1	RMS の計算	86
4.5.2	RMS スペクトルの結果	87
4.6	ライトカーブ	89
4.6.1	ライトカーブシミュレーションの手順	89
4.6.2	ライトカーブシミュレーションの結果	90
第 5 章	議論	97
5.1	VDPC モデルの適合性	98
5.1.1	エネルギースペクトルの解釈	99
	1 型セイファート銀河 MCG-6-30-15	99
	1 型セイファート銀河 NGC 4593	100
	1.8 型セイファート銀河 NGC 1365	100
	狭輝線 1 型セイファート銀河 Swift J2127.4+5654	100
	1.9 型セイファート銀河 MCG-5-23-16	101
5.1.2	RMS スペクトルの解釈	101
5.1.3	ライトカーブの解釈	101
5.1.4	VDPC モデルによる解釈の汎用性	102
5.2	部分吸収が起きていることの検証に向けて	103
5.2.1	仮想 AGN スペクトルのモデルフィッティング	103
	相対論的反射モデルによるフィッティング	104
	Multi-PL モデルによるフィッティング	105
	各モデルフィッティングの結果	106
	X 線マイクロカロリメータ	107
	X 線マイクロカロリメータによって見えてくる構造	108
5.2.2	RMS スペクトルで見るカバリングファクタ変動	109

5.2.3	二重吸収線とカバリングファクタ	111
第 6 章	結論	115

目次

1.1	AGN 統一モデル	17
1.2	低エネルギー側における X 線電離吸収	19
1.3	反射成分	20
1.4	蛍光輝線	20
1.5	セイファート銀河の時間変動	21
1.6	MCG-6-30-15 の RMS スペクトル	22
1.7	相対論的效果で広がった鉄輝線	23
1.8	ライトベンディング効果	24
1.9	ディスクラインのスペクトルモデルと RMS スペクトル	24
1.10	部分吸収モデル	25
1.11	部分吸収モデルで考える物理描像	26
1.12	Noda et al. (2014) モデル	26
1.13	VDPC モデル	28
1.14	VDPC モデルによるスペクトルフィッティング	28
1.15	IRAS 13224-3809 の RMS スペクトル	29
1.16	VDPC モデルに基づく RMS スペクトル	29
1.17	VDPC モデルに基づくライトカーブ	30
2.1	NuSTAR 概観	32
2.2	Wolter I 型の模式図	34
2.3	有効面積の比較	34

2.4	NuSTAR 衛星の CdZnTe 検出器	34
2.5	XMM-Newton 衛星の概観	35
2.6	X 線 CCD カメラ EPIC	37
2.7	XMM-Newton 搭載観測装置の有効面積	37
2.8	RGS の概観	38
2.9	すざく衛星の概観	40
2.10	すざく衛星の軌道	40
2.11	XRT の外観と配置図	41
2.12	XIS の外観と断面図	42
2.13	XIS の FI と BI の量子効率	43
3.1	同時観測ライトカーブ (1)	49
3.1	同時観測ライトカーブ (2)	50
3.2	NuSTAR の GRADE 判定	52
3.3	天体領域と背景領域	53
3.4	EPIC-pn の PATTERN	54
3.5	ASCA GRADE	55
4.1	時間平均スペクトル (1)	61
4.1	時間平均スペクトル (2)	62
4.1	時間平均スペクトル (3)	63
4.2	時間スライススペクトル (1)	68
4.2	時間スライススペクトル (2)	69
4.2	時間スライススペクトル (3)	70
4.3	強度スライススペクトル・低エネルギー版 (1)	76
4.3	強度スライススペクトル・低エネルギー版 (2)	77
4.3	強度スライススペクトル・低エネルギー版 (3)	78
4.4	強度スライススペクトル・高エネルギー版 (1)	79

4.4	強度スライススペクトル・高エネルギー版 (2)	80
4.5	RMS スペクトル (1)	87
4.5	RMS スペクトル (2)	88
4.5	RMS スペクトル (3)	89
4.6	ライトカーブとパラメータカーブ (MCG-6-30-15)	91
4.7	ライトカーブとパラメータカーブ (NGC 4593)	92
4.8	ライトカーブとパラメータカーブ (NGC 1365)	93
4.9	ライトカーブとパラメータカーブ (Swift J2127.4+5654)	94
4.10	ライトカーブとパラメータカーブ (MCG-5-23-16)	95
5.1	VDPC モデルで考える X 線放射領域の物理構造	98
5.2	VDPC モデルから創出した仮想 AGN スペクトル	103
5.3	仮想 AGN に対する相対論的反射のフィッティング結果	105
5.4	仮想 AGN に対する Multi-PL モデルのフィッティング結果	106
5.5	仮想 AGN を X 線マイクロカロリメータで観測した場合	108
5.6	仮想ライトカーブ	109
5.7	仮想ライトカーブの RMS スペクトル	110
5.8	二重吸収線	112
5.9	カバリングファクタの計算	113
5.10	カバリングファクタの計算・高電離	114

表目次

2.1	NuSTAR 衛星の基本性能	33
2.2	XMM-Newton 衛星の基本性能	36
2.3	XMM-Newton 搭載観測装置の基本性能	36
2.4	すざく衛星の基本性能	40
2.5	すざく搭載観測装置の基本性能	41
3.1	天体情報	46
3.2	観測データ	47
3.3	解析に使用したデータ	48
4.1	XSPEC モデル関数とその物理パラメータ	59
4.2	時間平均スペクトルの使用装置および帯域	60
4.3	時間平均スペクトルのフィッティングパラメータ	64
4.4	時間スライススペクトルの分割数	67
4.5	時間スライススペクトルの変動フィッティングパラメータ	71
4.6	時間スライススペクトルの共通フィッティングパラメータ	73
4.7	強度スライススペクトルの変動フィッティングパラメータ	81
4.8	強度スライススペクトル・低エネルギー版の共通フィッティングパラメータ	82
4.9	強度スライススペクトル・高エネルギー版の共通フィッティングパラメータ	84
5.1	仮想 AGN の VDPC モデルパラメータ	104
5.2	仮想 AGN に対する相対論的反射モデルのフィッティングパラメータ	105

5.3	仮想 AGN の Multi-PL モデルのフィッティングパラメータ	106
5.4	Hitomi/SXS と Athena/X-IFU の性能	107

第 1 章

序論

Contents

1.1	活動銀河核の概観	16
1.1.1	セイファート銀河	16
1.1.2	AGN の統一モデル	16
1.2	セイファート銀河の X 線スペクトル	17
1.2.1	軟 X 線超過成分 (soft excess)	17
1.2.2	電離吸収成分 (warm absorber)	18
1.2.3	蛍光鉄輝線 (~6.4 keV) と硬 X 線反射成分 (hard tail)	18
1.2.4	トーラスによる吸収	20
1.3	セイファート銀河の時間変動	20
1.4	X 線スペクトル変動を説明するモデル	22
1.4.1	相対論的反射 (disk-line) モデル	22
1.4.2	部分吸収 (partial covering) モデル	24
1.4.3	その他のモデル	25
1.5	Variable Double Partial Covering (VDPC) モデル	27
1.6	本研究の目的	30

本章では、活動銀河核の一種であるセイファート銀河から観測される X 線放射について概観し、その物理的起源を巡り複数のモデルに関してレビューを行う。執筆にあたり、第 1 節から第 3 節では「シリーズ現代の天文学 8 ブラックホールと高エネルギー現象」(2007 年、日本評論社)、「ピーターソン活動銀河核」(2010 年、丸善)を参照し、加えて第 2 節から第 4 節では [Turner & Miller \(2009\)](#) のレビュー記事を参照して記述した。

1.1 活動銀河核の概観

活動銀河核 (Active Galactic Nucleus, AGN) とは、星形成や恒星に由来する放射とは別の放射現象が活発に起きている銀河の中心核領域、あるいは、これを擁する銀河のことを指す。AGN 放射の主要なエネルギー源は、銀河中心に位置する超巨大ブラックホールへの物質降着であると考えられている。つまり、ブラックホールまわりの降着円盤中で、重力ポテンシャルエネルギーが粘性により散逸されて放射エネルギーに転化する。AGN では、降着円盤が紫外および可視光の放射源であるほか、高エネルギー電子が存在している高温コロナが X 線源として考えられており、シンクロトロン放射や逆コンプトン放射といった非熱的放射も存在する。

観測される様々な AGN は、光度やスペクトルなどによって分類されている。それらはセイファート銀河、クエーサー、電波銀河などであるが、本節では本研究の対象であるセイファート銀河についての概観を述べる。

1.1.1 セイファート銀河

1943 年に Curl Seyfert が中心領域の表面輝度が明るい銀河を選んで分光観測を行った結果、共通する性質の可視光スペクトルが得られることを示し (Seyfert 1943)、それらはセイファート銀河と呼ばれている。広くセイファート銀河とは、等級にして $M_B > -21.5 + 5 \log h_0$ と比較的低光度な中心核からの放射を示し、主に可視光のスペクトル中に強い高階電離輝線を有する AGN のことをいう。その形態のほとんどは渦巻銀河である。更に、観測される輝線幅によって 1 型と 2 型に大別される。1 型セイファート銀河には、輝線幅が $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ の狭輝線と、 $\sim 10^4 \text{ km s}^{-1}$ の広輝線の両方が存在する。2 型セイファート銀河では、狭輝線のみが観測される。狭輝線領域 (Narrow Line Region, NLR) は電子密度 $n_e \approx 10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ と低密度で、広輝線領域 (Broad Line Region, BLR) は $n_e \approx 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 以上と高密度であると考えられている。そして、Osterbrock (1978) は 1 型と 2 型の違いを本質的なものではなく、視線方向の違いという見かけの効果で説明する考え方を提案した。これによれば、1 型と 2 型は物理的には同じ天体であるが、2 型の BLR は視線上に存在するダストトラスによって隠されている、と解釈する。また、広輝線が観測されているものの非常に弱い場合は 1.5 型、1 型の中でも線幅のより狭いバルマー輝線が検出される場合は狭輝線 1 型など、さらに細かい分類もある。

1.1.2 AGN の統一モデル

セイファート銀河のみならず、多様な AGN の物理を説明する「AGN の統一モデル」が考えられている (e.g. Antonucci 1993)。その概念図を図 1.1 で示す。まず AGN の構成要素は、中心ブラックホール、降着円盤、BLR と NLR、ダストトラス、ジェットである。電波放射が弱い場合 (図 1.1 の下側)、トラスに対し正面方向から見たときには 1 型、横から見たときには 2 型のセイファートとなる。電波放射が

強い場合 (図 1.1 の上側) には電波銀河となり、さらに電波ジェットを進行方向から見たときにはブレイザーとなる。

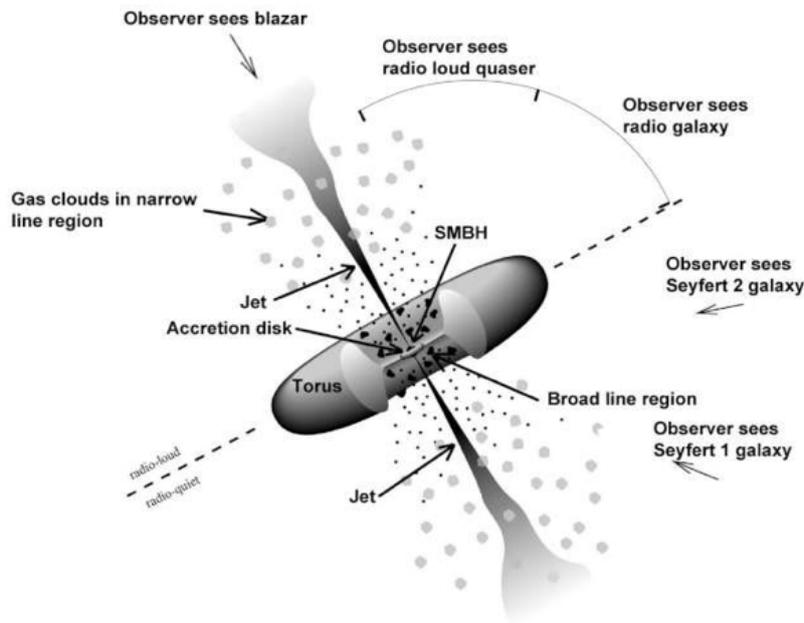


図 1.1: AGN 統一モデルの概念図。(http://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/agn/ より)

1.2 セイファート銀河の X 線スペクトル

セイファート銀河からの X 線連続放射スペクトルは、光子が持つエネルギーの冪関数で近似して表される。放射源は、高温コロナと呼ばれる高エネルギー電子雲である。多くの場合、電子温度 T_e として、この冪関数にはエネルギー $E_c \sim kT_e$ でカットオフが見られる。すなわち光子指数を Γ として*1、次のように書ける。

$$A(E) = E^{-\Gamma} \exp[-E/E_c] \quad (1.1)$$

この冪関数を主成分として、他に軟 X 線超過成分、硬 X 線反射成分、電離吸収成分なども見られる。これらについて、以降の各節で説明する。

1.2.1 軟 X 線超過成分 (soft excess)

一般に 1 keV 以下で見られる超過成分の起源は、降着円盤からの黒体放射であると考えられる。ただし円盤最内縁で生成した熱的光子は紫外線光子であり、これが円盤面の上下に分布する高温コロナ中の相対論的高エネルギー電子によって逆コンプトン散乱されて X 線光子となると考えられている。一方、この

*1 エネルギーフラックスの傾きを表すスペクトル指数 α ($F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$) とは $\alpha = \Gamma - 1$ の関係がある。

他の仮説も提案されている。例えば、複雑な輝線や吸収線の成分が光速に近い相対論的なアウトフローガスによってエネルギーシフトしたものであるという解釈 (Sobolewska & Done 2007) などがある。

1.2.2 電離吸収成分 (warm absorber)

~1–10 keV の低エネルギー帯域では、X 線光子が C から Ni までの原子の内殻電子を励起または電離する。この場合、電離は光電吸収によるもので、X 線帯域には Fe のほか S, Si, Mg といった様々な原子の K 殻および L 殻の吸収端がある。そして、これらの元素の水素様およびヘリウム様イオンにおける状態遷移に伴う吸収線が見られる (図 1.2)。スペクトル中に現れるこのような吸収構造の起源となる物質を、電離吸収体あるいは“warm absorber”と言う。光電離したガスの電離状態は、電離パラメータ $\xi = L/nr^2$ [erg cm s⁻²] によって表される。ここで L は電離光度、 n は陽子密度、 r は中心ブラックホールから物質までの距離を指す。つまり電離パラメータは、原子の密度に対する電離光子の密度である。

1.2.3 蛍光鉄輝線 (~6.4 keV) と硬 X 線反射成分 (hard tail)

高密度の物質に入射する X 線は吸収と散乱の効果を受けるが、10 keV よりも高エネルギー側では、コンプトン散乱の効果が顕著に現れる。エネルギー $h\nu \ll m_e c^2$ である X 線光子の自由電子に対する散乱の確率は、エネルギーに依らず一定のトムソン断面積 σ_T で決まる。光学的厚みは $\tau = N_e \sigma_T$ であるから、 $\tau = 1$ のとき $N_H = 1.5 \times 10^{24}$ [cm⁻²] である。一方で $h\nu > m_e c^2$ の高エネルギー光子がコンプトン散乱されるとき、その後方散乱の成分が 20–40 keV にかけてコンプトン・ハンプと呼ばれるピークをもつ。そして、原子番号 Z の K 殻に対する光電吸収の断面積は $\sigma \propto Z^5 \nu^{-7/2}$ となっており、低エネルギーであるほど吸収の確率が高い。よって、10 keV より低エネルギーでは吸収の効果が顕著であるが、それより高エネルギーでは散乱の効果が顕著に現れ、図 1.3 のような反射成分の連続スペクトルが得られる。高エネルギー側における冪関数と反射成分による連続スペクトルのことを、ハードテイルとも呼ぶ。

このとき、連続成分と同時に光電吸収に付随した蛍光輝線も観測される。~6.4 keV に鉄の $K\alpha$ 輝線が観測されることから、反射体は中性または電離度の低い物質で、高密度な吸収ガス雲か降着円盤の外縁部であると考えられている。故に、このような反射は「冷たい反射」と呼ばれる。鉄の蛍光輝線は線幅が非対称に広がった輪郭で観測されることがあり、図 1.4 で示すように、線中心より低エネルギー側で尾を引いた形をしている。この輝線構造の起源は明らかになっておらず、現在もなお活発な議論がなされ、決着の付いていない大きな問題である。

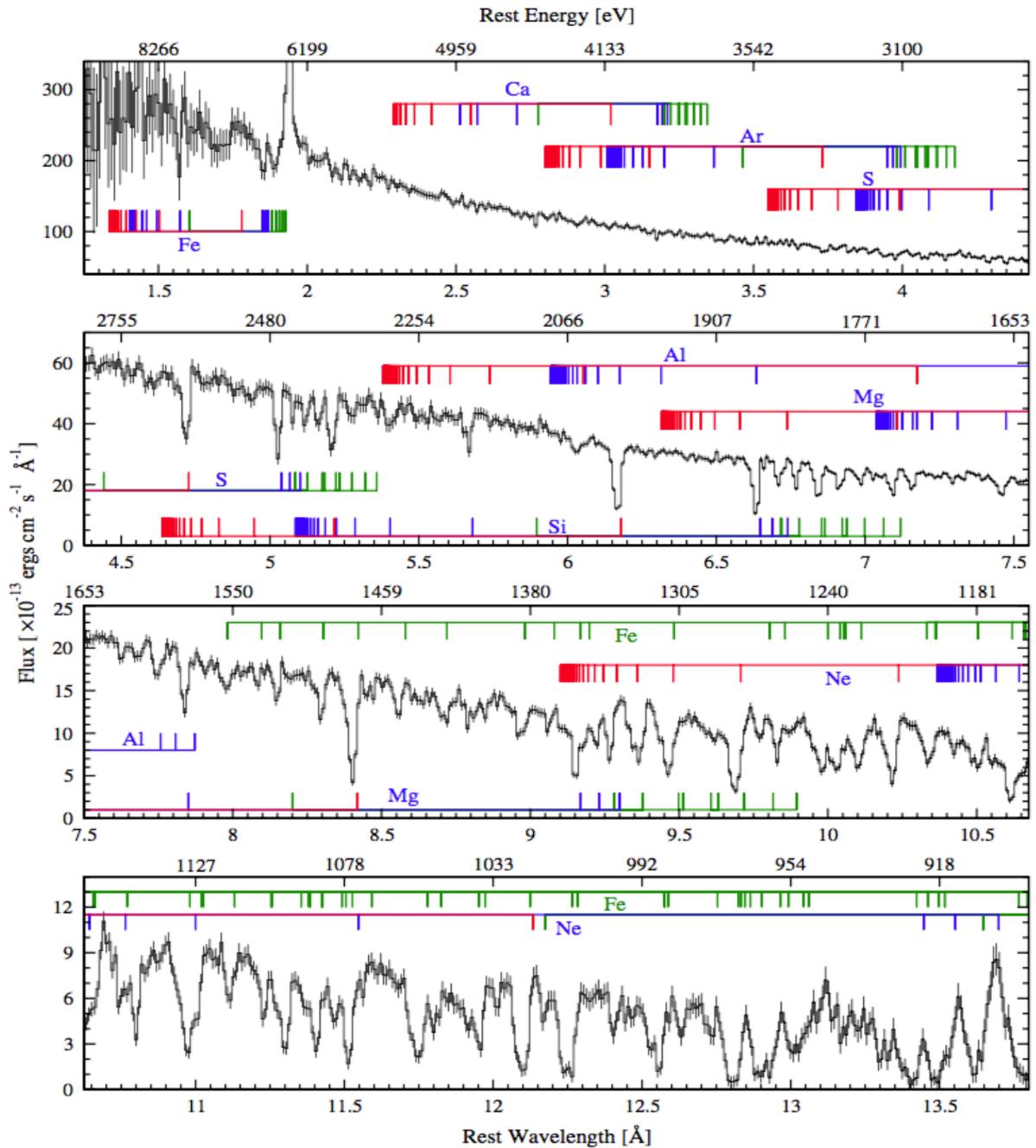


図 1.2: NGC 3783 の Chandra/HETG による 900 キロ秒の分光観測で得られた 0.9–10 keV のエネルギースペクトル。横軸に静止波長 (下) ならびにエネルギー (上) をとり、縦軸にフラックスをとっている。水素様 (赤)、ヘリウム様 (青)、その他 (緑) のイオンによる線スペクトル位置を線で示す。(Turner & Miller 2009)

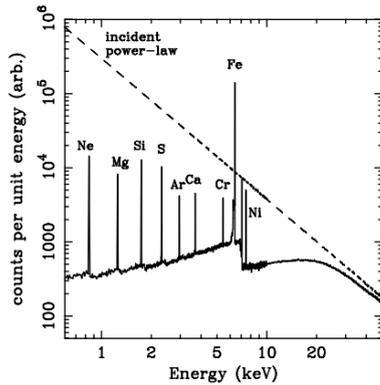


図 1.3: $\Gamma = 2$ の入射 X 線に対する中性物質による吸収と反射について計算されたスペクトル。(Fabian & Ross 2010)

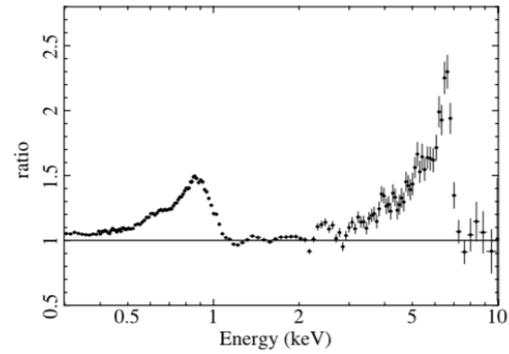


図 1.4: 1H 0707-495 の線幅が非対称に広がって観測されている鉄の蛍光輝線スペクトル。縦軸は連続成分との比をとっており、K 殻と L 殻からの輝線がそれぞれ 6 keV 付近と 1 keV 以下に見えている。(Fabian et al. 2009)

1.2.4 トーラスによる吸収

統一モデルによれば、2 型セイファートに分類される天体は、銀河核の中心部がダストトーラスによって隠されている。実際、 $N_{\text{H}} = 1.5 \times 10^{24} [\text{cm}^{-2}]$ を超える「コンプトン厚 (Compton-thick)」な吸収体によって、冪関数で表される直接成分が強く吸収されたスペクトルが Mkn 3 などで観測されている。

1.3 セイファート銀河の時間変動

セイファート銀河からの X 線放射は、数キロ秒程度の短時間で強度変動を示す。相対論的な効果を省き単純に考えた場合、光の横断速度として 1 キロ秒という時間スケールは、放射源の大きさにして $D < 200 [10^6 M_{\odot}]^{-1} GM/c^2$ を与える*2。これが、X 線源を銀河核中心部におけるブラックホールごく近傍の小さな領域と考える所以である。また、強度と同時に X 線スペクトルの形状も変化する。このスペクトル変動は、ハードネス比またはソフトネス比の変化によって表される。図 1.5 にセイファート銀河が示す X 線時間変動の例を示す。

*2 重力定数 G 、ブラックホール質量 M 、光速 c として重力半径 $r_g = GM/c^2$

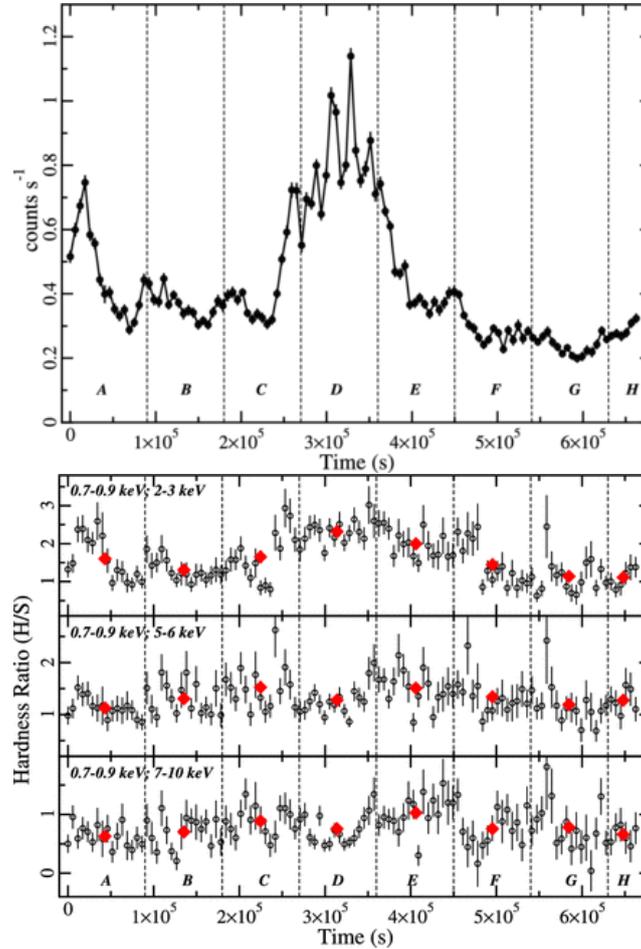


図 1.5: すざく衛星で 2013 年に観測された狭輝線 1 型セイファート銀河 Mrk 335 のライトカーブ (上) とハードネス比変動 (下) のプロット (Gallo et al. 2015)。ハードネス比はソフト帯域を 0.7–0.9 keV とし、ハード帯域を 2–3, 5–6, 7–10 keV のそれぞれで算出している。赤い点は各区間での平均値。

さらに、強度変動率のエネルギー依存性を表す RMS (root mean square) スペクトルは、特徴的な構造を示すことが知られている。あるエネルギー帯において時間ビン N 本からなるライトカーブの観測データ $\{x_i \pm \delta x_i\}_{i=1,N}$ があるとき、平均カウントレート $\bar{x} = \sum x_i / N$ と、天体由来の分散値 $V_{\text{intrinsic}} = \sum (x_i - \bar{x})^2 - \sum \delta x_i^2$ から、RMS の値を次のように定義する。

$$\text{RMS variability} = \frac{\sqrt{V_{\text{intrinsic}} / (N - 1)}}{\bar{x}} \quad (1.2)$$

図 1.6 にあすか衛星で観測された MCG-6–30–15 の RMS スペクトル (Matsumoto et al. 2003) を示す。これは、エネルギービンごとに RMS を計算し、エネルギーの関数としてプロットしたものである。鉄 K 殻の吸収端付近 (~ 6 keV) に変動率の急激な落ち込みと、鉄 L 殻の吸収端付近 (~ 1 keV) に緩やかに上昇したピーク構造が見られる。

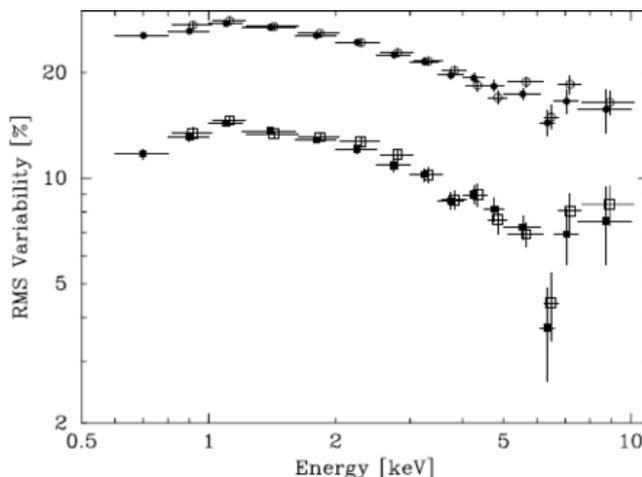


図 1.6: あすか衛星で観測された MCG-6-30-15 の RMS スペクトル (Matsumoto et al. 2003)。時間ビン 23 キロ秒 (円) と 180 キロ秒 (四角) をプロットしている。

1.4 X 線スペクトル変動を説明するモデル

セイファート銀河の特徴的な X 線スペクトル構造や激しい時間変動の起源は、未だ解明されておらず、様々なモデルが提唱され長年の論争となっている。この議論に決着をつけることは、AGN におけるブラックホール周辺の物理構造を明らかにするという点で、非常に重要な意味をもつ。本節では、これまで多くの議論が重ねられてきており、相反する物理構造を考える二つのモデルについて述べる。特に着目すべきは、スペクトル中の広がった鉄輝線構造がどのように生まれるのか、そして、激しい時間変動がどのような物理状態の変化に由来するかの解釈である。

1.4.1 相対論的反射 (disk-line) モデル

スペクトル中の広がった鉄輝線構造を、中心ブラックホールの強大な重力による相対論的効果で広がったものと解釈するのが、相対論的反射モデルである。これは、「ディスクラインモデル」とも呼ばれ、Fabian et al. (2000) でその原理が示されている (図 1.7 左)。まず、回転する降着円盤の視線方向に対する速度によって、輝線は 2 本に分かれて見える。すなわち、前進成分は青方偏移し、後退成分は赤方偏移する。次に、ブラックホールに近い円盤内縁ほど回転速度が速く、特殊相対論的ピーミング効果によって青方ピークが際立つ。さらに、横ドップラー効果と一般相対論的な重力赤方偏移によって、全体が低エネルギー側へ偏移する。結果として、輝線の低エネルギー側で尾を引くように広がった輪郭が出来上がる。Nandra et al. (2007) は、26 のセイファート銀河から得られた XMM-Newton 衛星による 37 の観測データのうち、約 70% で鉄の $K\alpha$ 輝線が広がった構造をしており、その半数以上がディスクラインモデルでフィッティングできることを報告している (図 1.7 右)。

このモデルでは、円盤上で高温コロナの位置する高さの変化によって、観測データの強度変動を説明す

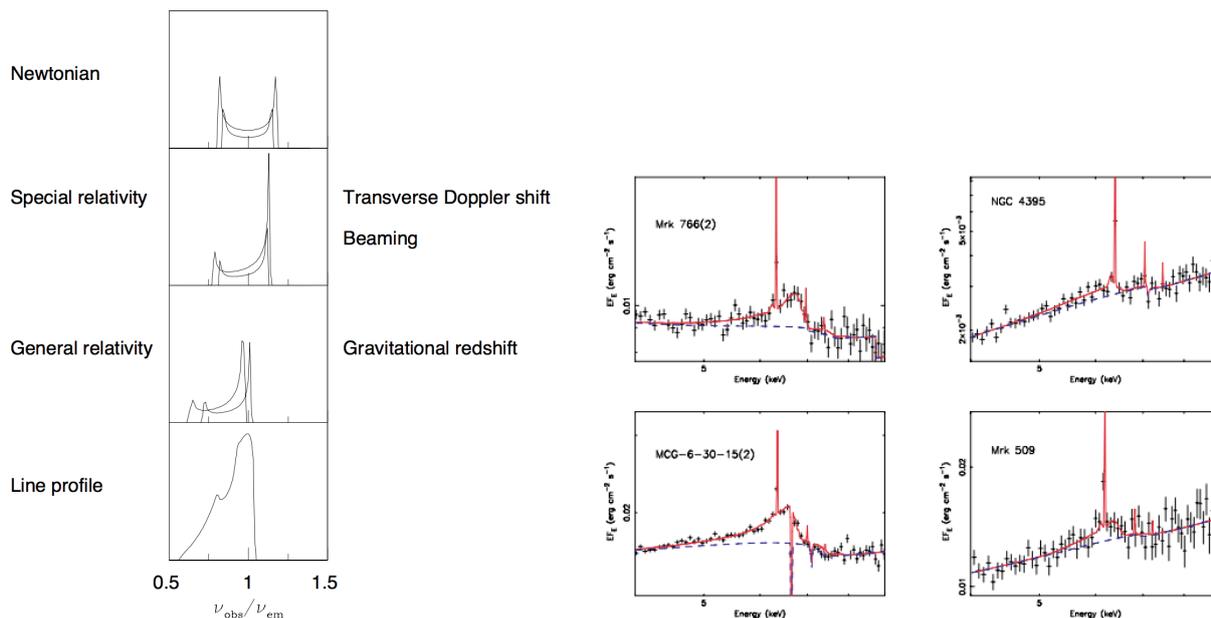


図 1.7: 左: 相対論的効果で広がった鉄輝線の説明 (Fabian et al. 2000)。右: 様々な天体の鉄 K α 輝線に対する観測データ (黒) をディスクラインモデル (赤) でフィッティングした結果 (Nandra et al. 2007 より抜粋)。

る。つまり、直接連続成分 (冪関数) の放射源がブラックホールに近いほど、光の一部が強い重力によって円盤面に落ち込むため、観測される強度が弱くなるという解釈である。これを「ライトベンディング効果」と呼んでいる。反射のような直接成分に対する二次の成分は、一般に強度が直接成分に比例するはずであるが、例外も多く観測されている。このことが、直接成分が一般相対論的な効果を受けて円盤面に落ち込み、反射成分を増強させているという解釈を支持している。

このとき放射源の高温コロナは、回転するブラックホールまでの距離が重力半径 r_g の数倍という非常に近い位置に存在している必要がある。Miniutti & Fabian (2004) は、スピンパラメータ^{*3} $a = 0.998$ のカー (Kerr) ブラックホールを仮定してライトベンディング効果を計算した (図 1.8)。それによると、コロナの高度 $h_s \gg 20 r_g$ ではライトベンディング効果は寄与しなくなる。実際に、すざく衛星によるセイファート銀河 MCG-6-30-15 の 3–45 keV に渡る観測スペクトルの解析から、強度変化を反射率^{*4} R の変化で説明し、同時に、このモデルによって RMS スペクトルも再現している (図 1.9; Miniutti et al. 2007)。

^{*3} $a = 1$ で最も高速回転

^{*4} 直接成分に対する反射成分のフラックス比。 $R = 1$ のとき立体角 2π sr から予測される反射に対応する。

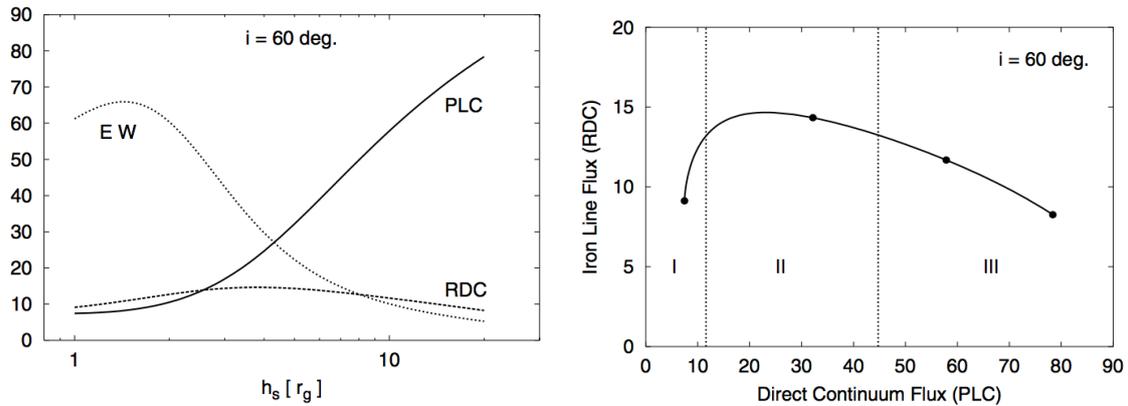


図 1.8: 円盤の傾斜角 $i = 60^\circ$ の時のライトベンディング効果 (Miniutti & Fabian 2004)。左: X 線源の高度を横軸にとり、フラックスを縦軸にとって、直接連続成分 (PLC; power-law component) と反射成分としての鉄輝線 (RDC; reflection dominant component) の大きさを示す。右: PLC フラックスの関数で表した RDC フラックス。線上の点は、左から順に高度 $h_s = 1, 5, 10, 20 r_g$ に該当している。

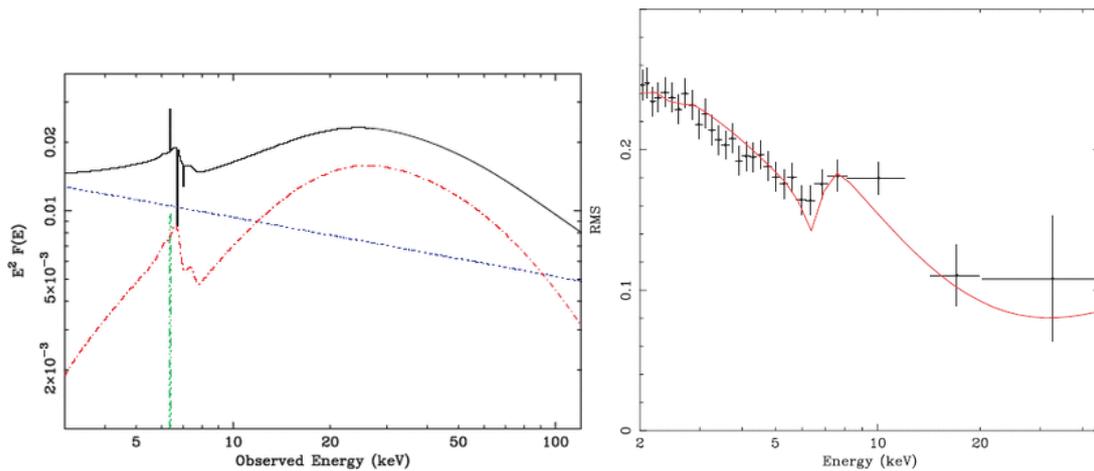


図 1.9: すざく衛星によるセイファート銀河 MCG-6-30-15 の観測スペクトルの解析から得られた、左: 相対論的反射モデルスペクトル (青: 直接連続成分、赤: 反射成分、緑: 鉄 K 殻の蛍光輝線) と、右: RMS スペクトル (黒: 観測、赤: モデル) (Miniutti et al. 2007)。

1.4.2 部分吸収 (partial covering) モデル

紫外線帯域の高波長分解能な観測により明らかとなっている、高階電離し高速度な円盤風の存在は、X 線帯域にも拡張して考えることができる。実際、1.2.2 節で述べたように電離吸収体が観測されている。そして、X 線源がこのような電離吸収体で部分的に隠されると解釈するのが、「部分吸収モデル」である。このとき、視線上で吸収体が X 線源を覆い隠している割合をカバリングファクタと呼び、カバリングファクタの変化によって、観測される激しい時間変動を説明することができる。すなわち、カバリングファクタが大きいほど吸収を強く受け、強度は弱くなる。例えば Turner et al. (2008) は、1 型セイファート銀

河 NGC 3516 で 2001 年に観測されたライトカーブに見られる一時的に強度の落ち込んだ構造を、カバリングファクタの変化で説明できると報告している。このときの電離吸収体は、柱密度 $N_{\text{H}} \sim 2.0 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ 、電離パラメータ $\log \xi \sim 2.2$ であった。ただし [Mehdipour et al. \(2010\)](#) は、同じく NGC 3516 の 2006 年の観測から、時期によってはカバリングファクタのみでは説明されない変動成分の存在を主張し、加えて X 線源の固有な強度変動が寄与することを示唆している。

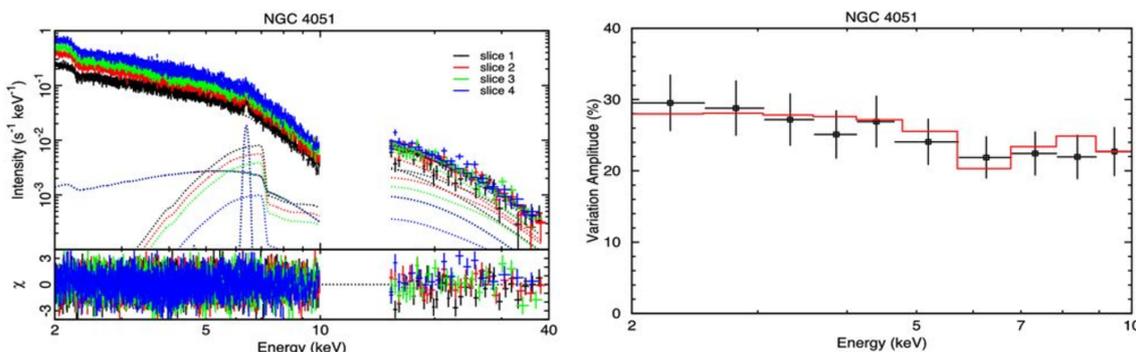


図 1.10: すざく衛星で観測された NGC 4051 の部分吸収モデルによる解析結果 ([Iso et al. 2016](#) より抜粋)。左: 4 つに分割した強度別スペクトルのフィッティング結果。エネルギーを横軸にとり、上段で観測データおよびモデル各成分 (点線) の強度、下段で観測とモデルとの残差を表す。観測強度が明るい/暗い時は、 $\sim 7 \text{ keV}$ 付近に鉄 K 殻の吸収端構造を作るモデル成分が弱く/強くなっている。右: 観測データ (黒) とモデル (赤) の RMS スペクトル。

部分吸収モデルでは、スペクトル中の広がった鉄輝線構造を、比較的高密度で低電離な吸収体による吸収端の構造に由来するものと説明する。[Miyakawa et al. \(2012\)](#) は、[Miniutti et al. \(2007\)](#) が相対論的反射モデルで説明した同じ MCG-6-30-15 のデータについて、そのスペクトルを $N_{\text{H}} = 1.6 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ 、 $\log \xi = 1.63$ の吸収体によって形作られる吸収端構造で説明している。スペクトルが最も暗い時、カバリングファクタは最も大きく ~ 0.6 で、吸収成分が強くなっている。逆に、最も明るい時はカバリングファクタが ~ 0.1 となっており、 10 keV 以下のスペクトルの明暗はカバリングファクタの変化のみで再現することができる。[Iso et al. \(2016\)](#) は、25 のセイファート銀河から得られたすざく衛星による 27 の観測データについて、[Miyakawa et al. \(2012\)](#) による部分吸収モデルに基づくフィッティングを行い、このうち 20 天体でスペクトル変動および RMS スペクトルを再現できることを報告している (図 1.10)。このとき、天体によって電離吸収体の構造や分布が異なり、部分吸収体が二層構造をなすか否か、全体を覆う吸収物質が存在するか否かによって、図 1.11 で示す 4 つに分類されている。このうち最も汎用的な、部分吸収体が二層構造をなす場合について 1.5 節でモデルの詳細を示す。

1.4.3 その他のモデル

相対論的反射モデルや部分吸収モデルの他にも、様々なモデルが提唱されている。例えば [Noda et al. \(2013\)](#) は、従来から知られていた広帯域に渡る冪関数主成分に加え、低エネルギー側で大きく吸収を受けたハードな^{*5}冪関数の成分を考えたモデルを提案している (図 1.12)。この場合、放射源の高温コロ

*5 比較的光子指数が小さく平坦なスペクトル。

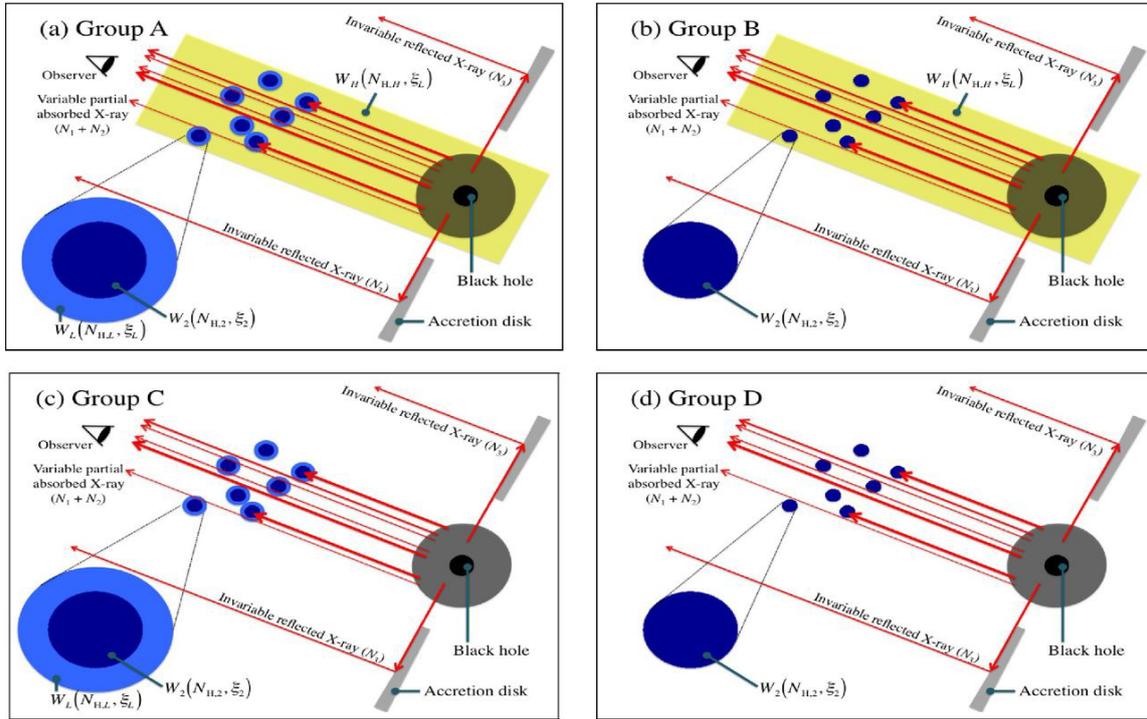


図 1.11: 部分吸収モデルで考える物理描像 (Iso et al. 2016)。ブラックホールの周囲に X 線源となる高温コロナが存在し、(a), (c) では視線上に分布する部分吸収体 (青色の円) が二層構造をしており、(a), (b) では部分吸収体とは別に全体を覆う吸収物質 (黄色の帯) が存在する。

ナは別々に存在することを想定している。さらに Noda et al. (2014) では、すざく衛星による 1 型セイファート銀河 NGC 3227 の観測データから、冪関数主成分とハードな冪関数成分が、数時間の早い変動と数週間の遅い変動にそれぞれ寄与することを明らかにした。このとき、同じ天体の明るい時期には両成分が存在し、暗い時期にはハードな成分しか見られない。また、このモデルで考えるのは冷たい遠方反射であり、相対論的な反射成分は要さない。

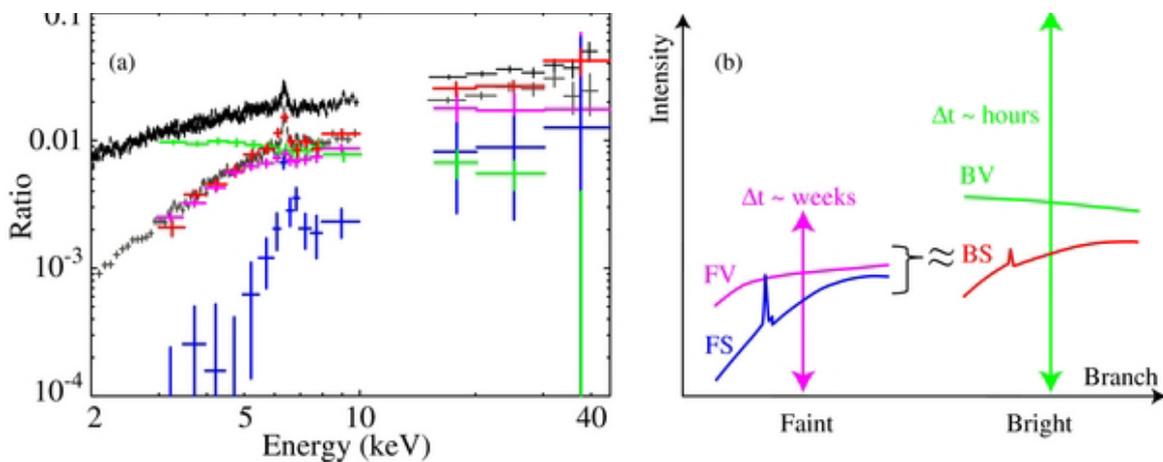


図 1.12: Noda et al. (2014) で提唱されているモデル。明るい/暗い時期を平均した観測データ (黒/グレー)、ならびにモデル成分の主となる冪関数 (緑)、ハードな冪関数 (ピンク)、冷たい反射成分 (青)。ハードな冪関数と反射成分を合わせて赤で示す。

1.5 Variable Double Partial Covering (VDPC) モデル

部分吸収モデルは、現在までに Miyakawa et al. (2012), Mizumoto et al. (2014), Iso et al. (2016) や Yamasaki et al. (2016) によって “Variable Double Partial Covering (VDPC)” モデルという形で提唱されてきている。これは、高密度で低電離な吸収体と、低密度で高電離な吸収体と同じカバリングファクタをもって分布している、すなわち、二層構造をなす電離した部分吸収体が視線上に分布しているというモデルである。本節でその詳細を述べる。

Miyakawa et al. (2012) は、すざく衛星による MCG-6-30-15 の観測スペクトル (1–40 keV) を、次のモデル関数で説明した。

$$F = W_H W_L (N_1 + N_2 W_2) P + N_3 R P + I_{Fe} \quad (1.3)$$

ここで、 W_H , W_L はそれぞれ低密度で高/低電離な吸収体、 W_2 は高密度で低電離な吸収体、 P は直接連続成分の冪関数、 R は冷たい反射成分を表し、それに伴う蛍光鉄輝線が I_{Fe} 、各々の規格化定数が N である。このとき $N = N_1 + N_2$ と書けば、カバリングファクタ $\alpha = N_2/N$ である。すなわち、式 (1.3) で電離吸収の部分を抜き出すと

$$\begin{aligned} F_{\text{abs}} &= W_H W_L (N_1 + N_2 W_2) P \\ &= W_H W_L (1 - \alpha + \alpha W_2) P \end{aligned} \quad (1.4)$$

となる。また、電離吸収体は、水素の柱密度 N_H と電離パラメータ ξ によって $W = \exp[-\sigma(E, \xi) N_H]$ と表される。ここで、 $\sigma(E, \xi)$ は光電吸収の断面積である。Miyakawa et al. (2012) は W_L の柱密度 $N_{H,L}$ とカバリングファクタ α が正相関していることを見出した (図 1.13)。 $N_{H,L} = \alpha N_{H,L}^{(\text{fixed})}$ と表せば、低密度で低電離な吸収体について、次のように書き表せる。

$$\begin{aligned} W_L &= \exp[-\sigma(E, \xi) N_{H,L}] \\ &\simeq 1 - \sigma(E, \xi) N_{H,L} \\ &= 1 - \alpha \sigma(E, \xi) N_{H,L}^{(\text{fixed})} \\ &\simeq 1 - \alpha + \alpha \exp[-\sigma(E, \xi) N_{H,L}^{(\text{fixed})}] \\ &= 1 - \alpha + \alpha W_L^{(\text{fixed})} \end{aligned} \quad (1.5)$$

つまり、式 (1.4) は次で書き換えられる。

$$F_{\text{abs}} = W_H N \left[1 - \alpha + \alpha W_L^{(\text{fixed})} \right] (1 - \alpha + \alpha W_2) P \quad (1.6)$$

このようにして、二つの電離吸収体 $W_L^{(\text{fixed})}$ と W_2 が等しいカバリングファクタをもつことが示唆され、ここから、10 keV 以下に対する VDPC モデルを書き下すと次のようになる。

$$F = A(1 - \alpha + \alpha W_n)(1 - \alpha + \alpha W_k)(P + B) \quad (1.7)$$

ここで、 W_n と W_k はそれぞれ低密度で高電離 (thinner/hotter)、高密度で低電離 (thicker/colder) な部分吸収体を表し、 $P + B$ は直接連続成分の冪関数と円盤放射、 A は星間吸収である。Mizumoto et al.

(2014) は狭輝線 1 型セイファート銀河 1H 0707–495 の観測スペクトルとライトカーブ (0.5–12 keV) を VDPC モデルによって説明した。このとき、1H 0707–495 に対しては W_H が不要であり、 W_n と W_k がそれぞれスペクトル中で鉄の L 殻と K 殻の吸収端構造を担うことを示した (図 1.14)。

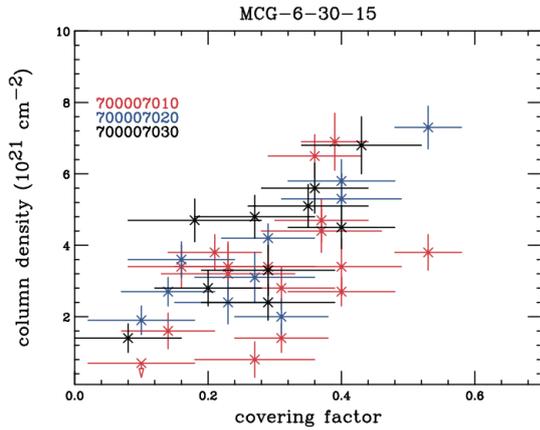


図 1.13: カバリングファクタ α に対する柱密度 $N_{H,L}$ のプロット (Miyakawa et al. 2012)。

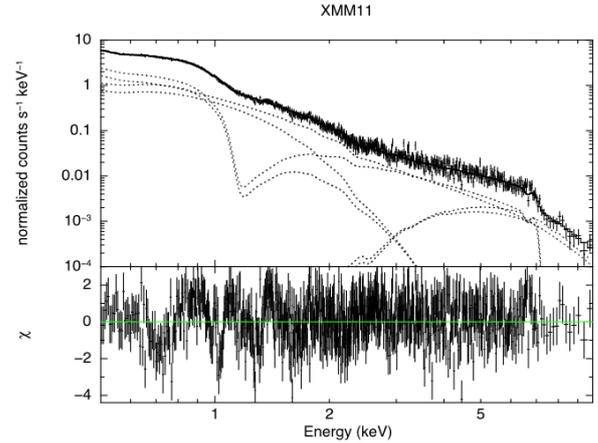


図 1.14: XMM-Newton で観測された 1H 0707–495 の VDPC モデルによるスペクトルフィッティングの結果 (Mizumoto et al. 2014)。エネルギーを横軸にとり、上段で観測データおよびモデル各成分 (点線) の強度、下段で観測とモデルとの残差を表す。~1 keV と ~7 keV にそれぞれ鉄 L 殻と K 殻の吸収端構造がある。

また、Yamasaki et al. (2016) は狭輝線 1 型セイファート銀河 IRAS 13224–3809 (0.5–10 keV) に対して VDPC モデルを適用し、RMS スペクトルに見られる鉄 K 殻の吸収端付近 (~6 keV) の落ち込みと、鉄 L 殻の吸収端付近 (~1 keV) で切り立ったピーク構造を再現した (図 1.15)。ここで、観測される変動がカバリングファクタの変化によるものと考えれば、光学的厚み τ として、

$$\begin{aligned}
 F_{\text{abs}}(E, t) &\propto [1 - \alpha(t) + \alpha(t)e^{-\tau_n(E)}][1 - \alpha(t) + \alpha(t)e^{-\tau_k(E)}] \\
 &= [1 - \alpha(t)(1 - e^{-\tau_n(E)})][1 - \alpha(t)(1 - e^{-\tau_k(E)})] \\
 &\simeq \begin{cases} [1 - \alpha(t)\tau_n(E)][1 - \alpha(t)(1 - e^{-\tau_k(E)})] & (\tau_n \ll 1) \\ [1 - \alpha(t)(1 - e^{-\tau_n(E)})][1 - \alpha(t)] & (\tau_k \gg 1) \end{cases} \quad (1.8)
 \end{aligned}$$

と表せる。すなわち、 $\tau_n \ll 1$ となる K 吸収端付近では、K 吸収端エネルギーまでエネルギーが上がるにつれて τ_n が小さくなっていき、K 吸収端エネルギーで τ_k が急激に大きくなることで RMS スペクトルに落ち込みが生じる。また、 $\tau_k \gg 1$ となる低エネルギー側の帯域では、L 吸収端エネルギーで τ_n が最も大きくなり、RMS スペクトルにピーク構造を生む。実際にカバリングファクタを変化させた時に計算されるモデル RMS スペクトルを図 1.16 に示す。

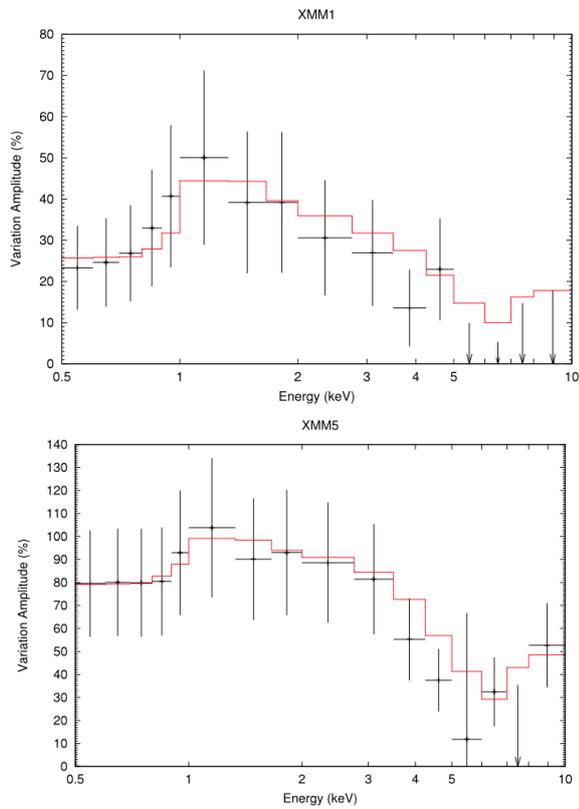


図 1.15: IRAS 13224-3809 の観測データ (黒) とモデル (赤) の RMS スペクトル (Yamasaki et al. 2016 より抜粋)。

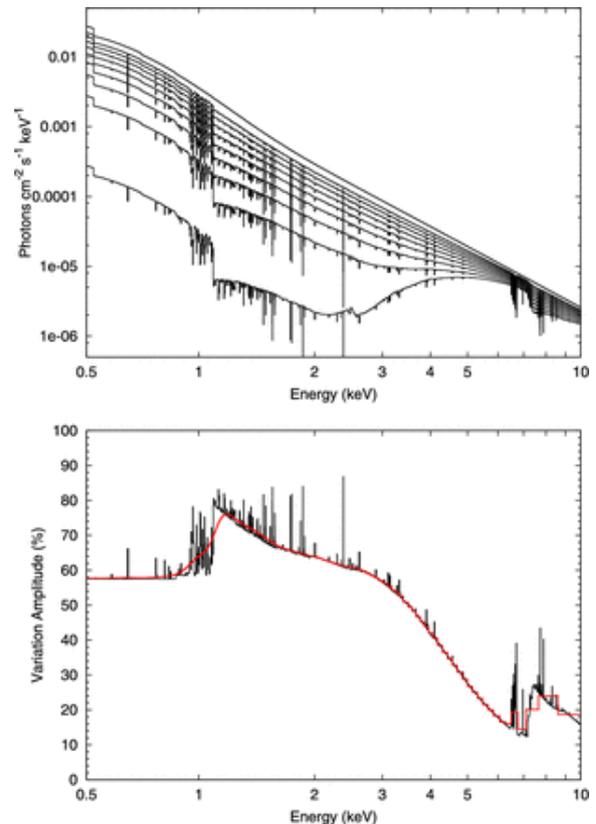


図 1.16: 上: 上から順にカバリングファクタが 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.99 である時の VDPC モデルスペクトル。下: カバリングファクタを 0.01 から 0.99 まで変化させた時の RMS スペクトル。黒はエネルギー分解能 ~ 1 eV の理想的な観測装置を使った場合で、赤は XMM-Newton/EPIC-pn を使用した場合。(Yamasaki et al. 2016)。

Mizumoto et al. (2014) と Yamasaki et al. (2016) が、カバリングファクタのみ変化させて作成したモデルライトカーブは、低エネルギー側 (3 keV 以下) で観測ライトカーブをよく再現している。しかし、高エネルギー側ほどモデル点と観測点との間に生じる残差が目立ち、カバリングファクタの変化のみでは観測を完全に説明できていないことがわかる (図 1.17)。このことから、観測される強度変動には、カバリングファクタの変化に加え、高エネルギー側ほど顕著な X 線源の固有な強度変化が寄与することが示唆されている。つまり、低エネルギー側ほど吸収を顕著に受けるため、強度変動に対する寄与はカバリングファクタの変化が支配的であるが、高エネルギー側になるほど固有な強度変化を無視できないと考えられる。

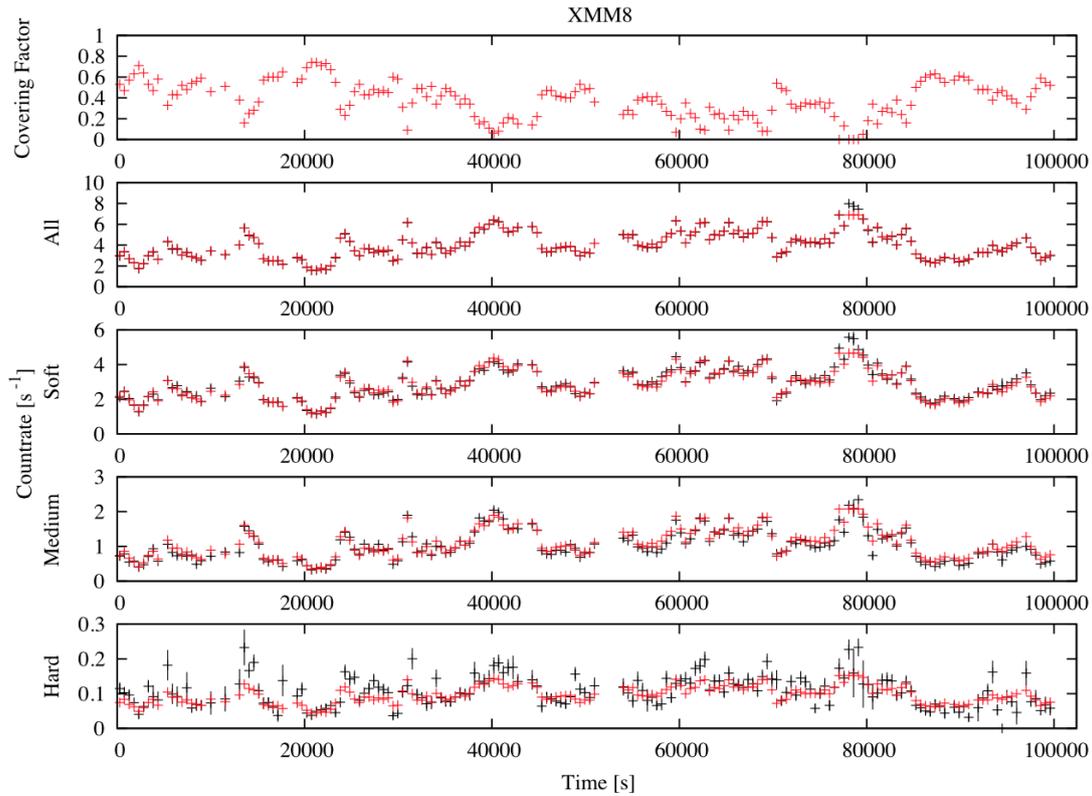


図 1.17: XMM-Newton 衛星による 1H 0707–495 のデータについて、上のパネルから順に、カバリングファクタ変動のプロット、All: 0.5–12 keV, Soft: 0.5–1.0 keV, Medium: 1.0–3.0 keV, Hard: 3.0–10.0 keV の観測データ (黒) とモデル (赤) のライトカーブ (Mizumoto et al. 2014)。

1.6 本研究の目的

これまで VDPC モデルは、すざく衛星や XMM-Newton による ~ 10 keV 以下の観測データに適用されてきた。その結果、吸収を顕著に受けるこの帯域では、主にカバリングファクタの変化で観測される X 線スペクトル変動を説明できた。吸収の効果が無視される ~ 20 keV 以上を含めた場合、X 線源に固有な強度変化を念頭に置いて VDPC モデルの整合性を精査する必要がある。本研究では、3–78 keV で過去最高感度を誇る、2012 年に打上げられた X 線天文衛星 NuSTAR による観測データを活用して、より高エネルギー側を含む広帯域 X 線スペクトル変動に対する VDPC モデルの適合性を検証する。

第 2 章

X 線天文衛星と観測装置

Contents

2.1	NuSTAR 衛星	32
2.1.1	概要	32
2.1.2	光学モジュール	32
2.1.3	焦点面モジュール	33
2.2	XMM-Newton 衛星	35
2.2.1	概要	35
2.2.2	X 線望遠鏡	35
2.2.3	X 線 CCD カメラ EPIC	36
2.2.4	反射型回折格子 RGS	38
2.3	すざく衛星	39
2.3.1	概要	39
2.3.2	軟 X 線望遠鏡 XRT	40
2.3.3	軟 X 線 CCD カメラ XIS	42

本章では、本研究で使用した X 線天文衛星とその観測装置の概観を述べる。なお、第 2 節および第 3 節においては「シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 III 高エネルギー天文学」(2008 年、日本評論社)を参考にした。

2.1 NuSTAR 衛星

2.1.1 概要

The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR; [Harrison et al. 2013](#)) は、10 keV 以上の硬 X 線帯域における高感度な分光観測に特化した小型の X 線天文衛星ミッションである。カリフォルニア工科大学と NASA ジェット推進研究所 (JPL) により 2012 年 6 月 13 日に打ち上げられ、高度約 600 km の低高度近赤道軌道 (軌道傾斜角 6°) に投入された。この軌道を周回することで、高エネルギー放射線が大量に降り注ぐ南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly, SAA) の影響を最小限に抑えられる。すなわち、硬 X 線信号の検出に際し重大な問題となる荷電子由来の検出器雑音 (バックグラウンド) を低減することができる。

NuSTAR 衛星は、3–79 keV の硬 X 線を集光できる X 線反射望遠鏡を搭載した光学モジュールと、CdZnTe 検出器の置かれた焦点面モジュールとを全長 10 m の伸展マストで結合した構造をしている (図 2.1)。その基本性能を表 2.1 に示す。

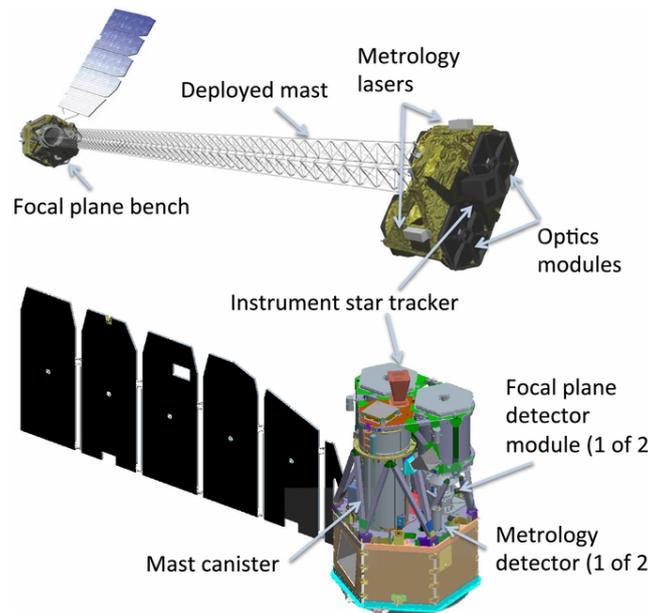


図 2.1: マスト伸展前/後 (下/上) の NuSTAR 概観 ([Harrison et al. 2013](#))。

2.1.2 光学モジュール

X 線に対する物質の屈折率は 1 より小さいので、光を屈折させて集光することが難しい。そのため、現在の多くの X 線望遠鏡では、小さい角度で入射してきた X 線を反射させる「全反射」や、周期的な層構

表 2.1: NuSTAR 衛星の基本性能 (Harrison et al. 2013 を基に作成)。

衛星	軌道遠地点高度	650 km
	軌道傾斜角	6°
望遠鏡	焦点距離	10.14 m
	視野	~10' at 10 keV ~6' at 68 keV
	空間分解能	58'' (HPD ¹)
		18'' (FWHM ²)
検出器	エネルギー帯	3–78.4 keV
	エネルギー分解能	~400 eV at 10 keV (FWHM)
		~900 eV at 68 keV (FWHM)
	時間分解能	2 μ s

¹ Half Power Diameter² Full Width of Half Maximum

造によって干渉を引き起こし、強度を大きくし反射率を高める「ブラッグ反射」を利用している。

NuSTAR 衛星では、円錐近似した Wolter I 型光学系 (図 2.2) が用いられている。これは、回転双曲面と回転放物面で 2 回全反射させ、光軸から外れた方向での像収差を小さくした光学系である。同心円状に並べられた 133 枚の反射鏡から構成され、焦点距離は 10.14 m となっている。米国の Chandra 衛星や欧州の XMM-Newton 衛星といった従来の軟 X 線望遠鏡では、白金 (Pt)、イリジウム (Ir) や金 (Au) といった重元素のコーティングを施すことによって低エネルギー光子に対する高い反射率を達成していた。しかし、高エネルギー光子に対しては急激に反射率が下がるため、NuSTAR 衛星では “depth-graded multilayers” と呼ばれる構造の鏡面コーティングが採用されている。これは、タングステン (W) や白金 (Pt) といった高電子密度な重元素と、ケイ素 (Si) や炭素 (C) といった軽元素とを交互に多重コーティングした multilayers-mirror において、その薄膜の厚みに深さ勾配をつけたものである。これにより、高エネルギー光子に対する視野や集光面積が確保されている。NuSTAR 衛星の鏡面は、内側の 89 枚に対しては Pt/C、外側の 44 枚には W/Si のコーティングが施され、78.4 keV までの入射 X 線を反射させることができる。78.4 keV は Pt の K 吸収端に対応し、これ以上の高エネルギー光子は吸収されてしまう。図 2.3 に他衛星と比較した有効集光面積を示す。

2.1.3 焦点面モジュール

2 つある光学系それぞれの焦点面 (Focal Plane Module A/B, FPMA/B) には、 2×2 のアレイ状に並んだ 4 つのテルル化亜鉛カドミウム (CdZnTe) 半導体で構成された検出器 (図 2.4) が置かれている。これら焦点面はヨウ化セシウム (CsI) 結晶の絶縁体に覆われ、光学軸と異なる方向から到来する高エネルギー宇宙線などの雑音成分を遮断する。各 CdZnTe 検出器は室温で動作し、画素数 32×32 ピクセル、画

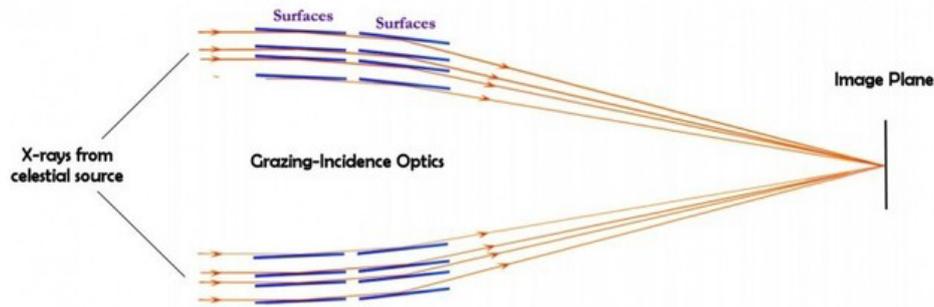


図 2.2: Wolter I 型の模式図。(http://www.nustar.caltech.edu/page/optics より)

素サイズは 0.6 mm 四方である。画素一つ一つに読み出し回路が接合されているため、入射 X 線との相互作用が起こるたびに読み出しが行われる。

一般に半導体検出器では、入射 X 線との相互作用によって素子内に生じた電子正孔対を収集して X 線の検出をする。X 線の相互作用は光電吸収が支配的であり、あるエネルギー E の X 線光子が半導体の空乏層に入射するとある確率で光電吸収を起こす。光電吸収によって作られた光電子は、エネルギーを失うまで半導体物質中の荷電子帯にいる電子を励起して約 E/W 個の電子正孔対を次々に生成する。ここで、 W は半導体物質の種類で決まる平均電離エネルギーで、CdZnTe の場合 $W \sim 4.6$ eV である。このように生成された電子の集まり（一次電子雲）を正確に検出して、入射 X 線光子のエネルギー E を測定することができる。

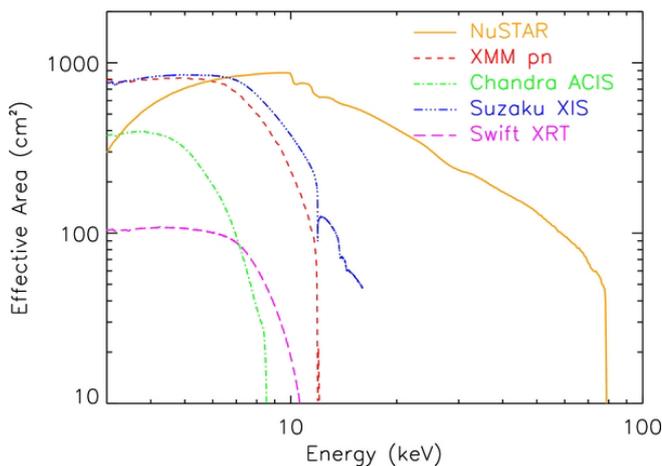


図 2.3: 横軸にエネルギーをとった有効面積のプロット (Harrison et al. 2013)。NuSTAR (オレンジ) のみが 10 keV 以上の硬 X 線帯域において大きな有効面積をもっている。

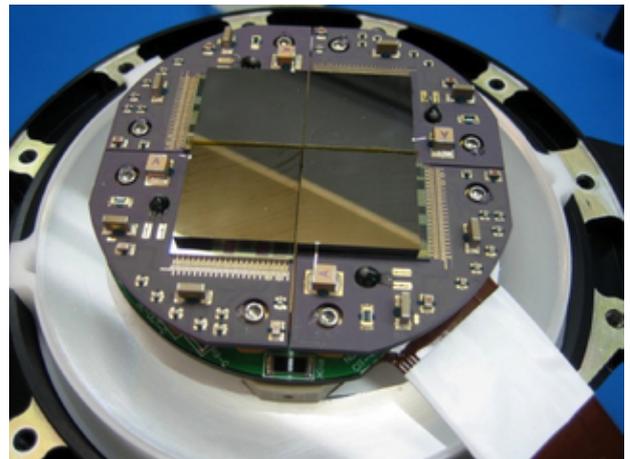


図 2.4: NuSTAR 衛星に搭載された CdZnTe 検出器。

2.2 XMM-Newton 衛星

2.2.1 概要

XMM-Newton は、欧州宇宙機関 (ESA) によって 1999 年 12 月 10 日に打ち上げられた大型の X 線天文衛星である (Jansen et al. 2001)。近地点 7,000 km、遠地点 114,000 km の高高度楕円軌道に投入され、約 48 時間かけて周回している。そのため、地球の影に隠れる時間が短く、連続した長い観測時間が得られる。図 2.5 で示すように、XMM-Newton 衛星には 3 台の X 線反射望遠鏡が搭載されており、焦点面それぞれに X 線 CCD カメラ (European Photon Imaging Camera, EPIC) が置かれている。1 つは EPIC-PN と呼ばれ直接 X 線を検出し、残り 2 つは EPIC-MOS と呼ばれ、これらは反射型回折格子 (Reflection Grating Spectrometer, RGS) を通過した 0 次光を検出する。RGS による 1 次および 2 次の回折光は、別のカメラで検出される。このようにして、XMM-Newton 衛星では通常分光観測のほか、点源に対する高分解能分光観測を実現している。衛星と搭載機器について、基本性能を表 2.2 と表 2.3 に示す。

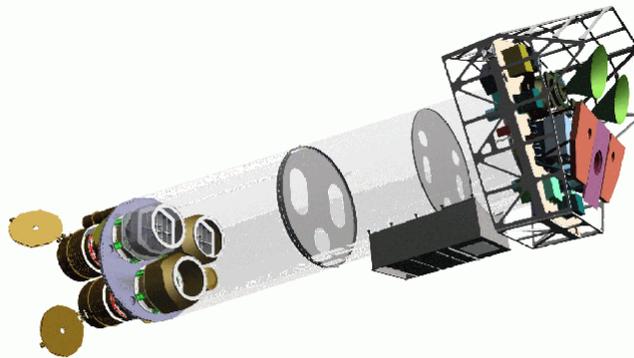


図 2.5: XMM-Newton 衛星の概観 (Jansen et al. 2001)。左下に 3 台の望遠鏡があり、それぞれの焦点面に検出器が置かれている。

2.2.2 X 線望遠鏡

XMM-Newton 衛星には、Wolter I 型の光学系が用いられた X 線望遠鏡が 3 台搭載されている。口径は最大で 70 cm、焦点距離は 7.5 m である。反射鏡は金のコーティングが施され、さらにニッケルのメッキがなされているが、厚みは 0.5–1 mm と薄く、1 台あたり 58 枚で構成されている。これによって、大きな有効面積と比較的すぐれた空間分解能を実現している。

表 2.2: XMM-Newton 衛星の基本性能。(Jansen et al. 2001 を基に作成)。

衛星	軌道遠地点高度	114,000 km (1999 年 12 月)
	軌道周期	48 hr
	軌道傾斜角	-40°
望遠鏡	焦点距離	7.5 m
	有効面積	1550 cm ² at 1.5 keV 600 cm ² at 8 keV
	空間分解能	5'' (FWHM)

表 2.3: XMM-Newton 衛星搭載観測装置の基本性能。(XMM-Newton Users Handbook を基に作成)。

	EPIC-MOS	EPIC-pn	RGS
視野	30'	30'	~5'
エネルギー帯域	0.15–12 keV	0.15–12 keV	0.35–2.5 keV (-1 order)
エネルギー分解能	~70 eV at 1 keV ~150 eV at 6.4 keV	~80 eV at 1 keV ~150 eV at 6.4 keV	3.2 eV (-1 order) 2.0 eV (-2 order)
時間分解能	1.75 ms	0.03 ms	0.6 s

2.2.3 X 線 CCD カメラ EPIC

CCD (Charged Coupled Device) カメラとは、2 次元アレイ状に半導体検出器を並べたものである。X 線 CCD カメラでは撮像と分光を同時に行うことができ、表面照射型 (Front-Illuminated, FI) と背面照射型 (Back-Illuminated, BI) の 2 種類がある。FI は電極側から X 線を入射させる型で、エネルギー分解能に優れる反面、受光面に電極や絶縁層などの構造を持つために低エネルギー X 線の検出効率が悪い。一方、BI は低エネルギー側の検出効率は優れているが、X 線の吸収点が電極から遠くなるためエネルギー分解能が悪くなる。

XMM-Newton 衛星に搭載された 2 つの EPIC-MOS (Turner et al. 2001) は、FI 型 CCD カメラで、それぞれ 7 つの MOS (metal oxide semi-conductor) 型 CCD から構成される。望遠鏡の主焦点に置かれた EPIC-MOS では、RGS の回折格子を通過した 0 次光が集光するため、望遠鏡に入射した X 線の約 44% だけが検出される。一方の EPIC-pn (Strüder et al. 2001) は、BI 型 CCD カメラで、12 個の CCD から構成されている。いずれも 30' の視野をもっている。それぞれの外観と画像イメージを図 2.6 に示す。また、有効面積を図 2.7 に示す。本研究では有効面積が大きな EPIC-pn のデータを使用した。

EPIC の観測モードには、すべての CCD の全ピクセルを使用する “Full Frame” モード、CCD およびピクセルを部分的に使用する “Partial Window” モード、空間情報を制限することにより高速で読み出しを行う “Timing” モードの 3 種類がある。観測提案の際にどの観測モードを選択するかは、目的や天体の

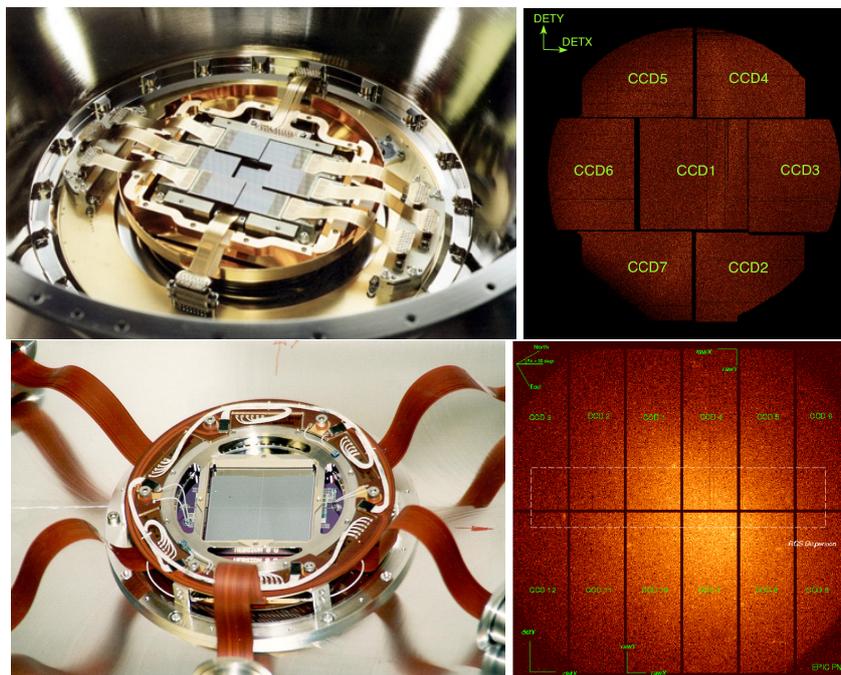


図 2.6: EPIC-MOS (上図) と EPIC-pn (下図) それぞれの外観および画像イメージ。
(<http://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/technical-details-epic> より)

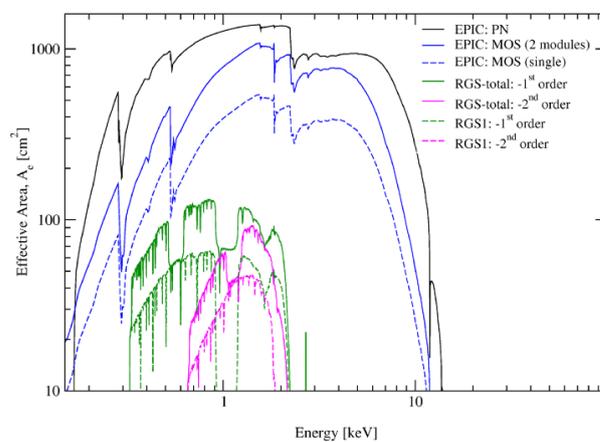


図 2.7: EPIC および RGS の有効面積 (XMM-Newton Users Handbook)。軸は対数スケールでとっている。

明るさ等に応じて決定する。

2.2.4 反射型回折格子 RGS

X 線分光観測における高いエネルギー分解能を得る手段の一つとして、回折格子（グレーティング）がある。X 線のエネルギーは $\lambda = ch/E = 1.24 \times 10^7/E$ [cm/keV] として波長換算でき、回折光の干渉を利用することで高分解能な分光計を実現している。CCD の半導体検出器のみでは、エネルギー分解能の典型値として ~ 120 eV (FWHM, at 6 keV) 程度であるが、回折格子を使用すると ~ 10 eV 程度までを達成することができる。ただし、X 線回折格子による高分解能観測は明るい点源に対してのみ有効である。銀河団のような空間的に広がった天体に対しては、異なる点からの異なるエネルギーが検出器上の同じ位置に来てしまうため感度をもたない。X 線回折格子には反射型と透過型があり、いずれの場合も望遠鏡とその焦点面の間に設置され、直接光および回折光がローランド円と呼ばれる円周上に焦点を結ぶ（図 2.8 左）。反射型では透過型よりもエネルギー分解能に優れるが、エネルギーが高くなると反射率が落ちてしまう特徴がある。

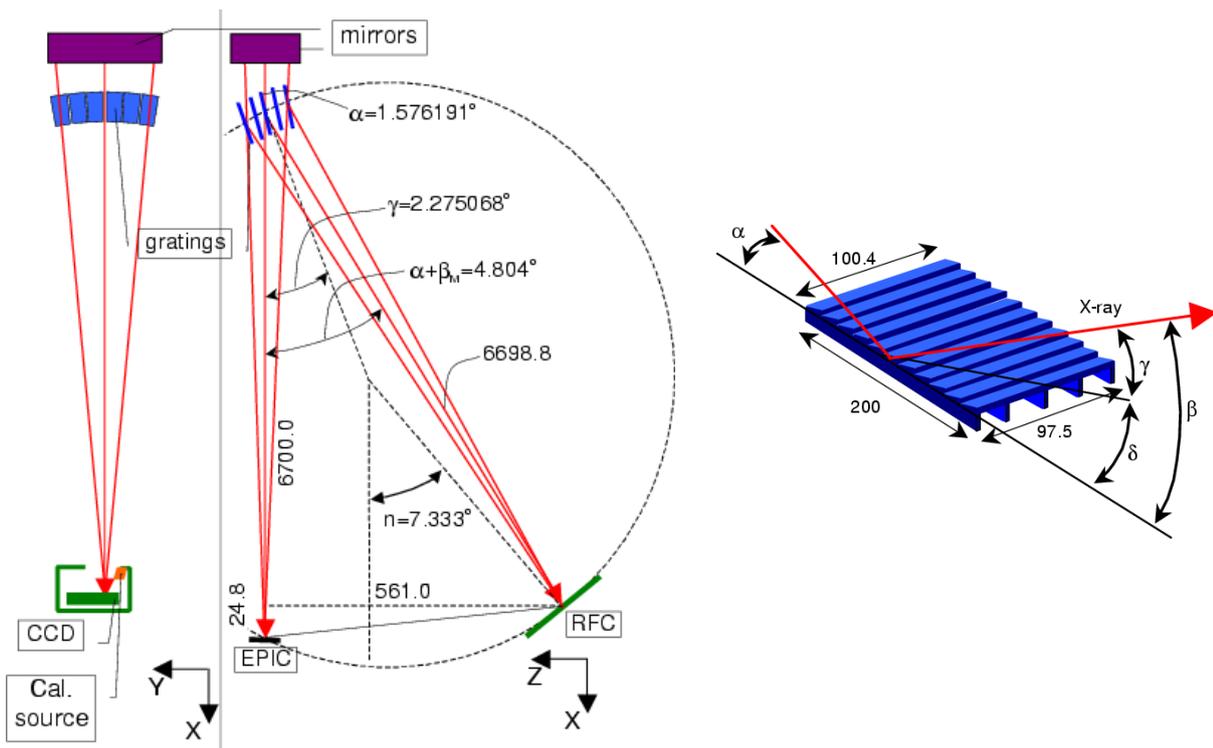


図 2.8: RGS の概観 (den Herder et al. 2001)。赤線で X 線の光路を示す。RGS の回折格子 (RGA) と検出器 (RFC) はローランド円の円周上にあり、望遠鏡の主焦点には EPIC-MOS が置かれている。右は回折格子の拡大図。

XMM-Newton 衛星に搭載された 3 台の望遠鏡のうち 2 台は、反射型回折格子 RGS (den Herder et al. 2001) と組み合わせて使用される。RGS は、182 の溝が切り込まれた回折格子 (Reflection Grating Assemblie, RGA) と BI 型 CCD カメラ (RGS Focal Camera, RFC) から構成されている (図 2.8)。回

折格子への入射角と反射角をそれぞれ α , β ($\alpha < \beta$) とすると、回折光の強め合う条件は

$$m\lambda = d (\cos \beta - \cos \alpha)$$

となる。ここで、回折の次数 $m = -1, -2, \dots$ 、格子定数 d ($1/d = 645.6 \text{ mm}^{-1}$) である。波長 $\lambda/2$ の 2 次回折光は、波長 λ の 1 次回折光に重なってしまうが、CCD カメラ自身のエネルギー分解能によって次数を分離することができる。

2.3 すざく衛星

2.3.1 概要

X 線天文衛星「すざく」(図 2.9) は、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所と国内外の諸機関によって開発された全長 6.5 m、幅 5.4 m、重量 1680 kg の X 線天文衛星である (Mitsuda et al. 2007)。すざく衛星は「はくちょう (1979 年打上げ)」、「てんま (1893 年)」、「ぎんが (1987 年)」、「あすか (1993 年)」に続き、日本で 5 番目の X 線天文衛星として 2005 年 7 月 10 日に鹿児島県内之浦から M-V-6 号ロケットで打ち上げられた。そして 2015 年 8 月 26 日に、約 10 年間に渡る観測運用を終了した。高度約 550 km の略円軌道上を約 96 分で周回し (図 2.10)、高高度楕円軌道を周回する米国の Chandra 衛星や欧州の XMM-Newton 衛星に比べ、地球磁気圏の内側に位置するため、荷電子由来の検出器雑音を低く抑えられることが大きな特徴の一つである。

すざく衛星に搭載された観測装置は、4 台の X 線 CCD カメラから構成される X 線撮像検出器 (X-ray Imaging Spectrometer, XIS)、硬 X 線検出装置 (Hard X-ray Detector, HXD) と、X 線マイクロカロリメーター (X-Ray Spectrometer, XRS) の 3 種類である。このうち 4 台の XIS と XRS は、5 つある X 線反射望遠鏡 (X-Ray Telescope, XRT) の焦点面にそれぞれ置かれている (図 2.9)。しかし、XRS は衛星を軌道投入した約 1 か月後に冷却材であるヘリウムを消失したことにより、運用当初から科学観測が不可能となった。すざく衛星とその搭載機器について、基本性能を表 2.4 と表 2.5 に示す。本研究では、硬 X 線帯域について最も感度の高い NuSTAR 衛星のデータを使用するため、すざく衛星の HXD データは使用しなかった。

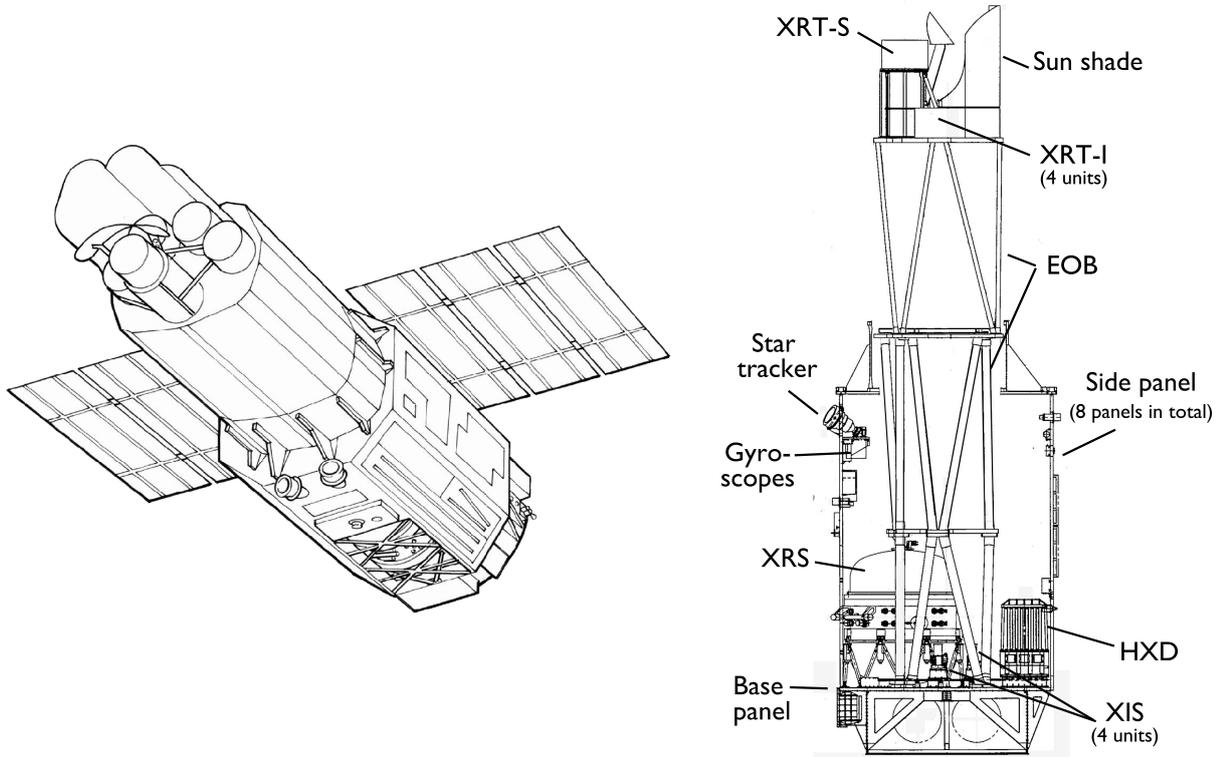


図 2.9: X 線天文衛星すざくの概観 (Mitsuda et al. 2007)。右図はすざくに搭載されている各装置の位置。

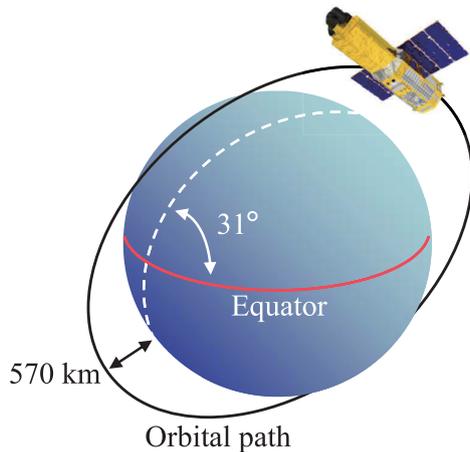


図 2.10: X 線天文衛星すざくの軌道 (The Suzaku Technical Description より)。

表 2.4: すざく衛星の基本性能。(Mitsuda et al. 2007 を基に作成)。

衛星	軌道遠地点高度	568 km
	軌道周期	96 min
	軌道傾斜角	31°
	観測効率	~43 %
XRT	焦点距離	4.75 m
	視野	~17' at 1.5 keV ~13' at 8 keV
	有効面積	440 cm ² at 1.5 keV 250 cm ² at 8 keV
	空間分解能	2' (HPD)

2.3.2 軟 X 線望遠鏡 XRT

すざく衛星搭載の XRT (Serlemitsos et al. 2007) は、口径 40 cm の多重薄板 X 線望遠鏡であり、円錐 2 段で近似した Wolter I 型の光学系が用いられている。全部で 5 台搭載されていて、そのうち 4 台

表 2.5: すざく衛星搭載観測装置の基本性能。(Mitsuda et al. 2007 を基に作成)。

	XIS	HXD
視野	17'.8×17'.8	34'×34'(≤ 100 keV) 4°.5×4°.5 (≥ 100 keV)
エネルギー帯	0.2–12.0 keV	10–70 keV (PIN) 40–600 keV (GSO)
エネルギー分解能	~130 eV at 6 keV (FWHM)	~3.0 keV (PIN, FWHM) 7.6/ $\sqrt{E_{\text{MeV}}}$ % (GSO, FWHM)
有効面積	330 cm ² (FI), 370 cm ² (BI) at 1.5 keV 160 cm ² (FI), 110 cm ² (BI) at 8 keV	~160 cm ² at 20 keV ~260 cm ² at 100 keV
時間分解能	8 s (normal mode), 7.8 ms (P-sum mode)	61 μ s
ピクセル数	1024×1024 pixels	

は XRT-I、残りの 1 台は XRT-S と呼ばれる (図 2.11)。XRT-I は 175 枚の反射鏡からなり、焦点距離は 4.75 m で、その焦点面には XIS が置かれている。一方、XRT-S は 168 枚の反射鏡で構成され、焦点距離は 4.5 m、その焦点面には XRS が配置されている。XRT-I 1 台あたりの有効面積は 1.5 keV と 7.0 keV でそれぞれ 450 cm² と 250 cm² となっており、4 台合わせると 1000 cm² を超える。

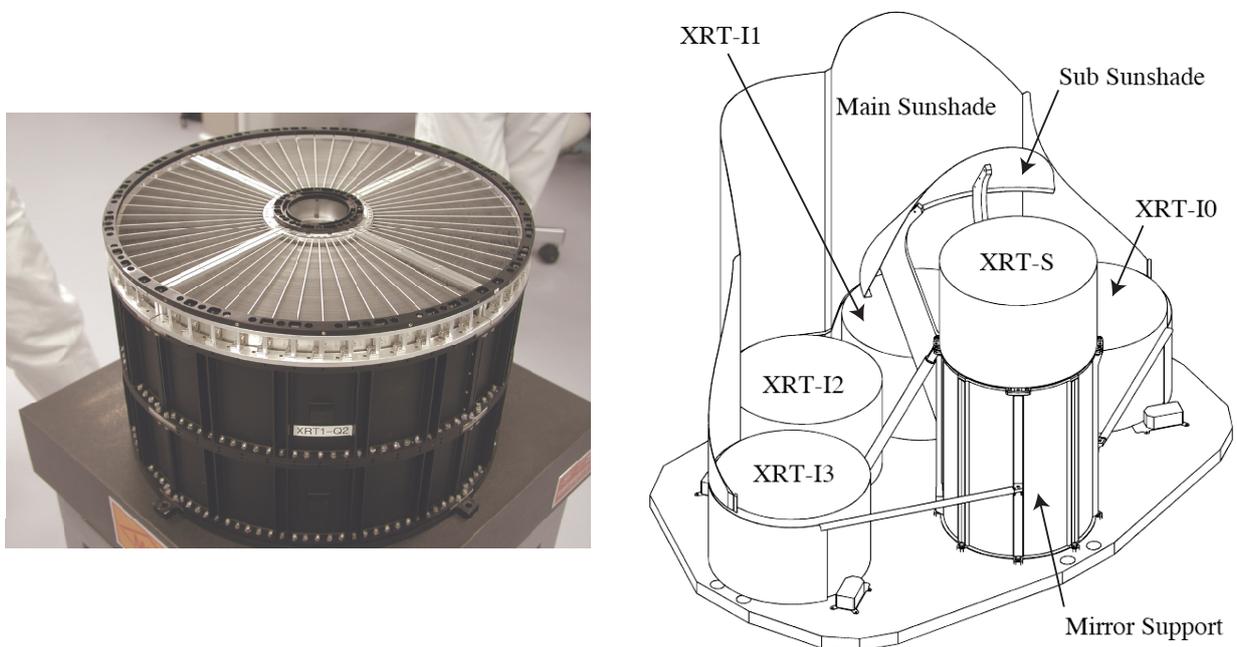


図 2.11: XRT-I1 のフライトモデルの外観 (左) と XRT-I, XRT-S の配置図 (右)(Serlemitsos et al. 2007)。

2.3.3 軟 X 線 CCD カメラ XIS

4 台の X 線 CCD カメラから構成された検出器である XIS (図 2.12; Koyama et al. 2007) は、それぞれが XRT-I の焦点面に置かれている。XIS は 0.2–12.0 keV に感度を持ち、天体の撮像と分光を同時に行うことができる。XIS 0, 2, 3 は表面照射型 (FI)、XIS 1 は背面照射型 (BI) の CCD カメラである。両者の量子効率の比較を図 2.13 に示す。しかし、微小隕石の衝突と思われる事故により、2006 年 11 月 9 日から XIS 2 の科学観測が不可能となった (Dotani & Suzaku Team 2008)。一般に CCD カメラは可視光の信号も検出してしまうため、各 XIS には可視光遮断フィルター (Optical Blocking Filter; OBF) が取り付けられている。

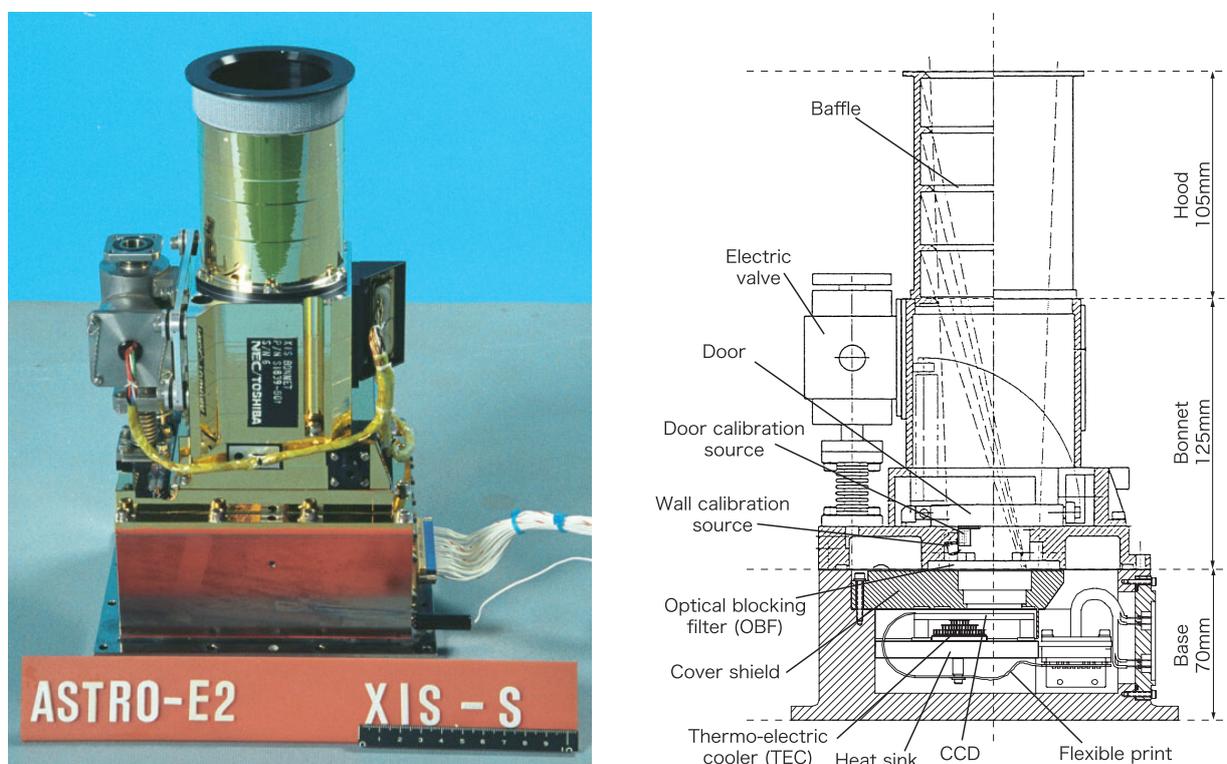


図 2.12: すざく衛星に搭載されている XIS の外観 (左) とその断面図 (右)(Koyama et al. 2007)。

XIS は XRT と組み合わせることにより、 $17'.8 \times 17'.8$ の視野を達成できる。XIS の観測モードには、Normal モードと Parallel-sum (P-sum) モードという二つの Clock モードがあり、時間分解能はそれぞれ 8 秒と 7.8 ミリ秒である。X 線 CCD カメラでは、電荷転送方式として Frame Transfer 型が用いられる。Frame Transfer 型は撮像領域のほかに露光後の CCD フレームデータを一時的に保持しておく蓄積領域を持っており、ここに X 線を遮断するシールドが設けられている。撮像領域のデータを蓄積領域に転送し、蓄積領域から読み出し口まで転送が行われている間に、受光面では次の露光を行う。そのため、露光中に 1 ピクセルに複数の X 線光子が入射した場合、X 線光子を個々に区別できずに、各 X 線光子のエネルギーが足し合わされた 1 つの光子として判別されてしまう。これをパイルアップと呼び、明るい天

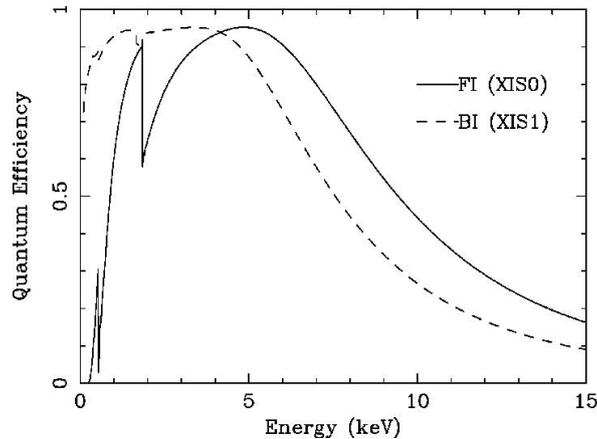


図 2.13: XIS の FI と BI の量子効率の比較図 (Koyama et al. 2007)。横軸はエネルギー、縦軸は量子効率を表す。

体を観測した場合に起こりやすい。Normal モード の場合は時間分解能とパイルアップ耐性を高めるために、Window オプションと Burst オプションを指定することができる。Window オプションは、CCD 全体ではなく、CCD の $1/n$ ($n = 4$ or 8) のピクセルのみを読み出すオプションである。観測した領域のイベントを失うことなく観測ができるが、観測できる領域が $1/n$ に制限されてしまい、較正線源も観測されない。一方、Burst オプションは、8 秒間の露光に対し、最初の $(8 - m)$ 秒のイベントを捨ててしまうオプションである ($m = 0.1, 0.3, 0.5, 0.6, 2.0$)。観測領域のイメージは失われず較正線源も観測されるが、 $(1 - m/8)$ の割合のイベントが失われる。また P-sum モードは、撮像領域において縦方向に複数列のイベントを加算して読み出すことで、縦方向の位置情報は失うかわりに $8 \text{ 秒} / 1024 = 7.8 \text{ ミリ秒刻み}$ での信号の読み出しを行う。

第3章

観測データ

Contents

3.1	観測天体	46
3.2	データ処理	48
3.2.1	NuSTAR のデータ処理	50
3.2.2	XMM-Newton のデータ処理	53
3.2.3	すざくのデータ処理	54

本章では、観測天体の選別方法および解析のためのデータ処理方法について述べる。

3.1 観測天体

解析は、一般公開されているアーカイブデータを用いて行った。広帯域な X 線スペクトルの時間変動データを得るためには、3–78 keV に感度をもつ NuSTAR と、およそ 0.2–10 keV に感度をもつ XMM-Newton または「すざく」と同時に観測されたデータが必要である。そのため、次の条件を満たす観測天体を選択した。

- NuSTAR と XMM-Newton または「すざく」で同時観測されたセイファート銀河。
- その同時観測データセットを使用した先行論文が出版されており、同時観測期間中に顕著な時間変動が確認できること。

上記の条件を満たす、5 つの該当天体 (MCG-6–30–15、NGC 4593、NGC 1365、Swift J2127.4+5654、MCG-5–23–16) について解析を行った (表 3.1)。表 3.2 に使用した観測データを観測シーケンス毎にまとめる。

表 3.1: 天体情報

天体名	分類	赤経: α	赤緯: δ	赤方偏移: z
MCG-6–30–15	Sy1	13:35:54	$-34^{\circ}17'44''$	0.0076
NGC 4593	Sy1	12:39:39	$-05^{\circ}20'39''$	0.0083
NGC 1365	Sy1.8	03:33:36	$-36^{\circ}08'26''$	0.0055
Swift J2127.4+5654	NLSy1	21:27:45	$+56^{\circ}56'35''$	0.0144
MCG-5–23–16	Sy1.9	09:47:40	$-30^{\circ}56'56''$	0.0082

表 3.2: 観測データ

天体	衛星	シーケンス番号	観測日	exposure [sec] ^{*1}	観測モード ^{*2}
MCG-6-30-15	NuSTAR	60001047002	2013-01-29	23,270	
		60001047003	2013-01-30	127,232	
		60001047005	2013-02-02	29,646	
	XMM-Newton	0693781201	2013-01-29	133,776	SW-ME
		0693781301	2013-01-31	133,776	SW-ME
		0693781401	2013-02-02	48,478	SW-ME
NGC 4593	NuSTAR	60001149002	2014-12-29	23,319	
		60001149004	2014-12-31	21,681	
		60001149006	2015-01-02	21,333	
		60001149008	2015-01-04	23,122	
		60001149010	2015-01-06	21,209	
	XMM-Newton	0740920201	2014-12-29	24,477	SW-ME
		0740920301	2014-12-31	24,477	SW-ME
		0740920401	2015-01-02	24,476	SW-ME
		0740920501	2015-01-04	21,478	SW-ME
		0740920601	2015-01-06	30,378	SW-ME
NGC 1365	NuSTAR	60002046002	2012-07-25	36,258	
		60002046003	2012-07-26	40,588	
		60002046005	2012-12-24	66,297	
		60002046007	2013-01-23	73,650	
		60002046009	2013-02-12	69,877	
	XMM-Newton	0692840201	2012-07-25	134,538	FF-ME
		0692840301	2012-12-24	124,341	FF-ME
		0692840401	2013-01-23	123,200	FF-ME
Swift J2127.4+5654	NuSTAR	60001110002	2012-11-04	49,202	
		60001110003	2012-11-05	28,765	
		60001110005	2012-11-06	74,583	
		60001110007	2012-11-08	42,110	
	XMM-Newton	0693781701	2012-11-04	135,076	SW-ME
		0693781801	2012-11-06	135,076	SW-ME
		0693781901	2012-11-08	71,476	SW-ME
MCG-5-23-16	NuSTAR	60001046002	2013-06-03	160,478	
	Suzaku	708021010	2013-06-01	159,526	normal
		708021020	2013-06-05	138,846	normal

*1 NuSTAR/FPMA, XMM-Newton/EPIC-pn, Suzaku/XIS について記載

*2 FF = Full Frame, SW = Small Window, ME = MEduium filter

3.2 データ処理

シーケンス番号で区別されている各観測データについて、解析可能なデータの取得されている時間帯 (Good Time Interval, GTI) の期間は様々であるが、本研究では、各観測の中で2衛星の観測時間帯が完全に一致した期間のみのデータを解析に利用した。このとき、それぞれの衛星で太陽系重心補正 (barycenter correction) を行い、時刻の基準を太陽系重心として統一した。ここから、同時観測のデータセットを作成した。表 3.3 に各データセットの同時観測 GTI の合計時間、そして図 3.1 でこの同時観測 GTI を適用して作成した各衛星のライトカーブを示す。

表 3.3: 解析に使用した同時観測データ

天体	データ番号	NuSTAR	XMM/Suzaku	観測日	同時観測時間 (秒)
MCG-6-30-15	1	60001047002/3	0693781201	2013-01-29	67,619
	2	60001047003	0693781301	2013-01-31	69,415
	3	60001047005	0693781401	2013-02-02	18,555
NGC 4593	1	60001149002	0740920201	2014-12-29	11,428
	2	60001149004	0740920301	2014-12-31	6,502
	3	60001149006	0740920401	2015-01-02	12,344
	4	60001149008	0740920501	2015-01-04	9,041
	5	60001149010	0740920601	2015-01-06	15,585
NGC 1365	1	60002046002/3	0692840201	2012-07-25	69,593
	2	60002046005	0692840301	2012-12-24	60,721
	3	60002046007	0692840401	2013-01-23	55,565
	4	60002046009	0692840501	2013-02-12	65,982
Swift J2127.4+5654	1	60001110002/3	0693781701	2012-11-04	78,070
	2	60001110005	0693781801	2012-11-06	79,000
	3	60001110007	0693781901	2012-11-08	43,212
MCG-5-23-16	1	60001046002	708021010/20	2013-06-03	107,237

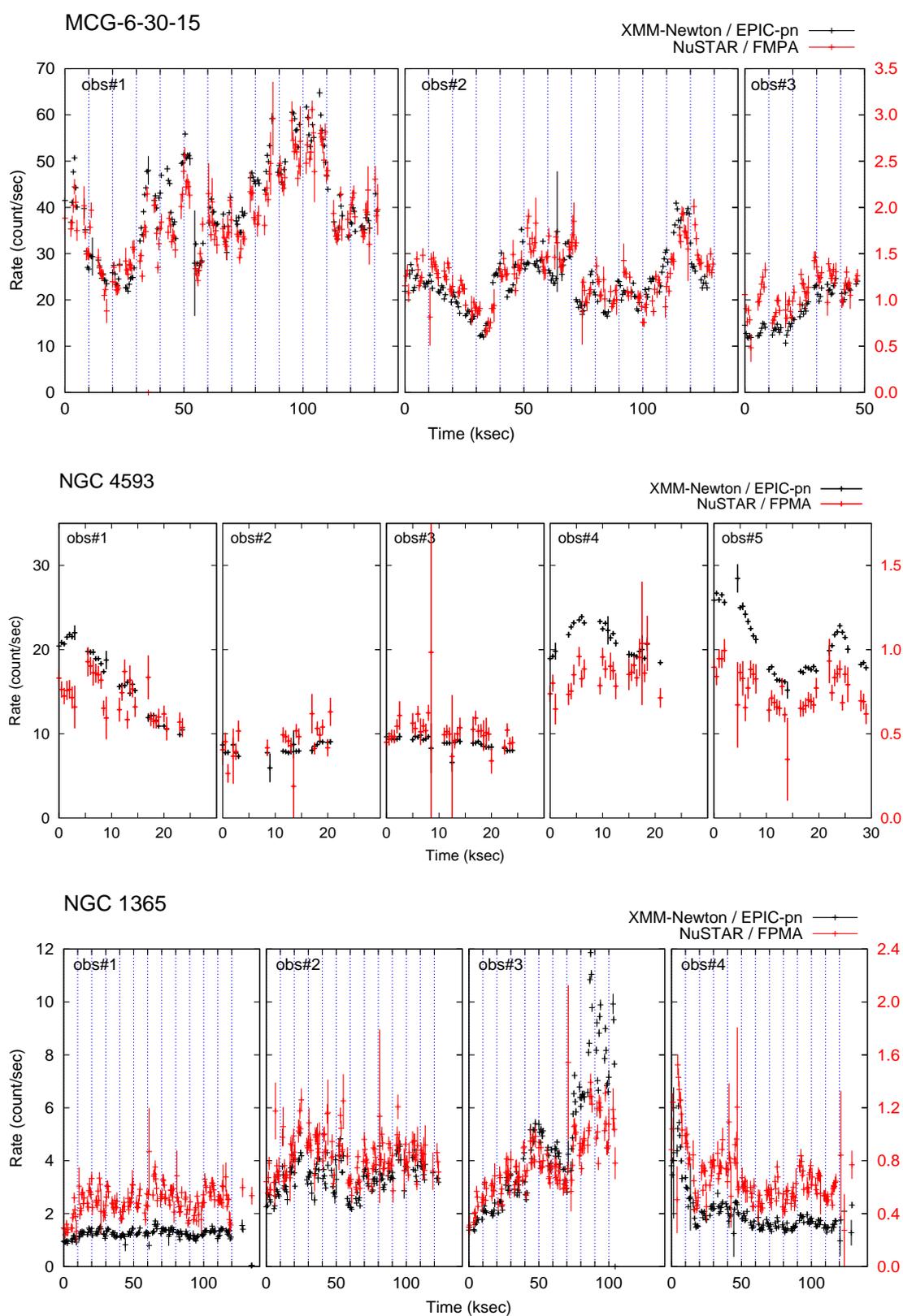


図 3.1: 同時観測ライトカーブ。各データセット毎で横軸に時間 (キロ秒) をとり、縦軸にカウントレート (カウント毎秒) を二軸でプロットしている。XMM-Newton/EPIC-pn は 0.2–10 keV, Suzaku/XIS は 0.5–14 keV, NuSTAR/FPMA は 3–78 keV のデータ。

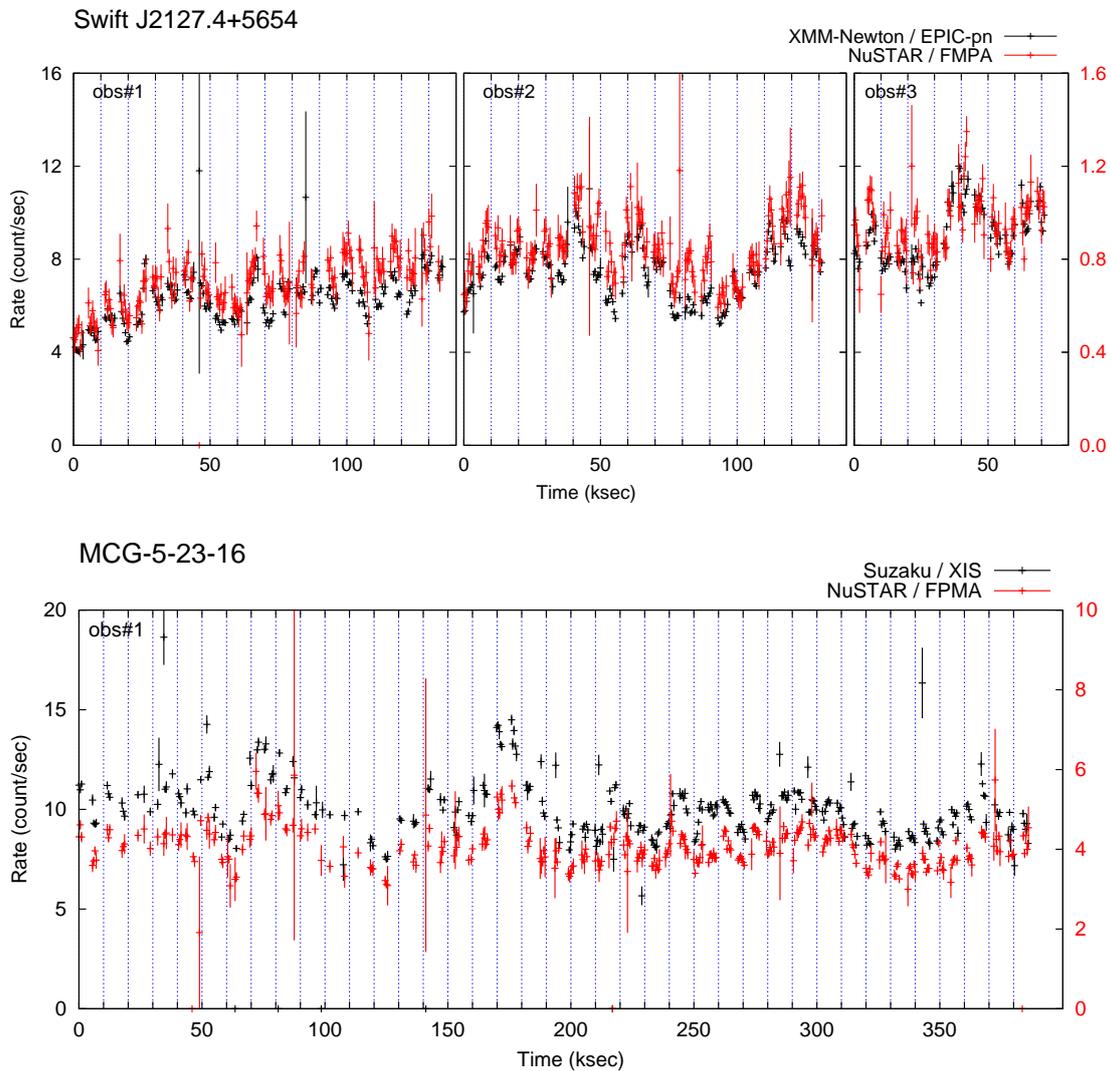


図 3.1: *continue.*

3.2.1 NuSTAR のデータ処理

NuSTAR のデータ処理には、NASA の HEASARC (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center) から提供されている解析ソフト HEASoft (ver.6.16 または ver.6.19) に含まれる NuSTARDAS (NuSTAR Data Analysis Software) パッケージを用いた。公開解析マニュアル^{*1}を参照し、まず `nupipeline` を使用してデータ較正とイベントスクリーニングおよびエクスポージャーマップの作成を行った。これらは結果的に一つのイベントファイルとして出力される。エクスポージャーマップとは、天球上のピクセル毎に算出した正味の露出時間を画像として出力したものである。このとき、以下の条件

^{*1} http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nustar/analysis/nustar_swguide.pdf

を満たすようにイベントスクリーニングを実行した。

- 衛星の観測方向と地球縁とのなす角が 3° より大きい
- 衛星が南大西洋磁気異常帯 (SAA) を通過していない
- 衛星が姿勢変更している最中ではない
- 較正用線源が検出器の視野に入り込んでいない
- 衛星の姿勢情報が、光学モジュールに設置されたスタートラッカによって定まっている
- モジュールを連結しているマストの動きを追うレーザー点が、PSD (Position Sensing Detectors) のグリッド内に収まっている
- 検出器において、明滅する等の異常を示す “bad pixel” を含めない
- GRADE 判定が 0–26 に該当する (図 3.2)

ここで、GRADE 判定とは、X 線イベントの検出器上での形状分類のことである。単一ピクセルのイベントならば、より高い位置分解能が得られる。また、複数ピクセルのイベントであれば、X 線ではないバックグラウンド事象を判別する指標にもなる。NuSTAR の場合は 3×3 四方のピクセルアレイによって、図 3.2 で示すような 0 から 32 までの GRADE が定義されている。

次に `nuproducts` を使用して、イベントファイルから天体領域と背景領域を抽出したうえで、それぞれの画像イメージ、ライトカーブ、エネルギースペクトルおよび応答関数を出力した。応答関数とは、スペクトル解析に必要な RMF (Redistribution Matrix File) と ARF (Ancillary Responce File) を指す。RMF は検出器のチャンネルと入射 X 線のエネルギーを換算する行列であり、ARF はエネルギーの関数として望遠鏡の有効面積の情報を有したファイルである。なお、領域の大きさは点源に対する検出器の PSF の大きさを考慮して決定しており、DS9^{*2}を用いて目視により領域中心位置を決め、天体領域を $1'$ の円、背景領域を内径 $2'$ 、外径 $4'$ の同心円環で切り出した (例: 図 3.3 左)。

^{*2} SAOImage DS9 は天文学でよく使用されている FITS 形式ファイルに対応した画像表示アプリケーションである。

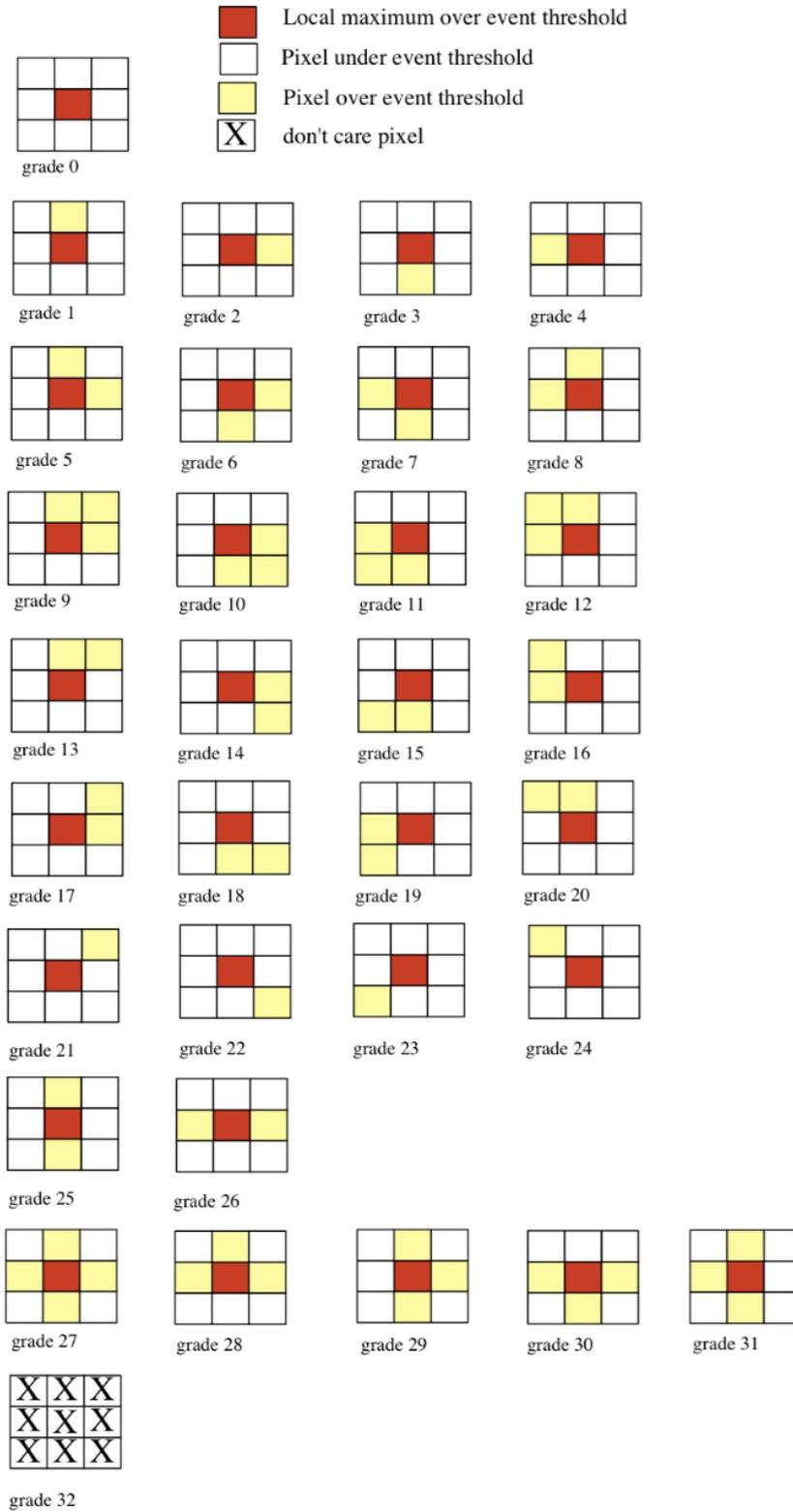


図 3.2: NuSTAR の GRADE 判定 (http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nustar/analysis/nustar_swguide.pdf より)

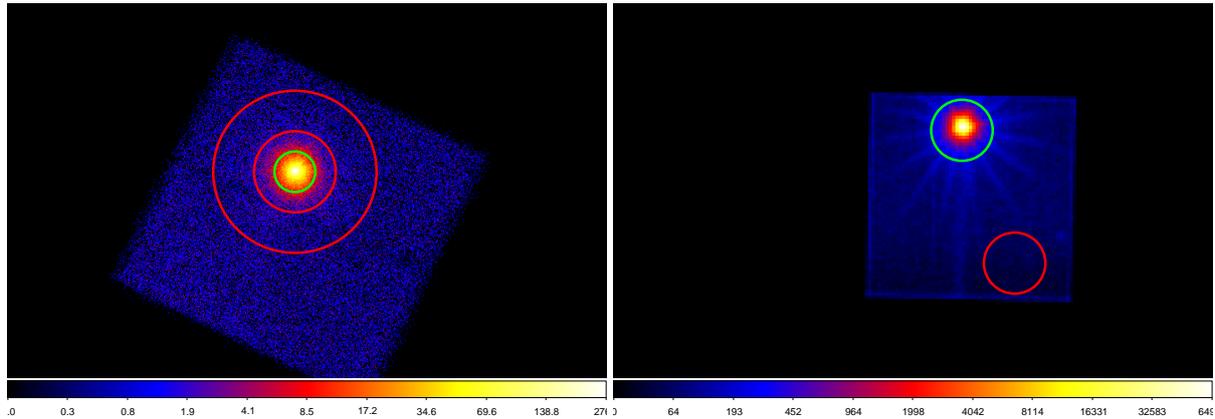


図 3.3: NuSTAR/FPMA (左) と XMM-Newton/EPIC-pn (右) の天体領域 (緑) および背景領域 (赤) を DS9 で表示した例 (Swift J2127.4+5654, obs#2)

3.2.2 XMM-Newton のデータ処理

XMM-Newton のデータ処理には、専用の解析ソフトウェア SAS (Science Analysis Software) を用いた。公開マニュアル^{*3}を参照し、まず EPIC-pn については、`epproc` を用いて、生の観測データ (Observation Data File, ODF) に最新の較正データファイル (Current Calibration File, CCF) を適用して再較正を行った。天体と背景の領域は DS9 を用いて目視によりそれぞれの中心位置を決め、40'' の円領域で切り出した (例: 図 3.3 右)。その後、`evselect` を用いて以下のようなフィルタリングを行い、天体領域と背景領域のそれぞれについて画像イメージ、ライトカーブ、エネルギースペクトルを出力した。

- 単一イベント (PATTERN=0) で 10–12 keV の帯域におけるカウントレートが 0.4 より大きくなるような、バックグラウンドフレアを起こしていない GTI を適用
- ‘FLAG==0’ として bad pixel を含めない
- ‘PATTERN<=4’ として GRADE 判定が 0–4 に該当する (図 3.4)

応答関数は `rmfgen` と `arfgn` により出力した。また、ライトカーブのバックグラウンド補正は `epiclccorr` を用いた。

RGS については、`rgsproc` を用いてイベントファイルおよびスペクトルの出力を行った。今回は RGS1/2 のそれぞれ 1 次回折光のみを解析に使用した。RMF は `rgsrmfgen` により出力した。

^{*3} http://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/sas_usg/USG/

出力し、ライトカーブのバックグラウンド補正は `lcmath` で行った。

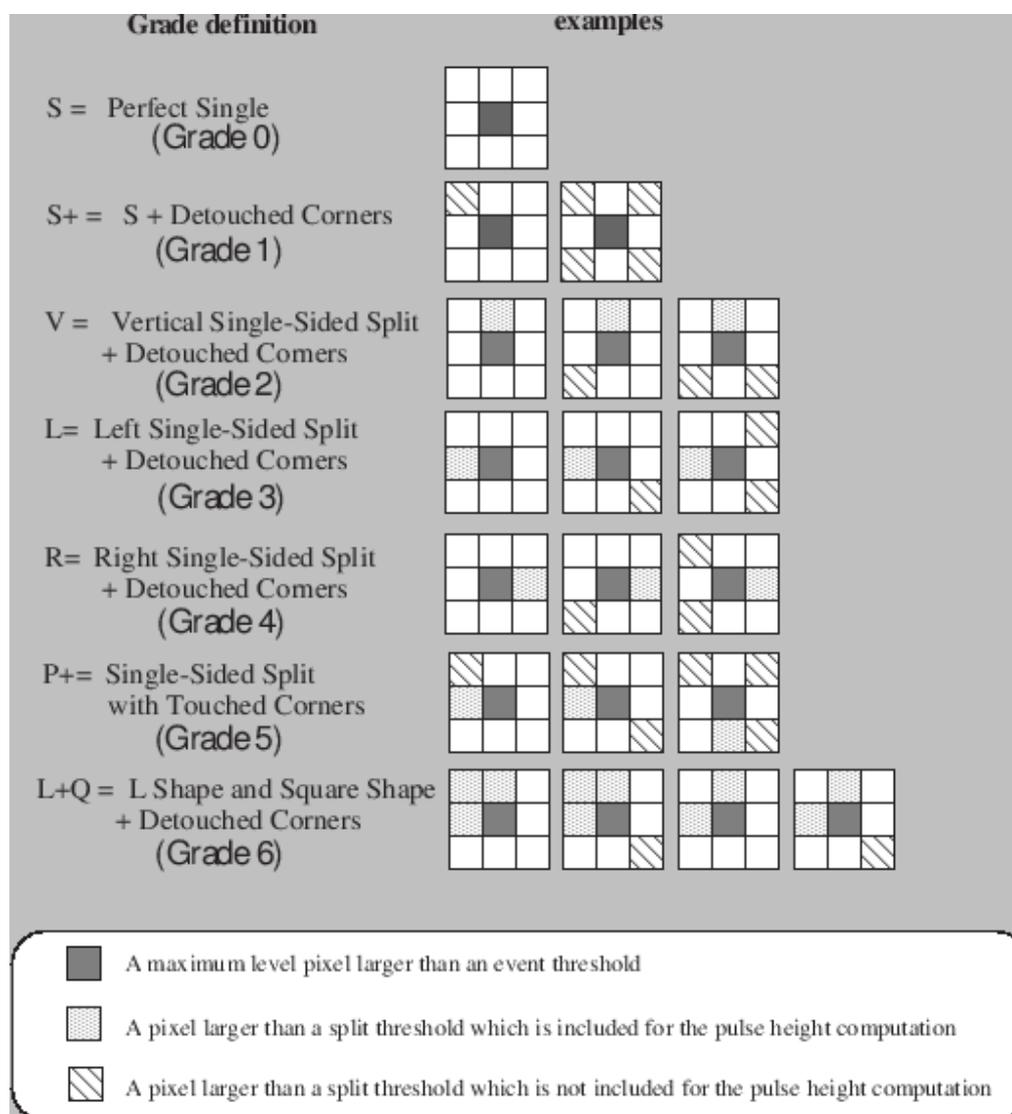


図 3.5: ASCA GRADE (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/asca/abc/> より)

第 4 章

解析と結果

Contents

4.1	VDPC モデル関数	58
4.2	時間平均スペクトル	60
4.2.1	時間平均スペクトルの作成	60
4.2.2	スペクトルフィッティング	60
4.3	時間スライススペクトル	67
4.3.1	時間スライススペクトルの作成	67
4.3.2	時間スライススペクトルの同時フィッティング	67
4.4	強度スライススペクトル	75
4.4.1	強度スライススペクトルの作成	75
4.4.2	強度スライススペクトルの同時フィッティング	75
4.5	RMS スペクトル	86
4.5.1	RMS の計算	86
4.5.2	RMS スペクトルの結果	87
4.6	ライトカーブ	89
4.6.1	ライトカーブシミュレーションの手順	89
4.6.2	ライトカーブシミュレーションの結果	90

解析は以下の 5 種類について行った。本章では、VDPC モデルを適用して行った各種解析の具体的な手法と、得られた結果について述べる。

1. 時間平均スペクトルのモデルフィッティング (4.2 節)
2. 時間スライススペクトルのモデルフィッティング (4.3 節)
3. 強度スライススペクトルのモデルフィッティング (4.4 節)
4. RMS スペクトルの観測データとモデルの比較 (4.5 節)
5. ライトカーブの観測データとモデルの比較 (4.6 節)

4.1 VDPC モデル関数

スペクトル解析は HEASoft に含まれるスペクトル解析ソフト XSPEC を用いて行った。XSPEC では、FITS 形式ファイルで天体領域と背景領域のスペクトルデータおよび応答関数を読み込み、背景成分を取り除き応答関数のなかったエネルギースペクトルを出力、描画することができる。さらに、XSPEC モデル関数あるいは独自のモデル関数を使って、カイ二乗フィッティングを行うことができる。

まず、VDPC モデル関数の統一形を次のように定めた。

$$F = \frac{A [(P + B)(1 - \alpha + \alpha W_1)(1 - \alpha + \alpha W_2) W_3 + R_{I_{Fe}} + B + I_{gas} + G]}{(cutoffpl + diskbb)(mtable * partcov)(mtable * partcov) * mtable + pexmon + diskbb + mekal + gaussian} \quad (4.1)$$

これを XSPEC モデル関数で記述すると、次のように書ける。

$$\frac{phabs*((cutoffpl + diskbb)(mtable * partcov)(mtable * partcov) * mtable + pexmon + diskbb + mekal + gaussian)}$$

各々の XSPEC モデル関数とその構成パラメータについては、表 4.1 で示す。この VDPC モデル関数の統一形では、下線部の成分がモデルの中核を表し、その他は天体ごとにオプションな成分である。ここで想定する、放射源まわりのジオメトリおよび X 線放射が観測されるまでの過程は、次の通りである。

- 銀河系内および AGN 母銀河の星間吸収を考慮する。[A/phabs]
- 連続放射成分として、高温コロナからの冪関数型の X 線放射および (場合によっては) 降着円盤からの黒体放射がある。[(P + B)/(cutoffpl+diskbb)]
- これが柱密度と電離度の異なる二層構造をした電離吸収体による部分的な吸収を受ける。[(1 - α + αW₁)(1 - α + αW₂)/(mtable * partcov)(mtable * partcov)]
- 場合によっては、全体を覆い隠す吸収体が存在する。[W₃/mtable]
- 鉄輝線を伴う冷たい反射成分がある。[R_{I_{Fe}}/pexmon]
- 場合によっては、降着円盤からの黒体放射は吸収体クラウド分布より外側からも放出される。[B/diskbb]
- 場合によっては、AGN 母銀河にホットプラズマが存在し、その熱放射が複数の元素の輝線を伴って観測される。[I_{gas}/mekal]
- 場合によっては、さらに吸収線が観測される。[G/gaussian]

表 4.1: XSPEC モデル関数とその物理パラメータ

XSPEC モデル関数	物理パラメータ
phabs	重元素による星間吸収 $M(E) = \exp[-n_H \sigma(E)]$. ここで $\sigma(E)$ は光電吸収の断面積。Wilms et al. (2000) による太陽組成を仮定している。
	nH 水素の柱密度 n_H [10^{22} cm^{-2}]
cutoffpl	カットオフのある冪関数 $A(E) = K E^{-\Gamma} \exp[-E/E_c]$
	PhoIndex 光子指数 Γ
	HighECut カットオフエネルギー E_c [keV]
	norm 規格化定数 K [photons/keV/cm ² /s] @ 1keV
diskbb	降着円盤からの黒体放射
	Tin 円盤内縁の温度 [keV]
	norm 規格化定数 $[(R_{\text{in}}/D_{10})^2 \cos \theta]$ R_{in} /[km] は円盤内縁半径、 D_{10} /[10kpc] は中心からの距離、円盤傾斜角 $\theta = 0$ である。
mtable	電離した物質による吸収
	column 物質の柱密度 [cm^{-2}]
	logxi 電離パラメータ $\xi = L/nr^2$ の対数値
	redshift 赤方偏移 z
partcov	吸収モデル $M(E)$ に対して partcov* $M(E)$ として、部分吸収 $\alpha M(E) + (1 - \alpha)$ を与える。
	CvrFract カバリングファクタ α ($0 < \alpha < 1$)
pexmon	中性物質による蛍光鉄輝線を伴ったコンプトン反射 (Magdziarz & Zdziarski 1995)
	PhoIndex 入射冪関数の光子指数 Γ
	foldE 入射冪関数のカットオフエネルギー [keV]
	redshift 赤方偏移 z
	Incl 傾斜角 [deg]
	norm 規格化定数 [photons/keV/cm ² /s] @ 1keV
mekal	拡散したホットプラズマからの熱放射で、Mewe, Kaastra & Liedahl によって計算されたもの。
	kT プラズマ温度 [K]
	norm 規格化定数 $[10^{-14}/4\pi(D_A(1+z))^2 \int n_e n_H dV]$ D_A [cm] は放射源からの視直径距離、 n_e と n_H [cm^{-3}] は電子と水素原子の密度である。
gaussian	ガウス関数 $A(E) = K/\sigma\sqrt{2\pi} \exp[-(E - E_0)^2/2\sigma^2]$
	LineE 中心エネルギー E_0 [keV]
	Sigma 線幅 σ [keV]
	norm 規格化定数 K [photons/cm ² /s]

4.2 時間平均スペクトル

4.2.1 時間平均スペクトルの作成

同時観測のデータセット単位でスペクトルを時間平均し、これを VDPC モデル関数でフィッティングした。表 4.2 に、使用した観測装置とエネルギー帯域をまとめる。各観測装置の使用帯域については、高精度で較正処理が施されているデータ領域とした。なお、NuSTAR と各衛星の装置間における相互較正 (cross calibration) 定数は、いずれも [Madsen et al. \(2015\)](#) で示される値と矛盾しない範囲で決定した。

表 4.2: 時間平均スペクトルの使用装置および帯域 [keV] と相互較正定数

天体	XMM-Newton						NuSTAR			
	EPIC-pn (黒)		RGS1 [†] (青)		RGS2 [†] (シアン)		FPMA (赤)		FPMB (緑)	
MCG-6-30-15	0.2-10	(1.00)	0.4-2	(0.98)	0.4-2	(0.95)	3-78	(1.04)	3-78	(1.08)
NGC 4593	0.2-10	(1.00)	0.4-2	(0.97)	0.4-2	(0.97)	3-78	(1.04)	3-78	(1.07)
NGC 1365	0.2-10	(1.00)	0.4-2	(0.97)	0.4-2	(0.97)	3-78	(1.04)	3-78	(1.07)
Swift J2127.4+5654	0.5-10 [‡]	(1.00)	0.5-2	(0.97)	0.5-2	(0.97)	3-78	(1.04)	3-78	(1.07)

天体	Suzaku						NuSTAR			
	XIS 0 (黒)		XIS 1 (赤)		XIS 3 (緑)		FPMA (青)		FPMB (シアン)	
MCG-5-23-16	0.5-14	(1.00)	0.5-10	(1.00)	0.5-14	(1.03)	3-78	(1.05)	3-78	(1.09)

注) 各装置で括弧内に示した色は、図 4.1 でプロットした色を指す。括弧内の数値で示す相互較正定数は、XMM-Newton/EPIC-pn あるいは Suzaku/XIS 0 を基準としたもの。

[†] RGS データは 1 次回折光のみを使用

[‡] 銀緯 $l = 4.4^\circ$ と低いため 0.5 keV より低エネルギー側では、銀河系内における星間吸収を顕著に受けている。

4.2.2 スペクトルフィッティング

式 (4.1) で示した VDPC モデル関数の統一形から各天体で必要な成分のみを記載するとき、各天体でフィッティングに使用したモデル関数は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 \text{MCG-6-30-15} & \quad F = A[P(1 - \alpha + \alpha W_1)(1 - \alpha + \alpha W_2)W_3 + R_{I_{\text{Fe}}} + B + G] \\
 \text{NGC 4593} & \quad F = A[(P + B)(1 - \alpha + \alpha W_1)(1 - \alpha + \alpha W_2)W_3 + R_{I_{\text{Fe}}}] \\
 \text{NGC 1365} & \quad F = A[P(1 - \alpha + \alpha W_1)(1 - \alpha + \alpha W_2)W_3 + R_{I_{\text{Fe}}} + B + I_{\text{gas}} + G] \\
 \text{Swift J2127.4+5654} & \quad F = A[P(1 - \alpha + \alpha W_1)(1 - \alpha + \alpha W_2) + R_{I_{\text{Fe}}}] \\
 \text{MCG-5-23-16} & \quad F = A[P(1 - \alpha + \alpha W_1)W_3 + R_{I_{\text{Fe}}}]
 \end{aligned}$$

時間平均スペクトルに対する VDPC モデルフィッティングの結果を図 4.1、並びに、フィッティングパラメータの値を表 4.3 に示す。

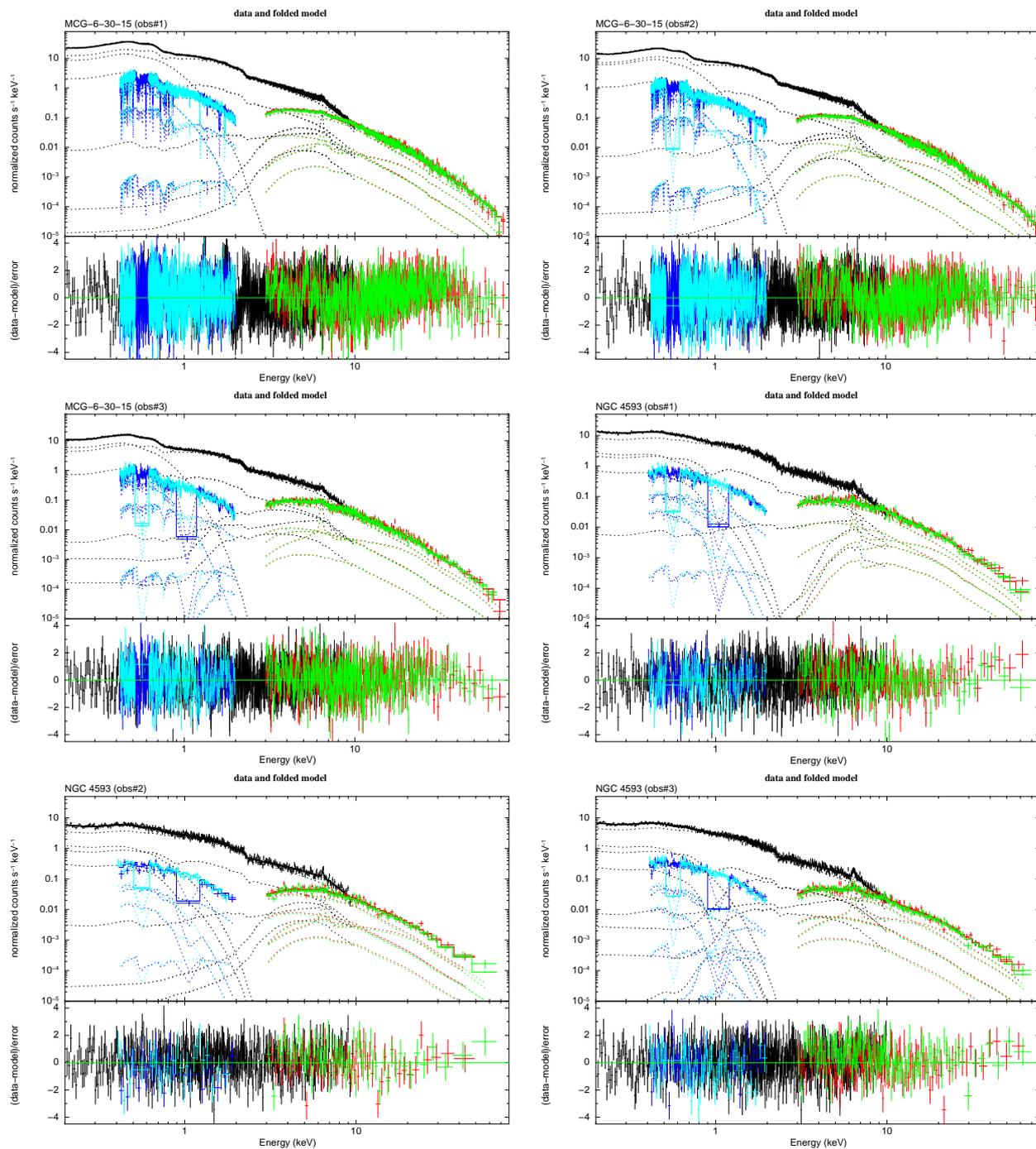
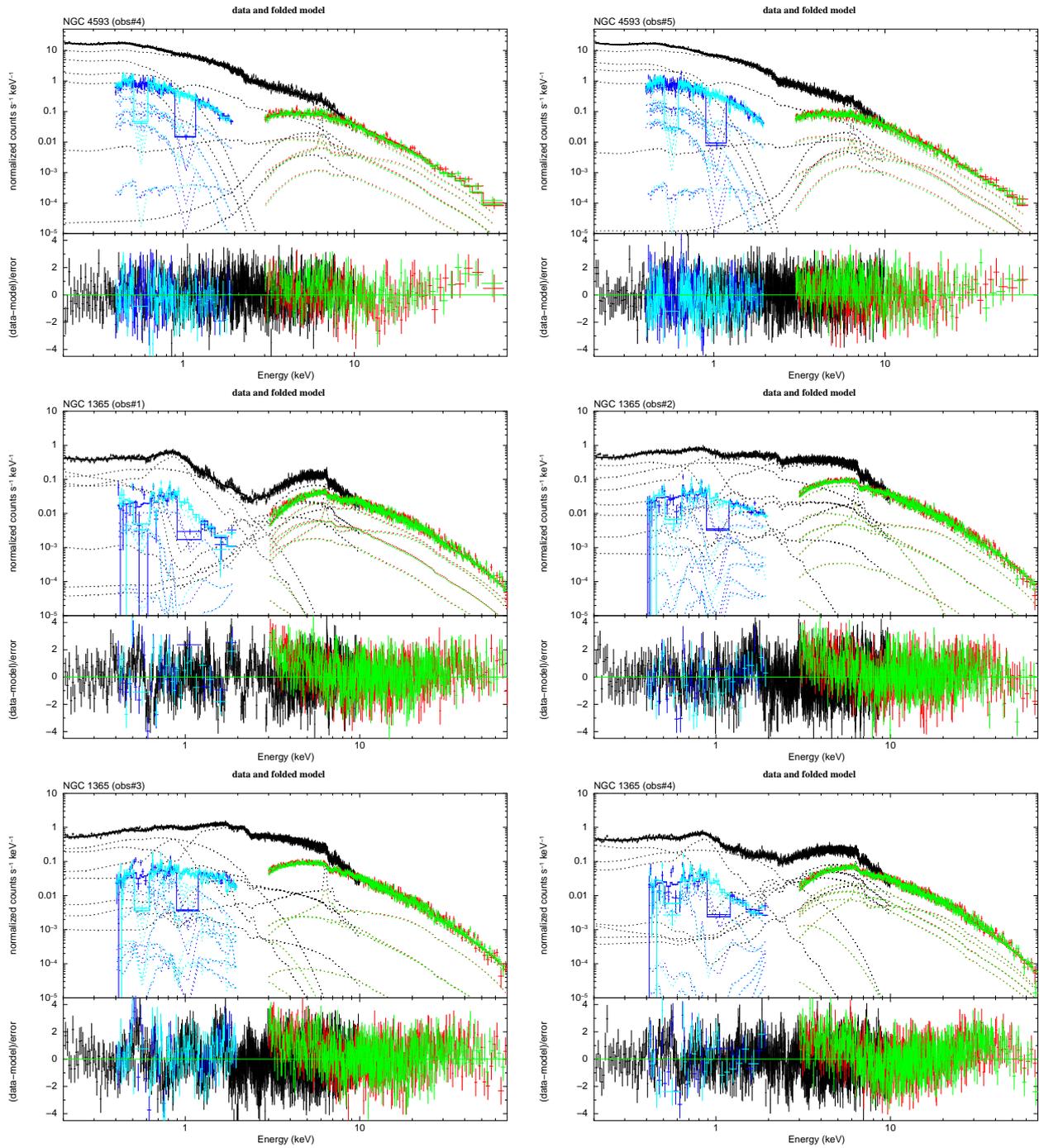


図 4.1: 時間平均スペクトルに対するモデルフィッティングの結果。各パネルで横軸にエネルギーをとり、上段はカウントレート (実線で観測値、点線でモデル値の各成分)、下段は観測とモデルの残差をプロットしている。観測装置と色の対応は、表 4.2 を参照。



☒ 4.1: *continue.*

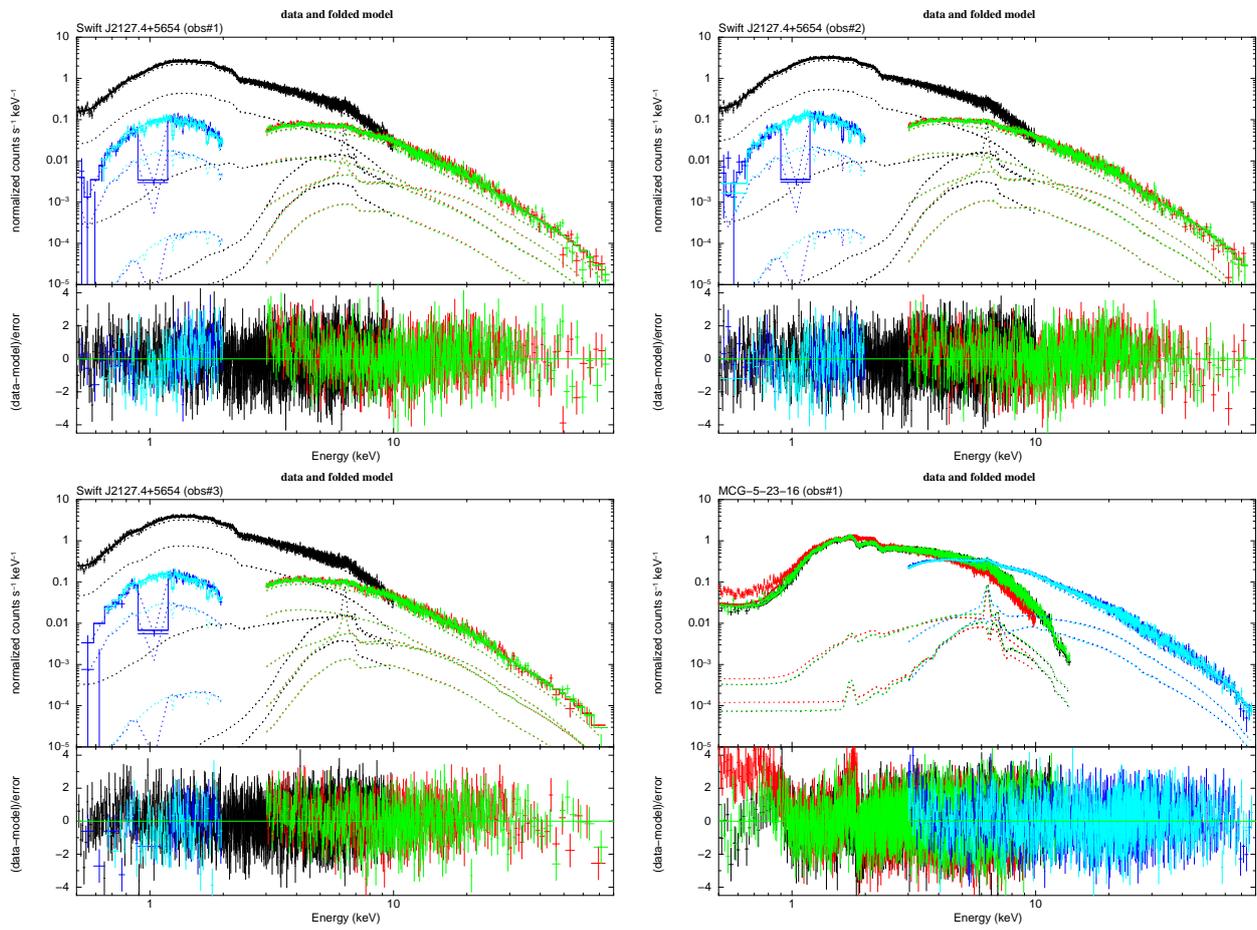
☒ 4.1: *continue.*

表 4.3: 時間平均スペクトルのフィッティングパラメータ

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
天体	A	P	B	W_1	W_2	R_{Fe}	W_3	B	I_{gas}	G	$\text{Re}\cdot\chi^2$
	$N_{\text{H,ISM}}$	Γ	T_{in}	$N_{\text{H},1}$	$N_{\text{H},2}$	norm	$N_{\text{H},3}$	T_{in}	kT	$E_{\text{line}}(\sigma_{\text{line}})$, norm	$\text{Re}\cdot\chi^2$
		E_{cut}	norm	$\log \xi_1$	$\log \xi_2$	z	$\log \xi_3$	norm	norm		(d.o.f)
		PLnorm	α								
MCG-6-30-15											
obs#1	0.081 ^{+0.001} _{-0.001}	2.17 ^{+0.01} _{-0.01}	-	17.0 ^{+1.6} _{-2.2}	2.3 ^{+0.3} _{-0.5}	11.6 ^{+1.2} _{-1.0}	0.90 ^{+0.02} _{-0.01}	0.15 ^{+0.03} _{-0.02}	-	0.48 (0.005), -1.3	1.31
		500		0.10	2.20 ^{+0.09} _{-0.04}	-0.005 ^{+0.002} _{-0.002}	1.43 ^{+0.01} _{-0.01}	4496 ⁺⁴⁶¹ ₋₃₆₇		0.54 (0.001), -0.1	(4756)
		29.5 ^{+0.6} _{-0.6}		0.15 ^{+0.01} _{-0.01}						0.71 (0.008), -0.3	
										0.86 (0.013), -0.2	
obs#2	0.072 ^{+0.002} _{-0.002}	2.05 ^{+0.01} _{-0.01}	-	14.4 ^{+1.9} _{-1.9}	2.3 ^{+2.2} _{-1.0}	6.7 ^{+0.4} _{-0.6}	0.78 ^{+0.02} _{-0.02}	0.135 ^{+0.003} _{-0.003}	-	0.40 (0.008), -0.7	1.19
		500		0.10	2.44 ^{+0.13} _{-0.09}	-0.005 ^{+0.003} _{-0.001}	1.44 ^{+0.01} _{-0.01}	4496 ⁺⁵¹⁹ ₋₈₅₇		0.71 (0.009), -0.2	(3693)
		15.3 ^{+0.4} _{-0.4}		0.13 ^{+0.02} _{-0.02}						0.85 (0.017), -0.2	
obs#3	0.072	1.96 ^{+0.04} _{-0.02}	-	6.4 ^{+3.0} _{-1.6}	4.3 ^{+0.4} _{-0.3}	5.5 ^{+0.8} _{-0.5}	0.75 ^{+0.05} _{-0.04}	0.118 ^{+0.002} _{-0.001}	-	0.44 (0.013), -0.3	1.08
		500		0.10	2.91 ^{+0.10} _{-0.35}	-0.005	1.43 ^{+0.02} _{-0.02}	7157 ⁺⁵⁰⁵ ₋₆₂₂		0.71 (0.005), -0.1	(1898)
		10.4 ^{+0.4} _{-0.5}		0.14 ^{+0.03} _{-0.03}						0.85 (0.019), -0.1	
NGC 4593											
obs#1	0.023	1.97 ^{+0.04} _{-0.09}	0.14 ^{+0.01} _{-0.01}	34.4 ^{+8.7} _{-6.2}	1.3 ^{+0.1} _{-0.5}	4.4 ^{+1.2} _{-1.2}	0.46 ^{+0.19} _{-0.16}	-	-	-	1.10
		500	1603 ⁺⁶⁶⁸ ₋₄₀₈	0.1	0.87 ^{+0.15} _{-0.22}	-0.004	2.5 ^{+0.11} _{-0.22}				(1282)
		11.0 ^{+1.3} _{-0.9}		0.32 ^{+0.05} _{-0.07}							
obs#2	0.023	1.79 ^{+0.11} _{-0.09}	0.15 ^{+0.06} _{-0.03}	15.4 ^{+11.3} _{-5.1}	2.1 ^{+7.0} _{-1.6}	2.3 ^{+1.2} _{-1.0}	0.17 ^{+0.07} _{-0.07}	-	-	-	1.06
		500	359 ⁺⁴⁰⁷ ₋₃₃₄	0.1	2.16 ^{+0.49} _{-0.19}	-0.002	1.25 ^{+0.23} _{-0.20}				(648)
		4.4 ^{+1.5} _{-0.7}		0.24 ^{+0.11} _{-0.05}							
obs#3	0.023	1.85 ^{+0.05} _{-0.04}	0.14 ^{+0.02} _{-0.03}	0.26 ^{+0.73} _{-0.13}	5.8 ^{+4.7} _{-2.5}	4.8 ^{+1.4} _{-1.0}	0.16 ^{+0.23} _{-0.14}	-	-	-	1.07
		500	586 ⁺²²⁷ ₋₂₆₁	0.1	1.20 ^{+0.23} _{-0.01}	-0.001	2.68 ^{+2.32} _{-1.38}				(1020)
		4.3 ^{+0.1} _{-0.3}		0.31 ^{+0.05} _{-0.08}							
obs#4	0.023	1.89 ^{+0.05} _{-0.03}	0.14 ^{+0.01} _{-0.01}	24.8 ^{+14.6} _{-7.3}	4.7 ^{+6.7} _{-1.6}	3.5 ^{+1.1} _{-1.4}	0.15 ^{+0.03} _{-0.03}	-	-	-	1.08
		500	2889 ⁺⁵⁶⁵ ₋₆₆₈	0.1	2.4 ^{+0.2} _{-0.2}	-0.001	0.27 ^{+0.10} _{-0.11}				(1243)
		10.4 ^{+1.5} _{-0.8}		0.19 ^{+0.05} _{-0.05}							

continue.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
天体	A	P	B	W_1	W_2	R_{Fe}	W_3	B	I_{gas}	G	
	$N_{\text{H,ISM}}$	Γ	T_{in}	$N_{\text{H},1}$	$N_{\text{H},2}$	norm	$N_{\text{H},3}$	T_{in}	kT	$E_{\text{line}} (\sigma_{\text{line}})$, norm	$\text{Re-}\chi^2$
		E_{cut}	norm	$\log \xi_1$	$\log \xi_2$	z	$\log \xi_3$	norm	norm		(d.o.f)
		PI norm	α								
obs#5	0.023	$1.90^{+0.03}_{-0.04}$	$0.13^{+0.01}_{-0.01}$	$26.6^{+11.4}_{-6.2}$	$4.3^{+2.7}_{-1.4}$	$2.9^{+0.9}_{-0.7}$	$0.12^{+0.02}_{-0.03}$	—	—	—	1.09
		500	2004^{+715}_{-437}	0.1	$2.4^{+0.1}_{-0.1}$	—0.005	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	—	—	—	(1734)
		$10.0^{+0.8}_{-0.6}$	$0.20^{+0.04}_{-0.03}$								
NGC 1365											
obs#1	$0.037^{+0.007}_{-0.007}$	$1.81^{+0.02}_{-0.02}$	—	$15.6^{+2.1}_{-2.5}$	$13.7^{+9.9}_{-5.0}$	$3.4^{+0.4}_{-0.4}$	$26.4^{+2.8}_{-5.1}$	$0.44^{+0.03}_{-0.03}$	$0.64^{+0.01}_{-0.01}$	$6.78 (0.156)$, —0.02	1.28
		500	—	0.10	$2.13^{+0.08}_{-0.13}$	—	$2.24^{+0.03}_{-0.03}$	$0.66^{+0.23}_{-0.18}$	$0.19^{+0.01}_{-0.01}$	—	(1839)
		$6.0^{+0.4}_{-0.3}$	$0.82^{+0.06}_{-0.05}$								
obs#2	$0.057^{+0.007}_{-0.006}$	$1.88^{+0.02}_{-0.02}$	—	$1.70^{+0.21}_{-0.20}$	150^{+0}_{-14}	$5.3^{+0.7}_{-0.6}$	$21.4^{+0.7}_{-0.7}$	$2.21^{+0.21}_{-0.20}$	0.64	$6.78 (0.156)$, —0.02	1.34
		500	—	0.10	$3.43^{+0.03}_{-0.02}$	—	$2.28^{+0.02}_{-0.02}$	$0.008^{+0.002}_{-0.002}$	0.19	—	(2522)
		$10.9^{+0.4}_{-0.5}$	$0.94^{+0.01}_{-0.01}$								
obs#3	$0.054^{+0.006}_{-0.006}$	$1.83^{+0.02}_{-0.02}$	—	$1.3^{+0.9}_{-0.8}$	150^{+0}_{-6}	$2.9^{+0.5}_{-0.5}$	$7.1^{+0.5}_{-0.4}$	$0.39^{+0.05}_{-0.05}$	0.64	$6.78 (0.156)$, —0.02	1.34
		500	—	0.10	$3.41^{+0.02}_{-0.02}$	—	$2.22^{+0.03}_{-0.03}$	$2.45^{+1.69}_{-0.92}$	0.19	—	(2558)
		$9.43^{+0.34}_{-0.33}$	$0.97^{+0.01}_{-0.01}$								
obs#4	$0.054^{+0.004}_{-0.006}$	$1.89^{+0.02}_{-0.02}$	—	$7.9^{+1.1}_{-1.9}$	150^{+0}_{-9}	$4.4^{+0.6}_{-0.6}$	$26.9^{+2.7}_{-2.2}$	$0.86^{+0.11}_{-0.08}$	0.64	$6.78 (0.156)$, —0.02	1.11
		500	—	0.10	$3.45^{+0.03}_{-0.02}$	—	$2.20^{+0.01}_{-0.01}$	$0.14^{+0.03}_{-0.03}$	0.19	—	(2394)
		$10.3^{+0.6}_{-0.4}$	$0.77^{+0.05}_{-0.04}$								
Swift J2127.4+5654											
obs#1	0.98	$1.96^{+0.02}_{-0.02}$	—	$22.4^{+13.4}_{-3.9}$	$0.13^{+0.90}_{-0.13}$	$3.6^{+0.5}_{-0.5}$	—	—	—	—	1.06
		336^{+164}_{-123}	—	0.1	$2.6^{+2.4}_{-2.6}$	—	—	—	—	—	(2545)
		$10.5^{+0.6}_{-0.5}$	$0.16^{+0.03}_{-0.03}$								
obs#2	0.98	$1.96^{+0.02}_{-0.02}$	—	$34.5^{+9.6}_{-5.3}$	$0.32^{+1.21}_{-0.32}$	$4.0^{+0.5}_{-0.6}$	—	—	—	—	1.06
		180^{+54}_{-53}	—	0.1	$2.6^{+2.4}_{-2.6}$	—	—	—	—	—	(2730)
		$13^{+0.8}_{-0.5}$	$0.16^{+0.04}_{-0.03}$								
obs#3	0.96	$1.96^{+0.03}_{-0.02}$	—	$57.8^{+13.0}_{-18.2}$	$0.67^{+1.12}_{-0.62}$	$3.8^{+0.8}_{-0.7}$	—	—	—	—	1.02
		96^{+50}_{-21}	—	0.1	$2.6^{+0.3}_{-0.3}$	—	—	—	—	—	(2308)
		$16.5^{+1.2}_{-1.1}$	$0.22^{+0.05}_{-0.05}$								

continue.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
天体	A	P	B	W_1	W_2	$R_{I_{\text{Fe}}}$	W_3	B	I_{gas}	G	$\text{Re-}\chi^2$
	$N_{\text{H,ISM}}$	Γ	T_{in}	$N_{\text{H},1}$	$N_{\text{H},2}$	norm	$N_{\text{H},3}$	T_{in}	kT	$E_{\text{line}} (\sigma_{\text{line}}), \text{norm}$	$\text{Re-}\chi^2$
		E_{cut}	norm	$\log \xi_1$	$\log \xi_2$	z	$\log \xi_3$	norm	norm		(d.o.f)
		PLnorm		α							
MCG-5-23-16											
obs#1	1.8	$1.89^{+0.01}_{-0.01}$	-	150^{+0}_{-8}	-	$15.2^{+0.8}_{-0.7}$	$0.73^{+0.01}_{-0.01}$	-	-	-	1.18
		145^{+14}_{-11}		$2.67^{+0.03}_{-0.07}$			$1.67^{+0.04}_{-0.03}$				(8043)
		$39.5^{+1.9}_{-1.7}$		$0.11^{+0.03}_{-0.02}$							

誤差範囲はすべて 90% 信頼区間で、誤差値の記載がないパラメータは固定値である。各列は、次の値を示している；

- (1) 天体および観測データセット番号、
- (2) 星間吸収 A (phabs) の水素柱密度 N_{H} [10^{22} cm^{-2}]、
- (3) 冪型関数 P (cutoffpl) の光子指数 Γ 、カットオフエネルギー E_{cut} [keV]、規格化定数 PLnorm [10^{-3} photons/keV/cm 2 /s @ 1 keV]、
- (4) 部分吸収体の吸収を受ける円盤放射 B (diskbb) の円盤内縁温度 T_{in} [keV]、規格化定数、
- (5)、(6) 部分吸収を引き起こす電離吸収体 W (mtable) の柱密度 N_{H} [10^{22} cm^{-2}]、電離パラメータの対数値 $\log \xi$ 、カバリングファクタ α
- (7) 反射成分 $R_{I_{\text{Fe}}}$ (pexmon) の規格化定数 [10^{-3} photons/keV/cm 2 /s @ 1 keV]、鉄輝線の赤方偏移 z 、すべて傾斜角は 30° に固定、
- (8) 全体吸収を引き起こす電離吸収体 W_3 (mtable) の柱密度 N_{H} [10^{22} cm^{-2}]、電離パラメータの対数値 $\log \xi$ 、
- (9) 吸収を受けていない円盤放射 B (diskbb) の円盤内縁温度 T_{in} [keV]、規格化定数、
- (10) 母銀河からのプラズマ熱放射 I_{gas} (mekal) のプラズマ温度 kT [K]、規格化定数、
- (11) 補足的な吸収線 G (gaussian) のエネルギー E_{line} [keV]、線幅 σ_{line} [keV]、規格化定数 [10^{-3} photons/cm 2 /s]、
- (12) フィットイングの換算カイ二乗、自由度。

4.3 時間スライススペクトル

4.3.1 時間スライススペクトルの作成

スペクトルの時間変動を調べるために、各データセットを時系列に分割したスペクトルを作成した。このとき、変化の時間スケールとその時間内に十分な統計量としての光子数を得ることの兼ね合いから、10 キロ秒毎に区切った GTI を作り、データセットを分割した。ただし NGC 4593 については、10 キロ秒で分割すると NuSTAR データで含まれる光子数が少なく、統計量が足りなかった。そのため、観測が約 1 日おきに実施され時期が近接している 5 観測の各データセットの時間平均スペクトル自体を時間スライススペクトルとみなした。前章 (3.2) の図 3.1 で示したライトカーブにおいて、10 キロ秒毎に区切ったスライスデータを青い破線によって示す。

表 4.4: 時間スライススペクトルの分割数

天体	データ番号			
	#1	#2	#3	#4
MCG-6-30-15	13	13	5	–
NGC 4593	5	–	–	–
NGC 1365	12	12	10	12
Swift J2127.4+5654	13	13	7	–
MCG-5-23-16	10	10	10	8

4.3.2 時間スライススペクトルの同時フィッティング

作成した時間スライススペクトルは、データセット毎にまとめて XSPEC 上にプロットし、一つのモデル関数を用いて同時フィッティングを行った。この時、低エネルギー側は XMM-Newton/EPIC-pn または Suzaku/XIS0+3、高エネルギー側は NuSTAR/FPMA のデータを使用した。

VDPC モデル関数における部分吸収体のカバリングファクタ $[\alpha]$ を自由パラメータとし、連続成分である冪関数の規格化定数 $[PLnorm]$ を NuSTAR/FPMA の 25–78 keV ライトカーブから相対的に決定し、その他のパラメータは全て時間スライススペクトルで共通にして行った。その結果、これら二つのパラメータ変動のみで、スペクトルの時間変化を説明することができた。フィッティング結果を図 4.2 で示す。そして、変動フィッティングパラメータの値を表 4.5 にまとめ、共通フィッティングパラメータの値を表 4.6 にまとめる。

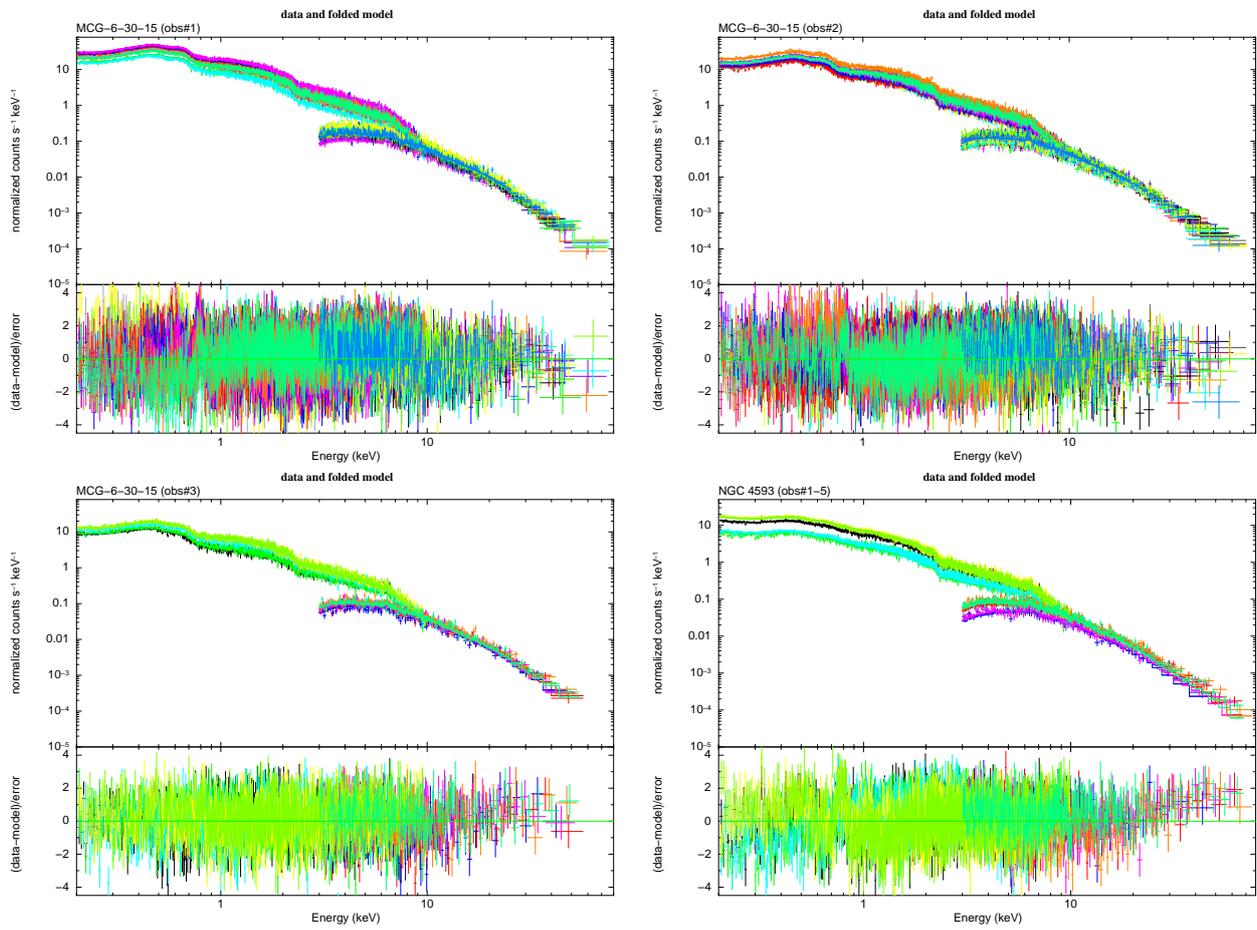
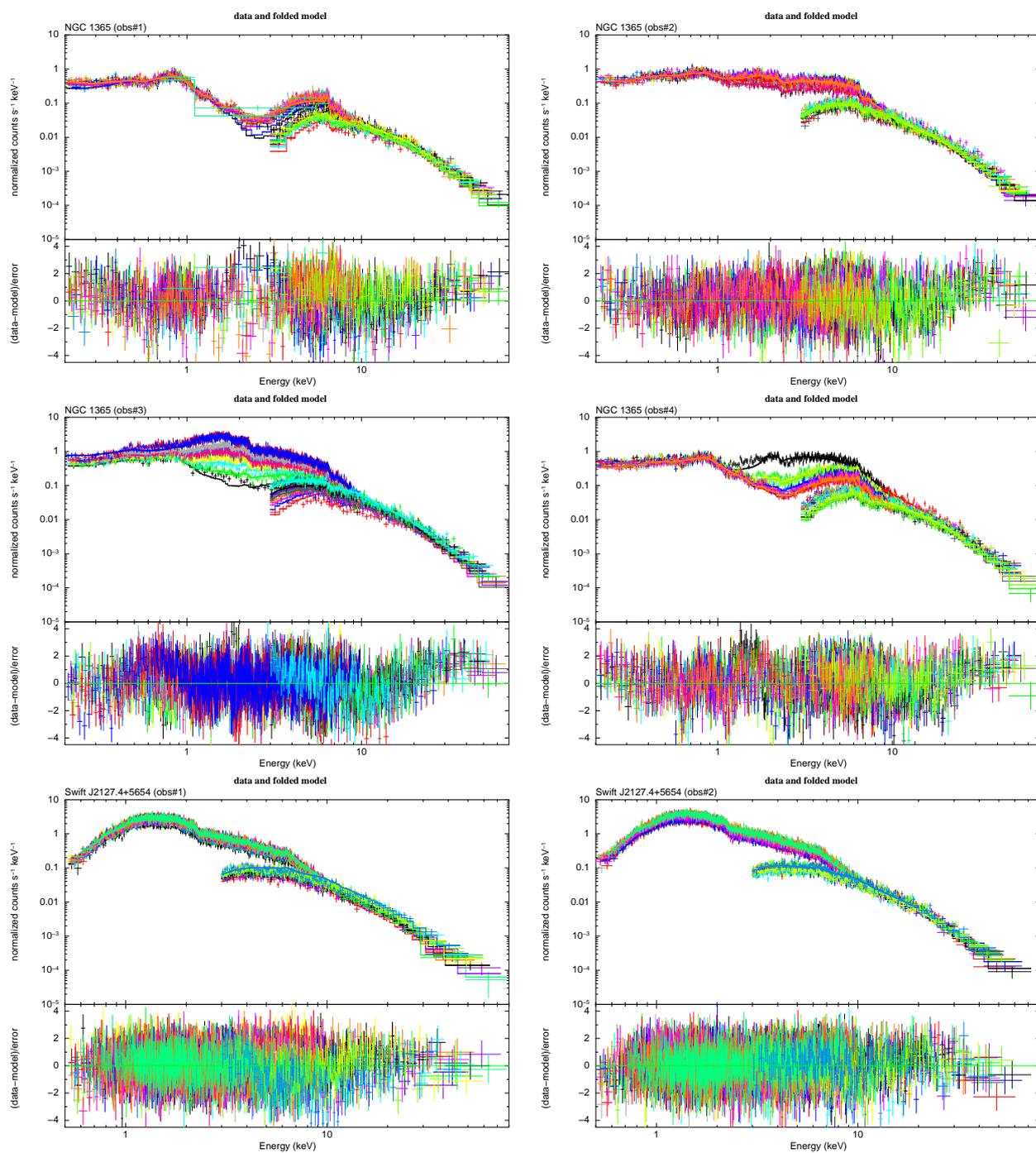


図 4.2: 時間平均スペクトルに対するモデルフィッティングの結果。各パネルで横軸にエネルギーをとり、上段はカウントレート、下段は観測とモデルの残差をプロットしている。時間と観測装置の異なるスペクトルデータごとに色分けされている。

☒ 4.2: *continue.*

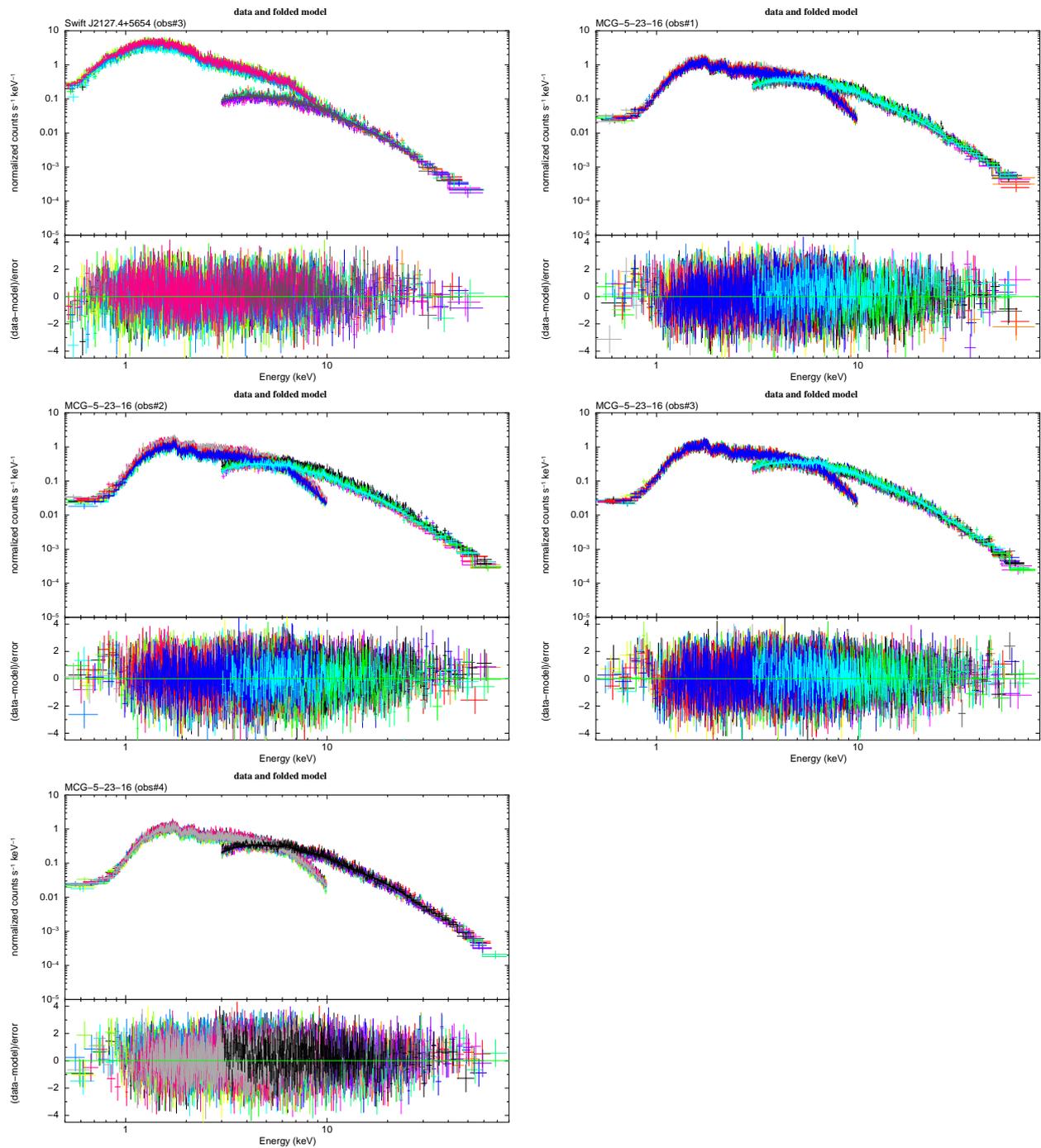
☒ 4.2: *continue.*

表 4.5: 時間スライススペクトルの変動フィッティングパラメータ

天体	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	α												
	PLnorm [10^{-3}], ratio [†]												
MCG-6-30-15													
obs#1	0.10 ^{+0.01} _{-0.01} 28.0 ^{+0.2} _{-0.2}	0.41 ^{+0.01} _{-0.01} 0.982	0.40 ^{+0.01} _{-0.01} 0.875	0.07 ^{+0.01} _{-0.01} 0.969	0.00 ^{+0.00} _{-0.00} 0.953	0.14 ^{+0.01} _{-0.01} 1.042	0.06 ^{+0.01} _{-0.01} 0.908	0.13 ^{+0.01} _{-0.01} 1.081	0.10 ^{+0.01} _{-0.01} 1.277	0.11 ^{+0.01} _{-0.01} 1.441	0.07 ^{+0.01} _{-0.01} 1.468	0.20 ^{+0.01} _{-0.01} 1.085	0.26 ^{+0.01} _{-0.01} 1.171
obs#2	0.40 ^{+0.02} _{-0.03} 24.5 ^{+1.1} _{-1.1}	0.44 ^{+0.02} _{-0.02} 0.991	0.44 ^{+0.02} _{-0.02} 0.749	0.35 ^{+0.03} _{-0.03} 0.673	0.18 ^{+0.03} _{-0.03} 0.792	0.22 ^{+0.03} _{-0.03} 0.909	0.29 ^{+0.03} _{-0.03} 0.965	0.50 ^{+0.02} _{-0.02} 1.018	0.55 ^{+0.02} _{-0.02} 0.947	0.29 ^{+0.03} _{-0.03} 0.702	0.28 ^{+0.03} _{-0.03} 0.833	0.09 ^{+0.04} _{-0.04} 1.059	0.27 ^{+0.03} _{-0.03} 0.880
obs#3	0.52 ^{+0.02} _{-0.02} 13.9 ^{+0.7} _{-0.7}	0.41 ^{+0.02} _{-0.02} 0.872	0.19 ^{+0.03} _{-0.04} 0.935	0.15 ^{+0.04} _{-0.04} 1.095	0.06 ^{+0.04} _{-0.04} 0.988								
NGC 4593													
	0.38 ^{+0.02} _{-0.02} 12.0 ^{+0.5} _{-0.8}	0.56 ^{+0.01} _{-0.01} 0.682	0.58 ^{+0.01} _{-0.01} 0.788	0.37 ^{+0.02} _{-0.02} 1.257	0.21 ^{+0.03} _{-0.03} 0.977								
NGC 1365													
obs#1	1.00 ^{+0.00} 7.7 ^{+0.9} _{-0.5}	0.89 ^{+0.01} _{-0.01} 1.375	0.87 ^{+0.01} _{-0.01} 1.406	0.87 ^{+0.01} _{-0.01} 1.263	0.87 ^{+0.01} _{-0.01} 1.202	0.86 ^{+0.01} _{-0.01} 1.346	0.85 ^{+0.01} _{-0.01} 1.512	0.85 ^{+0.01} _{-0.01} 1.467	0.87 ^{+0.01} _{-0.01} 1.173	1.00 ^{+0.00} _{-0.01} 1.399	0.87 ^{+0.01} _{-0.01} 1.406	0.79 ^{+0.01} _{-0.01} 1.041	
obs#2	0.70 ^{+0.02} _{-0.02} 15.0 ^{+0.8} _{-0.8}	0.50 ^{+0.02} _{-0.03} 0.992	0.57 ^{+0.02} _{-0.02} 1.339	0.61 ^{+0.02} _{-0.02} 1.269	0.63 ^{+0.02} _{-0.02} 1.220	0.65 ^{+0.02} _{-0.02} 1.309	0.72 ^{+0.02} _{-0.02} 1.020	0.57 ^{+0.02} _{-0.02} 1.104	0.61 ^{+0.02} _{-0.02} 1.203	0.51 ^{+0.02} _{-0.02} 1.286	0.45 ^{+0.03} _{-0.03} 1.072	0.57 ^{+0.02} _{-0.02} 1.249	
obs#3	1.00 ^{+0.00} 17.5 ^{+1.3} _{-1.1}	0.92 ^{+0.01} _{-0.01} 1.154	0.80 ^{+0.01} _{-0.01} 1.049	0.74 ^{+0.01} _{-0.01} 1.154	0.67 ^{+0.01} _{-0.01} 1.247	0.61 ^{+0.01} _{-0.01} 1.233	0.62 ^{+0.02} _{-0.02} 1.057	0.53 ^{+0.02} _{-0.02} 1.244	0.36 ^{+0.02} _{-0.02} 1.429	0.41 ^{+0.02} _{-0.02} 1.526			
obs#4	0.06 ^{+0.04} 25.0 ^{+2.1} _{-1.9}	0.57 ^{+0.02} _{-0.02} 0.924	0.57 ^{+0.02} _{-0.01} 0.766	0.58 ^{+0.02} _{-0.02} 0.899	0.61 ^{+0.02} _{-0.02} 0.895	0.70 ^{+0.02} _{-0.02} 0.748	0.77 ^{+0.02} _{-0.02} 0.713	0.82 ^{+0.02} _{-0.02} 0.886	0.81 ^{+0.02} _{-0.02} 0.719	0.72 ^{+0.02} _{-0.02} 0.828	0.74 ^{+0.02} _{-0.02} 0.773	0.77 ^{+0.02} _{-0.02} 0.713	
Swift J2127.4+5654													
obs#1	0.22 ^{+0.01} 8.3 ^{+0.0} _{-0.2}	0.27 ^{+0.01} 1.267	0.28 ^{+0.01} 1.429	0.00 ^{+0.00} 1.106	0.28 ^{+0.01} 1.587	0.32 ^{+0.01} 1.352	0.20 ^{+0.01} 1.415	0.23 ^{+0.01} 1.334	0.05 ^{+0.01} 1.255	0.30 ^{+0.01} 1.623	0.27 ^{+0.01} 1.507	0.33 ^{+0.01} 1.711	0.41 ^{+0.01} 2.010
obs#2	0.01 ^{+0.04} 10.2 ^{+0.4} _{-0.2}	0.16 ^{+0.03} 1.282	0.09 ^{+0.03} 1.200	0.04 ^{+0.04} 1.110	0.04 ^{+0.04} 1.228	0.18 ^{+0.03} 1.122	0.10 ^{+0.03} 1.299	0.17 ^{+0.03} 1.124	0.28 ^{+0.03} 1.152	0.34 ^{+0.03} 1.240	0.17 ^{+0.03} 1.154	0.06 ^{+0.03} 1.312	0.07 ^{+0.03} 1.312
obs#3	0.25 ^{+0.01} 16.9 ^{+0.1} _{-0.7}	0.33 ^{+0.01} 0.998	0.34 ^{+0.02} 0.968	0.08 ^{+0.03} 0.895	0.15 ^{+0.01} 1.069	0.21 ^{+0.01} 0.954	0.00 ^{+0.04} 0.865						

continue.

天体	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	α												
	PLnorm, ratio [†]												
MCG-5-23-16													
obs#1	0.21 ^{+0.01} _{-0.01}	0.23 ^{+0.01} _{-0.01}	0.00 ^{+0.00} _{-0.00}	0.26 ^{+0.01} _{-0.01}	0.18 ^{+0.01} _{-0.01}	0.24 ^{+0.01} _{-0.01}	0.25 ^{+0.01} _{-0.01}	0.17 ^{+0.01} _{-0.01}	0.22 ^{+0.01} _{-0.01}	0.17 ^{+0.01} _{-0.01}	0.22 ^{+0.01} _{-0.01}	0.17 ^{+0.01} _{-0.01}	0.17 ^{+0.01} _{-0.01}
	44.7 ^{+0.1} _{-0.1}	1.071	0.826	1.185	0.994	1.087	0.994	1.201	1.187	0.985			
obs#2	0.29 ^{+0.01} _{-0.01}	0.24 ^{+0.01} _{-0.01}	0.09 ^{+0.01} _{-0.01}	0.07 ^{+0.01} _{-0.01}	0.29 ^{+0.01} _{-0.01}	0.11 ^{+0.01} _{-0.01}	0.00 ^{+0.00} _{-0.00}	0.07 ^{+0.01} _{-0.01}	0.19 ^{+0.01} _{-0.01}	0.22 ^{+0.01} _{-0.01}	0.19 ^{+0.01} _{-0.01}	0.22 ^{+0.01} _{-0.01}	0.22 ^{+0.01} _{-0.01}
	44.6 ^{+0.3} _{-0.1}	0.933	0.710	0.845	1.173	0.901	0.999	1.072	0.967	0.908			
obs#3	0.14 ^{+0.02} _{-0.02}	0.04 ^{+0.03} _{-0.03}	0.20 ^{+0.02} _{-0.02}	0.19 ^{+0.02} _{-0.02}	0.16 ^{+0.02} _{-0.02}	0.09 ^{+0.02} _{-0.03}	0.17 ^{+0.02} _{-0.02}	0.13 ^{+0.02} _{-0.03}	0.11 ^{+0.02} _{-0.03}	0.20 ^{+0.02} _{-0.02}	0.11 ^{+0.02} _{-0.03}	0.20 ^{+0.02} _{-0.02}	0.20 ^{+0.02} _{-0.02}
	36.8 ^{+1.0} _{-1.0}	1.071	1.080	1.114	1.121	1.065	1.072	1.124	1.144	1.198			
obs#4	0.29 ^{+0.01} _{-0.01}	0.27 ^{+0.01} _{-0.01}	0.28 ^{+0.01} _{-0.01}	0.13 ^{+0.01} _{-0.01}	0.25 ^{+0.01} _{-0.01}	0.00 ^{+0.00} _{-0.00}	0.09 ^{+0.01} _{-0.01}	0.20 ^{+0.01} _{-0.01}	0.11 ^{+0.02} _{-0.03}	0.20 ^{+0.02} _{-0.02}	0.11 ^{+0.02} _{-0.03}	0.20 ^{+0.02} _{-0.02}	0.20 ^{+0.02} _{-0.02}
	48.7 ^{+0.2} _{-0.2}	0.850	0.865	0.735	0.862	0.719	0.860	0.873	0.860	0.860	0.860	0.860	0.860

† 列 1 での各 2 行目の記載は PLnorm 値 [10⁻³ photons/keV/cm²/s @ 1 keV] であり、以降の列ではその値に対する比を示す。比の値は、NuSTAR/FPMA の 25-78 keV における 10 キロ秒 bin でのライトカーブから算出したもの。

表 4.6: 時間スライススペクトルの共通フィッティングパラメータ

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
天体	$N_{\text{H,ISM}}$	P	B	W_1	W_2	R_{Fe}	W_3	B	I_{gas}	G	$\text{Re-}\chi^2$
	$N_{\text{H,1}}$	Γ	T_{in}	$N_{\text{H,1}}$	$N_{\text{H,2}}$	norm	$N_{\text{H,3}}$	T_{in}	kT	$E_{\text{line}} (\sigma_{\text{line}}), \text{norm}$	$\text{Re-}\chi^2$
	$\log \xi_1$	E_{cut}	norm	$\log \xi_1$	$\log \xi_2$	z	$\log \xi_3$	norm	norm		(d.o.f)
MCG-6-30-15											
obs#1	0.080	$2.16^{+0.01}_{-0.01}$	–	74.8	0.43	$14.1^{+1.0}_{-1.0}$	$1.09^{+0.02}_{-0.02}$	$0.14^{+0.0}_{-0.0}$	–	$0.48 (0.005), -1.3$	1.32
		500		0.10	1.13	–0.005	$1.58^{+0.01}_{-0.01}$	4096^{+278}_{-263}		$0.54 (0.001), -0.1$	(12305)
										$0.71 (0.008), -0.3$	
										$0.86 (0.013), -0.2$	
obs#2	0.072	$2.08^{+0.01}_{-0.01}$	–	41.2	150	$5.8^{+1.1}_{-1.1}$	$1.0^{+0.03}_{-0.03}$	$0.135^{+0.002}_{-0.002}$	–	$0.40 (0.008), -0.7$	1.21
		500		0.10	3.90	–0.005	$1.55^{+0.02}_{-0.02}$	3290^{+295}_{-277}		$0.71 (0.009), -0.2$	(10004)
										$0.85 (0.017), -0.2$	
obs#3	0.072	$2.05^{+0.02}_{-0.02}$	–	6.4	4.3	$8.6^{+1.2}_{-1.1}$	$0.78^{+0.05}_{-0.05}$	$0.114^{+0.003}_{-0.003}$	–	$0.44 (0.013), -0.3$	1.09
		500		0.10	2.91	–0.005	$1.47^{+0.04}_{-0.04}$	7082^{+885}_{-779}		$0.71 (0.005), -0.1$	(3572)
										$0.85 (0.019), -0.1$	
NGC 4593											
obs#1-5	0.023	$2.05^{+0.01}_{-0.02}$	$0.124^{+0.06}_{-0.12}$	$20.2^{+1.2}_{-1.2}$	$1.6^{+0.6}_{-0.4}$	$6.8^{+0.8}_{-0.8}$	$0.31^{+0.03}_{-0.03}$	–	–	–	1.29
		500	202^{+369}_{-202}	0.1	$2.64^{+0.08}_{-0.10}$		$1.52^{+0.03}_{-0.04}$				(4297)
NGC 1365											
obs#1	0.037	$1.95^{+0.03}_{-0.03}$	–	$16.8^{+1.6}_{-1.1}$	$52.8^{+4.9}_{-2.8}$	$3.34^{+0.03}_{-0.04}$	11.2	$0.33^{+0.01}_{-0.01}$	$0.65^{+0.01}_{-0.01}$	$6.83 (0.14), -0.02$	1.55
		500		0.10	$2.42^{+0.01}_{-0.02}$		1.75	$3.0^{+0.2}_{-0.3}$	$0.14^{+0.01}_{-0.01}$		(2300)
obs#2	0.037	$2.01^{+0.02}_{-0.02}$	–	$11.1^{+1.1}_{-1.0}$	150^{+0}_{-3}	$4.8^{+0.7}_{-0.7}$	$3.5^{+0.2}_{-0.2}$	$0.37^{+0.02}_{-0.02}$	$0.62^{+0.03}_{-0.03}$	$6.78 (0.156), -0.02$	1.25
		500		0.10	$3.07^{+0.02}_{-0.02}$		$0.12^{+0.10}_{-0.12}$	$3.5^{+0.6}_{-0.6}$	$0.09^{+0.01}_{-0.01}$		(4649)
obs#3	0.037	$2.10^{+0.03}_{-0.02}$	–	$3.6^{+0.2}_{-0.2}$	126^{+6}_{-5}	$3.7^{+0.7}_{-0.6}$	$1.9^{+0.4}_{-0.4}$	$0.30^{+0.02}_{-0.02}$	$0.56^{+0.02}_{-0.03}$	$6.78 (0.156), -0.02$	1.38
		500		0.10	$2.87^{+0.02}_{-0.02}$		$0.66^{+0.01}_{-0.01}$	$5.3^{+0.9}_{-1.3}$	$0.16^{+0.01}_{-0.01}$		(4917)
obs#4	0.037	$2.10^{+0.03}_{-0.03}$	–	$12.4^{+1.1}_{-1.3}$	122^{+7}_{-8}	$7.2^{+1.1}_{-1.0}$	$12.7^{+0.2}_{-0.3}$	$0.36^{+0.01}_{-0.01}$	$0.65^{+0.02}_{-0.02}$	$6.78 (0.156), -0.02$	1.37
		500		0.10	$2.78^{+0.02}_{-0.02}$		$1.50^{+0.03}_{-0.03}$	$2.8^{+0.2}_{-0.2}$	$0.11^{+0.01}_{-0.01}$		(3370)

continue.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
天体	A	P	B	W_1	W_2	R_{Fe}	W_3	B	I_{gas}	G	$\text{Re-}\chi^2$
	$N_{\text{H,ISM}}$	Γ	T_{in}	$N_{\text{H},1}$	$N_{\text{H},2}$	norm	$N_{\text{H},3}$	T_{in}	kT	$E_{\text{line}} (\sigma_{\text{line}}), \text{norm}$	$\text{Re-}\chi^2$
		E_{cut}	norm	$\log \xi_1$	$\log \xi_2$	z	$\log \xi_3$	norm	norm		(d.o.f)
Swift J2127.4+5654											
obs#1	0.98	$1.99^{+0.00}_{-0.00}$ 195^{+41}_{-29}	–	22.4	0.13	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	–	–	–	–	1.06 (7103)
obs#2	0.98	$1.93^{+0.01}_{-0.01}$ 148^{+46}_{-29}	–	34.5	0.32	$1.9^{+0.5}_{-0.5}$	–	–	–	–	1.06 (8337)
obs#3	0.96	$1.95^{+0.01}_{-0.01}$ 97^{+21}_{-18}	–	57.8	0.67	$3.8^{+0.8}_{-0.7}$	–	–	–	–	1.02 (4892)
MCG-5-23-16											
obs#1	1.8	1.89 145	–	150	–	$10.9^{+0.6}_{-0.6}$	0.73	–	–	–	1.02 (9937)
obs#2	1.8	1.89 145	–	150	–	$12.2^{+0.5}_{-0.8}$	0.73	–	–	–	1.04 (9577)
obs#3	1.8	1.89 145	–	150	–	$14.3^{+1.1}_{-1.1}$	0.73	–	–	–	0.99 (10264)
obs#4	1.8	1.89 145	–	150	–	$15.0^{+0.7}_{-0.7}$	0.73	–	–	–	1.01 (7884)

誤差範囲はすべて90%信頼区間で、誤差値の記載がないパラメータは固定値である。各列の意味ならびに単位は、表4.3に同じ。

4.4 強度スライススペクトル

4.4.1 強度スライススペクトルの作成

時間変動するスペクトルにおいて、スペクトルの強度依存性を調べるために、各データセットを強度別に分割したスペクトルを作成した。このとき、統計量としての光子数が各強度で均等になるように分割した。そして、次の二種類の強度スライススペクトルを作成した。

1. 強度スライス・低エネルギー版：

低エネルギー側の帯域データ (XMM-Newton/EPIC-pn または Suzaku/XIS0+3 の 10 keV 以下) を強度別に分割したときの GTI を全帯域データに適用したスペクトル。

2. 強度スライス・高エネルギー版：

高エネルギー側の帯域データ (NuSTAR/FPMA の 25–78 keV) を強度別に分割したときの GTI を全帯域データに適用したスペクトル。

低エネルギー側では強度の振れ幅が大きく光子数が十分多いため、低エネルギー版は強度によって 4 分割した^{*1}。一方で、高エネルギー側では強度の振れ幅が比較的小さいため、高エネルギー版では強度によって 2 分割した。NCG 4593 については、5 つある同時観測データセットの観測時間が短く、観測日が近接しているため、5 つを合算した 1 つのデータから強度スライススペクトルを作成した。

4.4.2 強度スライススペクトルの同時フィッティング

作成した強度スライススペクトルは、データセット毎にまとめて XSPEC 上にプロットし、一つのモデル関数を用いて同時フィッティングを行った。低エネルギー側は XMM-Newton/EPIC-pn または Suzaku/XIS0+3、高エネルギー側は NuSTAR/FPMA のデータを使用した。

その結果、スライススペクトルの各強度は、一つのパラメータを変化させるだけで説明することが可能であった。すなわち、低エネルギー版では部分吸収体のカバリングファクタ $[\alpha]$ のみ、高エネルギー版では連続成分である冪関数の規格化定数 $[PLnorm]$ のみを自由パラメータとし、その他のパラメータは強度の異なるスペクトルで全て共通にして、それぞれフィッティングすることができた。低エネルギー版および高エネルギー版のフィッティング結果を、それぞれ図 4.3 と図 4.4 で示す。この時の変動フィッティングパラメータを表 4.7 にまとめ、共通フィッティングパラメータを、低エネルギー版と高エネルギー版それぞれについて表 4.8 と表 4.9 で示す。

表 4.7 から、低エネルギー版に対しては、共通の $PLnorm$ 値を用いた状態で、暗いスペクトルである

^{*1} MCG-5–23–16 は強度変動の振れ幅が小さかったため、2 分割とした。

ほど α 値が大きくなっていることがわかる。つまり、 α 変動によって強度変化の明暗を説明できている。一方で高エネルギー版に対しては、共通の α 値を用いた状態で、暗いスペクトルほど PL_{norm} が小さくなっており、 PL_{norm} 変動によって強度変化を説明できている。さらに、これらの結果は、低エネルギー側の変動と高エネルギー側の変動が独立であることを示唆している。

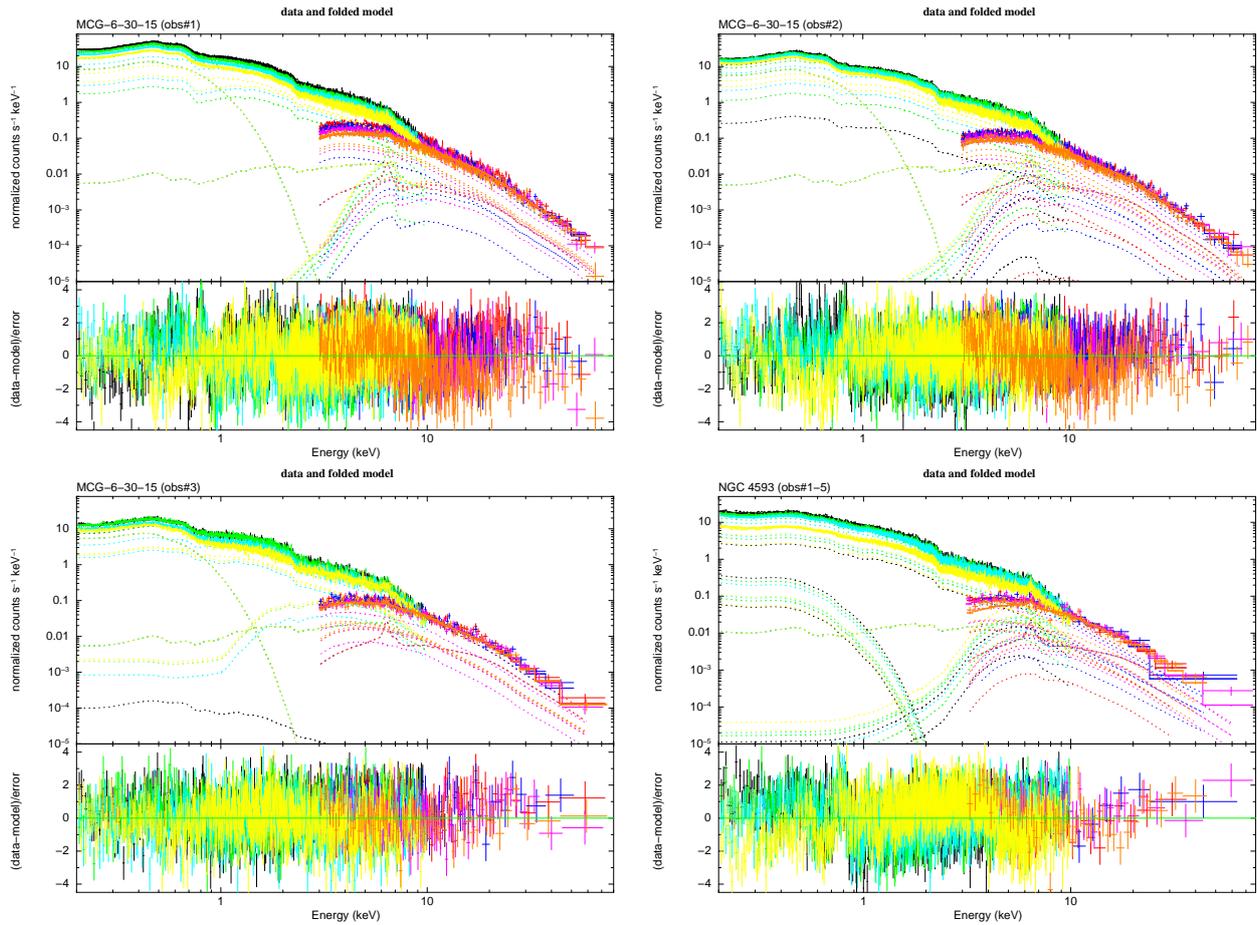
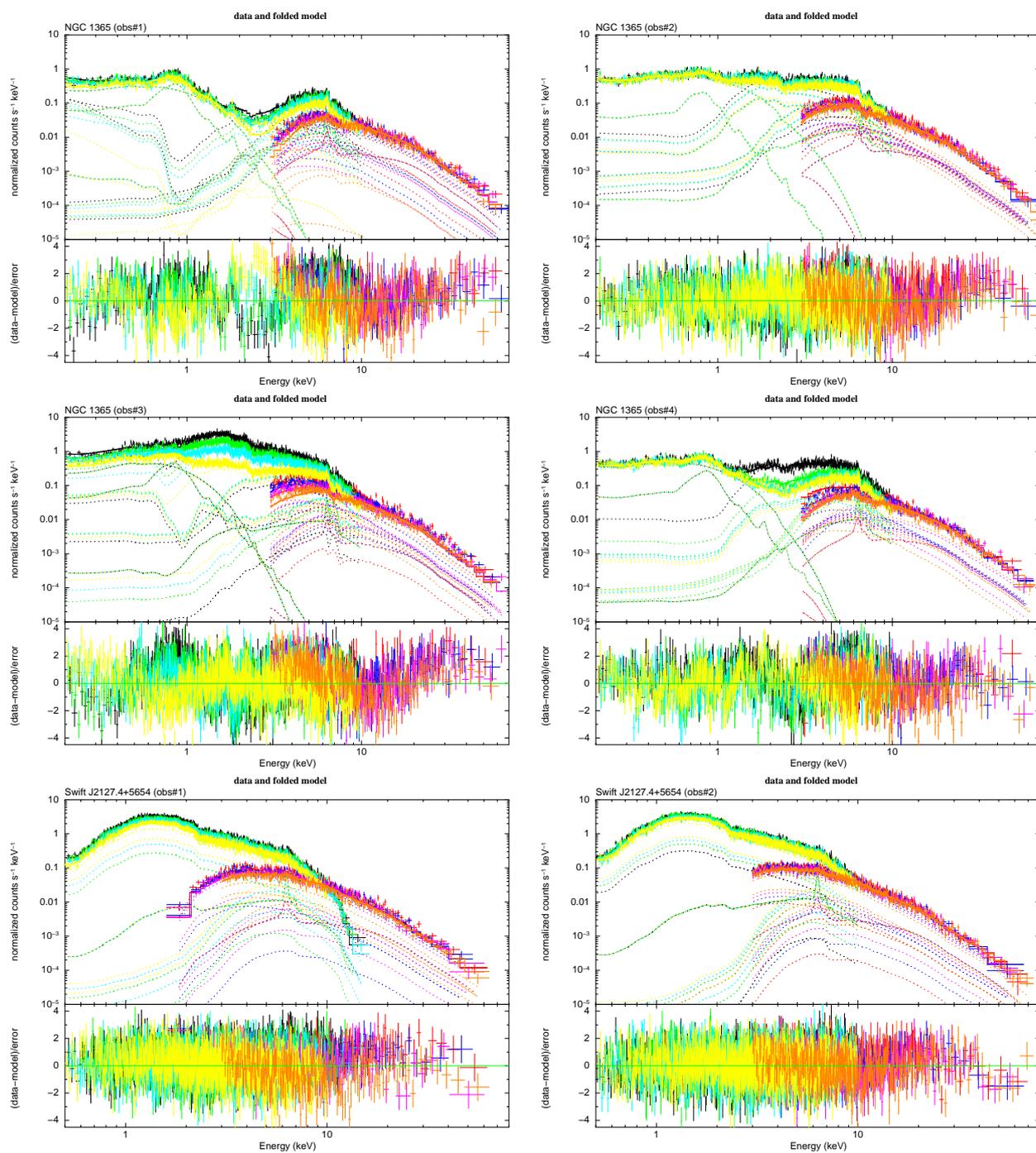
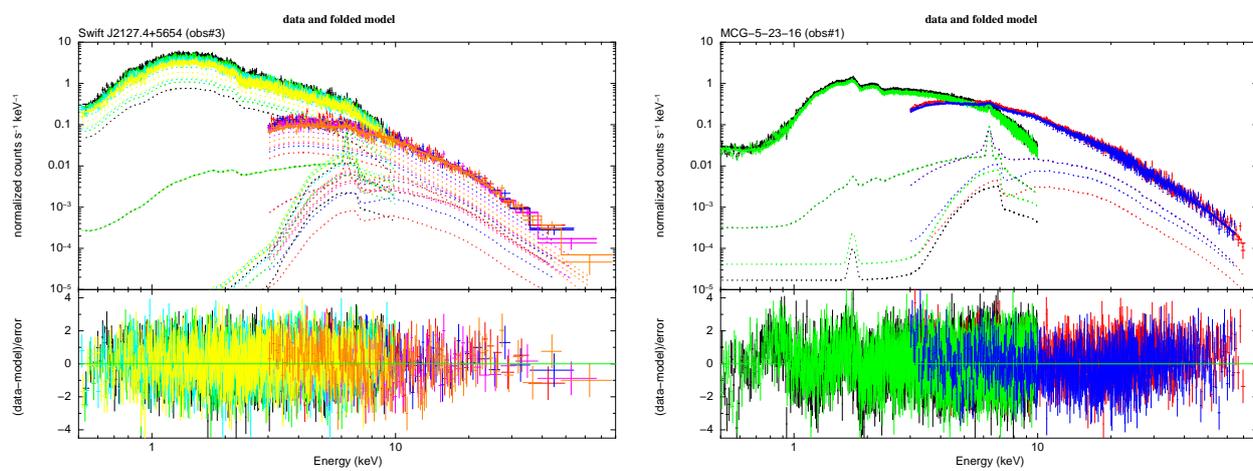


図 4.3: 低エネルギー側の強度変化に基づく強度スライススペクトルに対するモデルフィッティングの結果。各パネルで横軸にエネルギーをとり、上段はカウントレート (実線で観測値、点線でモデル値の各成分)、下段は観測とモデルの残差をプロットしている。強度と観測装置の異なるスペクトルデータごとに色分けされている。

☒ 4.3: *continue.*

図 4.3: *continue.*

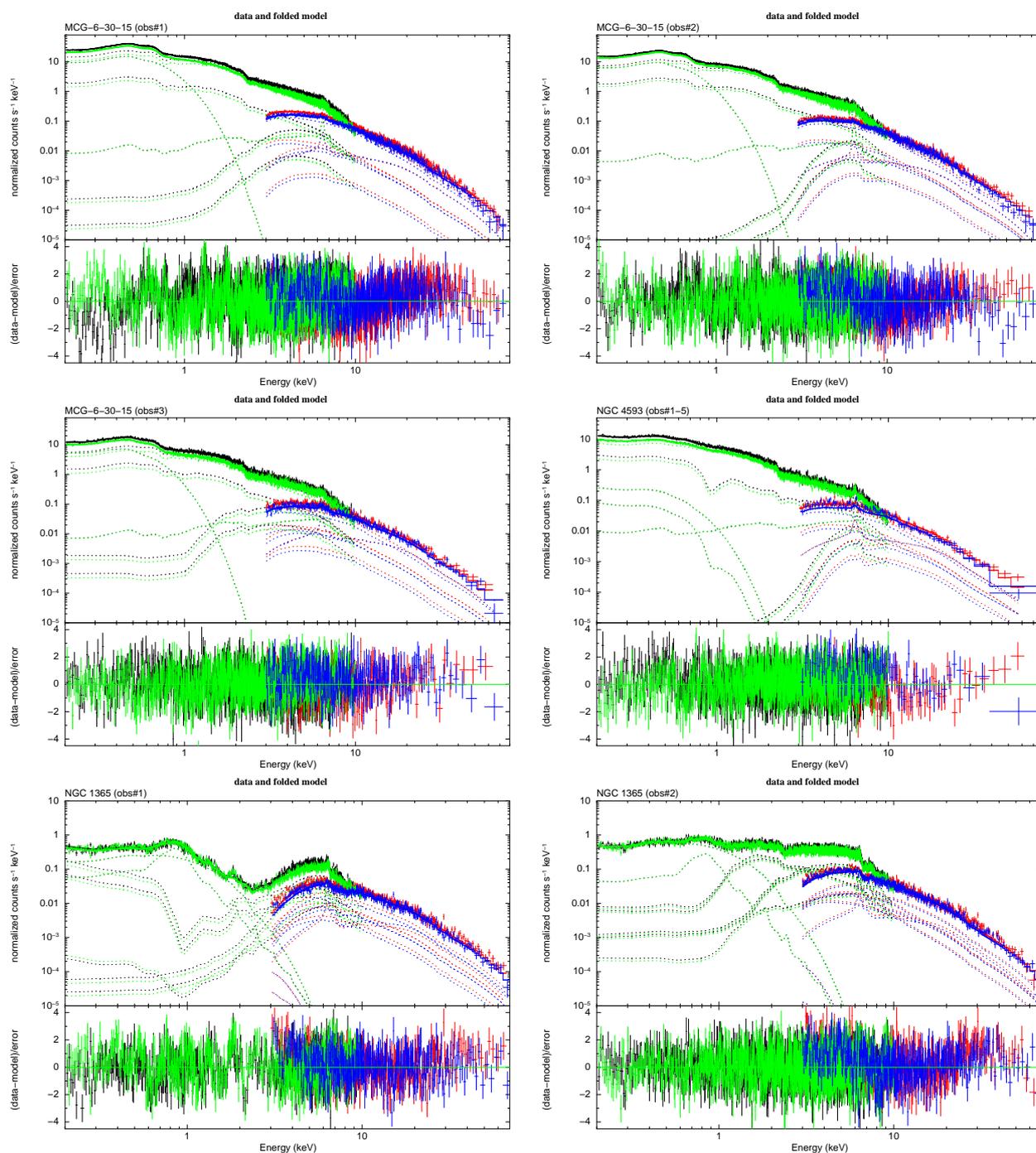
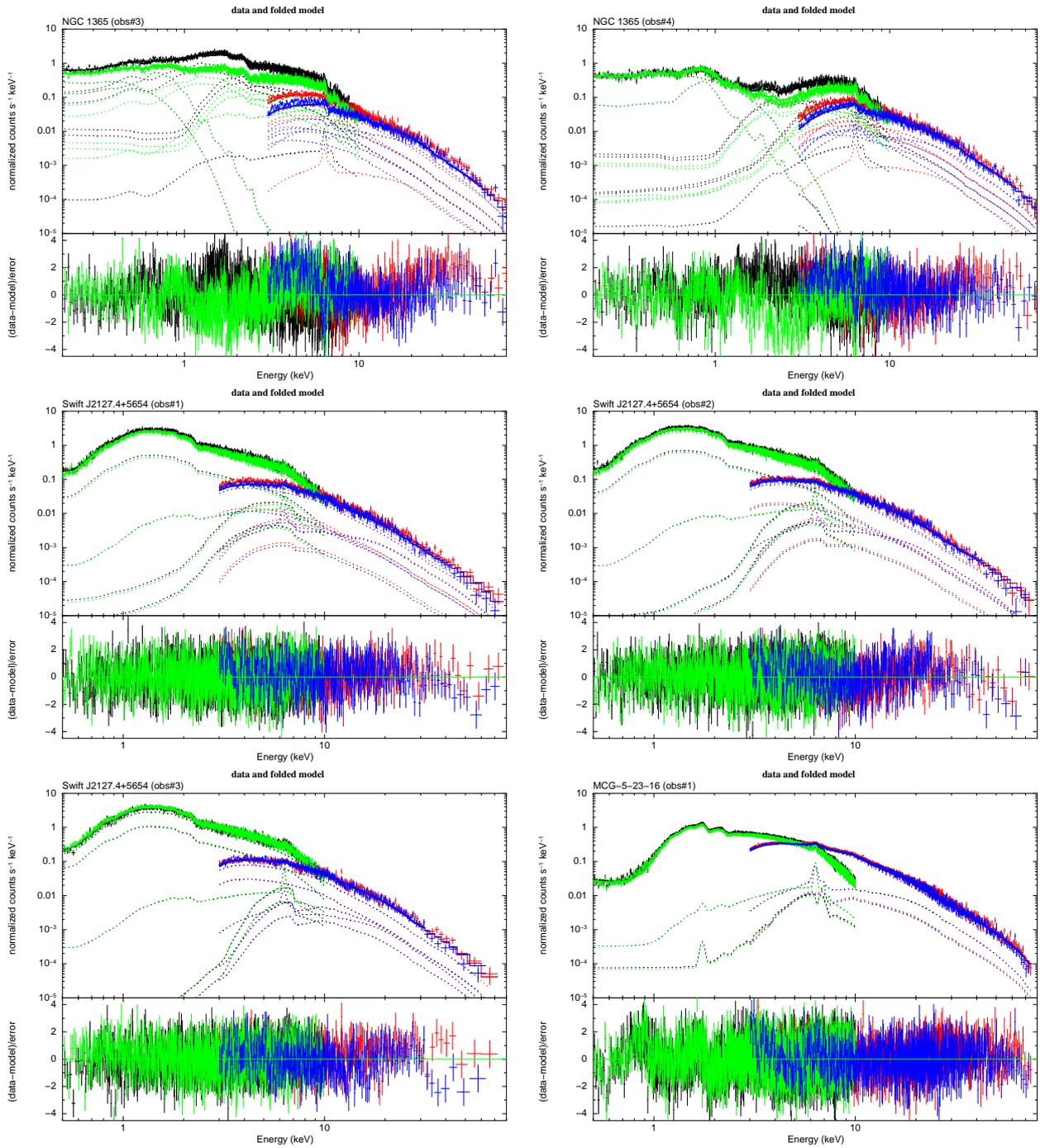


図 4.4: 高エネルギー側の強度変化に基づく強度スライススペクトルに対するモデルフィッティングの結果。各パネルで横軸にエネルギーをとり、上段はカウントレート (実線で観測値、点線でモデル値の各成分)、下段は観測とモデルの残差をプロットしている。強度と観測装置の異なるスペクトルデータごとに色分けされている。



☒ 4.4: *continue.*

表 4.7: 強度スライススペクトルの変動フィッティングパラメータ

天体	低エネルギー版				高エネルギー版	
	α				PLnorm [†]	
	A(明)	B	C	D(暗)	A'(明)	B'(暗)
MCG-6-30-15						
obs#1	$0.00^{+0.00}_{-0.00}$	$0.15^{+0.00}_{-0.00}$	$0.30^{+0.00}_{-0.00}$	$0.47^{+0.01}_{-0.00}$	$32.40^{+0.83}_{-0.81}$	$24.40^{+0.64}_{-0.62}$
obs#2	$0.14^{+0.00}_{-0.00}$	$0.22^{+0.00}_{-0.00}$	$0.34^{+0.00}_{-0.00}$	$0.48^{+0.00}_{-0.00}$	$18.72^{+0.93}_{-0.91}$	$15.37^{+0.78}_{-0.75}$
obs#3	$0.00^{+0.01}_{-0.00}$	$0.00^{+0.01}_{-0.00}$	$0.33^{+0.01}_{-0.01}$	$0.49^{+0.01}_{-0.01}$	$14.42^{+0.73}_{-0.70}$	$10.36^{+0.55}_{-0.52}$
NGC 4593						
obs#1-#5	$0.27^{+0.03}_{-0.03}$	$0.34^{+0.03}_{-0.03}$	$0.41^{+0.02}_{-0.02}$	$0.69^{+0.01}_{-0.01}$	$11.88^{+0.47}_{-0.55}$	$8.91^{+0.41}_{-0.36}$
NGC 1365						
obs#1	$0.76^{+0.01}_{-0.01}$	$0.82^{+0.01}_{-0.01}$	$0.86^{+0.01}_{-0.01}$	$0.98^{+0.02}_{-0.02}$	$7.47^{+0.58}_{-0.58}$	$5.63^{+0.44}_{-0.44}$
obs#2	$0.43^{+0.04}_{-0.04}$	$0.55^{+0.04}_{-0.04}$	$0.56^{+0.04}_{-0.04}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	$16.64^{+1.04}_{-0.97}$	$14.84^{+0.93}_{-0.86}$
obs#3	$0.17^{+0.03}_{-0.03}$	$0.36^{+0.02}_{-0.02}$	$0.54^{+0.02}_{-0.02}$	$0.75^{+0.02}_{-0.02}$	$20.15^{+1.19}_{-1.09}$	$8.22^{+0.46}_{-0.43}$
obs#4	$0.04^{+0.03}_{-0.03}$	$0.55^{+0.02}_{-0.02}$	$0.71^{+0.02}_{-0.02}$	$0.78^{+0.02}_{-0.02}$	$17.47^{+1.02}_{-1.22}$	$9.42^{+0.52}_{-0.64}$
Swift J2127.4+5654						
obs#1	$0.00^{+0.01}_{-0.00}$	$0.13^{+0.01}_{-0.01}$	$0.22^{+0.01}_{-0.01}$	$0.36^{+0.01}_{-0.01}$	$11.68^{+0.40}_{-0.39}$	$10.03^{+0.35}_{-0.34}$
obs#2	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	$0.15^{+0.03}_{-0.03}$	$0.20^{+0.03}_{-0.03}$	$0.28^{+0.03}_{-0.03}$	$14.28^{+0.55}_{-0.53}$	$12.65^{+0.49}_{-0.47}$
obs#3	$0.16^{+0.05}_{-0.06}$	$0.26^{+0.05}_{-0.05}$	$0.35^{+0.04}_{-0.05}$	$0.43^{+0.04}_{-0.04}$	$17.68^{+1.22}_{-1.17}$	$18.45^{+1.27}_{-1.23}$
MCG-5-23-16						
obs#1	$0.01^{+0.04}_{-0.01}$		$0.13^{+0.03}_{-0.01}$		$46.6^{+1.8}_{-2.1}$	$42.2^{+1.7}_{-1.7}$

† PLnorm [10^{-3} photons/keV/cm²/s @ 1 keV]

表 4.8: 強度スライススペクトル・低エネルギー版の共通フィッティングパラメータ

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
天体	A	P	T_{in}	$N_{\text{H},1}$	W_2	R_{Fe}	W_3	B	I_{gas}	G	$\text{Re-}\chi^2$
	$N_{\text{H,ISM}}$	Γ	norm	$\log \xi_1$	$N_{\text{H},2}$	norm	$N_{\text{H},3}$	T_{in}	kT	$E_{\text{line}} (\sigma_{\text{line}}), \text{norm}$	(d.o.f)
		E_{cut}	norm	$\log \xi_2$	$\log \xi_3$	z	$\log \xi_3$	norm	norm		
		PLnorm	α								
MCG-6-30-15											
obs#1	0.080	2.17	-	$74.8^{+3.0}_{-2.9}$	$0.43^{+0.05}_{-0.01}$	$8.1^{+0.8}_{-0.9}$	$1.46^{+0.02}_{-0.01}$	0.15	-	$0.48 (0.005), -1.3$	1.32 (6179)
		500		0.10	$1.13^{+0.05}_{-0.06}$	-0.005	$1.75^{+0.01}_{-0.01}$	3152^{+149}_{-137}		$0.54 (0.001), -0.1$	
		$36.4^{+0.3}_{-0.0}$		-	-					$0.71 (0.008), -0.3$	
										$0.86 (0.013), -0.2$	
obs#2	0.072	$2.08^{+0.01}_{-0.01}$	-	$41.2^{+2.1}_{-2.1}$	150^{+0}_{-97}	$4.9^{+0.9}_{-0.9}$	$0.94^{+0.03}_{-0.03}$	$0.135^{+0.002}_{-0.002}$	-	$0.40 (0.008), -0.7$	1.22 (5093)
		500		0.10	$3.90^{+0.3}_{-0.3}$	-0.005	$1.52^{+0.02}_{-0.02}$	3569^{+306}_{-288}		$0.71 (0.009), -0.2$	
		$20.7^{+0.3}_{-0.3}$		-	-					$0.85 (0.017), -0.2$	
obs#3	0.072	$2.07^{+0.01}_{-0.01}$	-	6.4	4.3	$9.0^{+0.6}_{-1.0}$	$0.78^{+0.02}_{-0.03}$	$0.116^{+0.001}_{-0.002}$	-	$0.44 (0.013), -0.3$	1.22 (2964)
		500		0.10	2.91	-0.005	$1.45^{+0.01}_{-0.03}$	6703^{+478}_{-580}		$0.71 (0.005), -0.1$	
		$12.4^{+0.2}_{-0.1}$		-	-					$0.85 (0.019), -0.1$	
NGC 4593											
obs#1-5	0.023	$2.04^{+0.01}_{-0.01}$	0.124	$39.9^{+2.1}_{-2.1}$	$1.3^{+0.5}_{-0.2}$	$6.2^{+0.8}_{-0.8}$	$0.34^{+0.03}_{-0.03}$	-	-	-	1.39 (3297)
		500	202	0.1	$2.64^{+0.11}_{-0.07}$		$1.55^{+0.03}_{-0.03}$				
		$14.4^{+0.6}_{-0.6}$		-	-						
NGC 1365											
obs#1	$0.022^{+0.003}_{-0.003}$	$1.96^{+0.03}_{-0.03}$	-	$14.7^{+1.3}_{-1.3}$	$64.8^{+4.0}_{-4.2}$	$4.1^{+0.6}_{-0.6}$	11.2	$0.35^{+0.01}_{-0.01}$	$0.65^{+0.01}_{-0.01}$	$6.83 (0.14), -0.02$	1.70 (1943)
		500		0.10	$2.47^{+0.05}_{-0.05}$		1.75	$1.86^{+0.28}_{-0.24}$	$0.14^{+0.01}_{-0.01}$		
		$10.8^{+0.9}_{-0.9}$		-	-						
obs#2	$0.012^{+0.006}_{-0.005}$	$1.97^{+0.03}_{-0.03}$	-	$8.0^{+1.4}_{-1.2}$	150^{+0}_{-2}	$4.9^{+0.8}_{-0.7}$	$5.3^{+0.6}_{-0.4}$	$0.55^{+0.07}_{-0.07}$	$0.55^{+0.04}_{-0.05}$	$6.92 (0.16), -0.05$	1.23 (3568)
		500		0.10	$3.06^{+0.02}_{-0.02}$		$0.55^{+0.22}_{-0.13}$	$0.77^{+0.4}_{-0.3}$	$0.07^{+0.01}_{-0.01}$		
		$15.5^{+0.9}_{-0.8}$		-	-						
obs#3	$0.078^{+0.014}_{-0.011}$	$2.02^{+0.03}_{-0.03}$	-	$5.4^{+1.1}_{-1.0}$	150^{+0}_{-1}	$1.6^{+0.6}_{-0.6}$	$1.99^{+0.03}_{-0.03}$	$0.22^{+0.04}_{-0.04}$	$0.58^{+0.02}_{-0.02}$	$6.92 (0.16), -0.04$	1.41 (4160)
		500		0.10	$2.78^{+0.02}_{-0.02}$		$0.78^{+0.03}_{-0.03}$	$20.6^{+33.4}_{-9.6}$	$0.19^{+0.03}_{-0.04}$		
		$20.6^{+1.4}_{-1.4}$		-	-						

continue.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
天体	A	P	B	W_1	W_2	R_{Fe}	W_3	B	I_{gas}	G	$\text{Re-}\chi^2$	
	$N_{\text{H,ISM}}$	Γ	T_{in}	$N_{\text{H},1}$	$N_{\text{H},2}$	norm	$N_{\text{H},3}$	T_{in}	kT	$E_{\text{line}} (\sigma_{\text{line}}), \text{norm}$	(d.o.f)	
		E_{cut}	norm	$\log \xi_1$	$\log \xi_2$	z	$\log \xi_3$	norm	norm			
		PLnorm	α									
obs#4	$0.005^{+0.004}_{-0.003}$	$1.95^{+0.03}_{-0.03}$	–	$18.0^{+2.1}_{-2.0}$	150^{+0}_{-1}	$3.8^{+0.7}_{-0.6}$	$6.8^{+0.2}_{-0.2}$	$0.40^{+0.01}_{-0.01}$	$0.63^{+0.02}_{-0.02}$	$6.84 (0.11), -0.03$	1.33 (2625)	
	500			0.10	$3.02^{+0.02}_{-0.02}$		$0.13^{+0.05}_{-0.03}$	$1.45^{+0.26}_{-0.22}$	$0.11^{+0.01}_{-0.01}$			
	$13.0^{+0.9}_{-0.8}$			–								
Swift J2127.4+5654												
obs#1	0.98	$1.99^{+0.01}_{-0.00}$	–	22.4	0.13	$2.7^{+0.3}_{-0.3}$	–	–	–	–	1.37 (4364)	
		442^{+58}_{-133}		0.1	2.6							
		$10.9^{+0.1}_{-0.0}$		–								
obs#2	0.98	$1.96^{+0.01}_{-0.01}$	–	34.5	0.32	$3.4^{+0.5}_{-0.5}$	–	–	–	–	1.05 (4870)	
		200^{+92}_{-80}		0.1	2.67							
		$13.1^{+0.5}_{-0.5}$		–								
obs#3	0.96	$1.98^{+0.01}_{-0.01}$	–	57.8	0.67	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	–	–	–	–	1.01 (3648)	
		76^{+26}_{-16}		0.1	2.6							
		$19.1^{+1.4}_{-1.4}$		–								
MCG-5-23-16												
obs#1	1.8	$1.85^{+0.01}_{-0.01}$	–	150^{+0}_{-11}	–	$14.9^{+0.7}_{-0.8}$	$0.83^{+0.07}_{-0.07}$	–	–	–	1.13 (6231)	
		116^{+12}_{-12}		$1.13^{+0.20}_{-0.33}$			$1.79^{+0.03}_{-0.03}$					
		$37.8^{+0.7}_{-0.8}$		–								

誤差範囲はすべて 90% 信頼区間で、誤差値の記載がないパラメータは固定値である。各列の意味ならびに単位は、表 4.3 に同じ。

表 4.9: 強度スライススペクトル・高エネルギー版の共通フィッティングパラメータ

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
天体	A	P	B	W_1	W_2	R_{Fe}	W_3	B	I_{gas}	G	$\text{Re-}\chi^2$
	$N_{\text{H,ISM}}$	Γ	T_{in}	$N_{\text{H},1}$	$N_{\text{H},2}$	norm	$N_{\text{H},3}$	T_{in}	kT	$E_{\text{line}} (\sigma_{\text{line}}), \text{norm}$	$\text{Re-}\chi^2$
		E_{cut}	norm	$\log \xi_1$	$\log \xi_2$	z	$\log \xi_3$	norm	norm		(d.o.f)
		PLnorm	α								
MCG-6-30-15											
obs#1	0.080	$2.16^{+0.01}_{-0.01}$	—	13.0	0.17	$12.6^{+1.0}_{-1.0}$	$0.93^{+0.02}_{-0.02}$	$0.14^{+0.01}_{-0.01}$	—	$0.48 (0.005), -1.3$	1.23 (3968)
		500		0.10	2.45	-0.005	$1.42^{+0.01}_{-0.01}$	4951^{+336}_{-324}		$0.54 (0.001), -0.1$	
		—		$0.12^{+0.02}_{-0.02}$						$0.71 (0.008), -0.3$	
				36.5	0.38	$6.2^{+0.8}_{-0.7}$	$0.84^{+0.03}_{-0.03}$	$0.136^{+0.002}_{-0.002}$		$0.86 (0.013), -0.2$	
obs#2	0.072	$2.05^{+0.01}_{-0.01}$	—	0.10	2.82	-0.005	$1.45^{+0.02}_{-0.02}$	3943^{+316}_{-302}		$0.40 (0.008), -0.7$	1.11 (3441)
		500		0.10	2.82	-0.005	$1.45^{+0.02}_{-0.02}$	3943^{+316}_{-302}		$0.71 (0.009), -0.2$	
		—		$0.19^{+0.03}_{-0.03}$						$0.85 (0.017), -0.2$	
obs#3	0.072	$2.05^{+0.03}_{-0.03}$	—	6.4	4.3	$9.8^{+1.4}_{-1.3}$	$0.78^{+0.04}_{-0.04}$	$0.115^{+0.002}_{-0.002}$		$0.44 (0.013), -0.3$	1.12 (2223)
		500		0.10	2.91	-0.005	$1.45^{+0.04}_{-0.04}$	7043^{+814}_{-744}		$0.71 (0.005), -0.1$	
		—		$0.21^{+0.03}_{-0.03}$						$0.85 (0.019), -0.1$	
NGC 4593											
obs#1-5	0.023	$1.98^{+0.01}_{-0.01}$	0.124	$43.3^{+11.7}_{-6.8}$	$7.3^{+0.7}_{-1.6}$	$5.7^{+0.7}_{-0.7}$	$0.10^{+0.03}_{-0.02}$	—	—	—	1.10 (2009)
		500	202	0.1	$2.20^{+0.05}_{-0.05}$		$1.15^{+0.13}_{-0.11}$				
		—		$0.32^{+0.02}_{-0.03}$							
NGC 1365											
obs#1	$0.015^{+0.011}_{-0.008}$	$1.78^{+0.03}_{-0.03}$	—	$25.7^{+2.7}_{-1.8}$	108^{+32}_{-25}	$1.7^{+0.5}_{-0.5}$	$20.5^{+3.3}_{-5.5}$	$0.37^{+0.01}_{-0.01}$	$0.65^{+0.01}_{-0.01}$	$6.83 (0.14), -0.02$	1.19 (1822)
		500		0.10	$3.40^{+0.05}_{-0.05}$		$1.95^{+0.12}_{-0.06}$	$1.57^{+0.34}_{-0.28}$	$0.15^{+0.01}_{-0.01}$		
		—		$0.88^{+0.05}_{-0.05}$							
obs#2	$0.026^{+0.007}_{-0.006}$	$1.97^{+0.02}_{-0.02}$	—	$9.8^{+0.7}_{-0.7}$	138^{+12}_{-15}	$5.6^{+0.9}_{-0.9}$	$3.9^{+0.5}_{-0.4}$	$0.36^{+0.06}_{-0.05}$	$0.60^{+0.03}_{-0.03}$	$6.92 (0.16), -0.05$	1.18 (3222)
		500		0.10	$3.10^{+0.02}_{-0.02}$		$0.81^{+0.11}_{-0.14}$	$3.26^{+2.43}_{-1.40}$	$0.11^{+0.02}_{-0.02}$		
		—		$0.70^{+0.02}_{-0.02}$							
obs#3	$0.041^{+0.017}_{-0.013}$	$2.02^{+0.02}_{-0.02}$	—	$4.2^{+0.3}_{-0.2}$	114^{+13}_{-12}	$0.8^{+1.0}_{-0.8}$	$0.9^{+0.5}_{-0.6}$	$0.12^{+0.02}_{-0.03}$	$0.31^{+0.01}_{-0.01}$	$6.92 (0.16), -0.04$	1.61 (3153)
		500		0.10	$3.11^{+0.02}_{-0.01}$		$0.23^{+0.09}_{-0.08}$	186^{+653}_{-120}	$0.28^{+0.05}_{-0.03}$		
		—		$0.72^{+0.01}_{-0.01}$							

continue.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
天体	A	P	B	W_1	W_2	R_{Fe}	W_3	B	I_{gas}	G	$\text{Re-}\chi^2$
	$N_{\text{H,ISM}}$	Γ	T_{in}	$N_{\text{H},1}$	$N_{\text{H},2}$	norm	$N_{\text{H},3}$	T_{in}	kT	$E_{\text{line}} (\sigma_{\text{line}}), \text{norm}$	(d.o.f)
		E_{cut}	norm	$\log \xi_1$	$\log \xi_2$	z	$\log \xi_3$	norm	norm		
		PLnorm	α								
obs#4	$0.010^{+0.004}_{-0.004}$	$1.96^{+0.02}_{-0.02}$	–	$16.1^{+1.4}_{-1.3}$	146^{+4}_{-24}	$1.2^{+0.8}_{-0.7}$	$11.3^{+0.5}_{-0.7}$	$0.38^{+0.01}_{-0.01}$	$0.64^{+0.02}_{-0.02}$	$6.84 (0.11), -0.03$	1.53 (2409)
–	–	500	–	0.10	$3.08^{+0.02}_{-0.02}$	–	$1.27^{+0.10}_{-0.10}$	$1.95^{+0.31}_{-0.28}$	$0.11^{+0.01}_{-0.01}$	–	–
–	–	–	–	$0.67^{+0.04}_{-0.03}$	–	–	–	–	–	–	–
Swift J2127.4+5654											
obs#1	0.98	$1.99^{+0.01}_{-0.01}$	–	22.4	0.13	$3.7^{+0.5}_{-0.5}$	–	–	–	–	1.01 (3133)
–	–	388^{+112}_{-146}	–	0.1	2.6	–	–	–	–	–	–
–	–	–	–	$0.17^{+0.01}_{-0.01}$	–	–	–	–	–	–	–
obs#2	0.98	$1.97^{+0.01}_{-0.01}$	–	34.5	0.32	$3.6^{+0.5}_{-0.5}$	–	–	–	–	1.01 (3388)
–	–	181^{+64}_{-39}	–	0.1	2.6	–	–	–	–	–	–
–	–	–	–	$0.21^{+0.03}_{-0.03}$	–	–	–	–	–	–	–
obs#3	0.96	$1.97^{+0.01}_{-0.01}$	–	57.8	0.67	$3.6^{+0.8}_{-0.8}$	–	–	–	–	1.00 (2754)
–	–	82^{+22}_{-15}	–	0.1	2.6	–	–	–	–	–	–
–	–	–	–	$0.28^{+0.04}_{-0.05}$	–	–	–	–	–	–	–
MCG-5-23-16											
obs#1	1.8	$1.91^{+0.02}_{-0.01}$	–	$87.9^{+4.0}_{-9.2}$	–	$15.8^{+0.8}_{-0.9}$	$1.04^{+0.08}_{-0.10}$	–	–	–	1.15 (6302)
–	–	149^{+23}_{-16}	–	$1.14^{+0.12}_{-0.09}$	–	–	$1.82^{+0.03}_{-0.04}$	–	–	–	–
–	–	–	–	$0.15^{+0.01}_{-0.02}$	–	–	–	–	–	–	–

誤差範囲はすべて 90% 信頼区間で、誤差値の記載がないパラメータは固定値である。各列の意味ならびに単位は、表 4.3 に同じ。

4.5 RMS スペクトル

4.5.1 RMS の計算

あるエネルギー範囲におけるデータ変動率の大きさを与える RMS 値は、時間スライススペクトルと同じデータセットを用いて算出した。すなわち、時間ビン長は 10 キロ秒である*2。指定したエネルギー帯それぞれで RMS 値を計算し、エネルギーを横軸にとって RMS 値をプロットしたものが RMS スペクトルである。計算式は [Edelson et al. \(2002\)](#) を参照しており、以下で詳細を示す。

時間ビン N 本のライトカーブがあるとき、各ビン内を n_i 個のポイントに分けて考え、 i 番目のビン中にある j 番目のポイントにおけるカウントレートを x_{ij} と表記する。(今、 N は表 4.6 の値に対応する。) このとき、 i 番目のビンの平均カウントレート X_i と、その分散 $\sigma_{err,i}^2$ はそれぞれ次のようになる。

$$X_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{err,i}^2 = \frac{1}{n_i(n_i-1)} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - X_i)^2 \quad (4.3)$$

ここで、 $\sigma_{err,i}^2$ は次の測定雑音 $\langle \sigma_{err}^2 \rangle$ を与える。

$$\langle \sigma_{err}^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{err,i}^2 \quad (4.4)$$

そして、ライトカーブ全体での平均カウントレート $\langle X \rangle$ と分散 S^2 は次のようになる。

$$\langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (4.5)$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \langle X \rangle)^2 \quad (4.6)$$

観測されている分散 S^2 は、天体の変動による固有な分散 $\langle X \rangle^2 \sigma^2$ と、測定雑音としての分散 $\langle \sigma_{err}^2 \rangle$ との和であり、天体由来の揺らぎ σ^2 に基づく天体の変動率の大きさ $F_{var} = \sigma$ は、次で計算される。

$$F_{var} = \sqrt{\frac{S^2 - \langle \sigma_{err}^2 \rangle}{\langle X \rangle^2}} \quad (4.7)$$

この F_{var} を RMS 値とも呼ぶ。次に、 F_{var} に対する誤差 (つまり標準偏差) を考える。 σ^2 の標準偏差は

$$\sigma_{\sigma^2} = \sqrt{\frac{2}{N} \frac{S^2}{\langle X \rangle^2}} \quad (4.8)$$

*2 NGC 4593 は 10 キロ秒の時間スライスをしていないため、時間ビン長は 1 観測の約 25 キロ秒。

であり、 $F_{\text{var}} = \sqrt{\sigma^2}$ について誤差の伝播を考えて F_{var} の標準偏差は次で与えられる。

$$\sigma_{F_{\text{var}}} = \frac{1}{F_{\text{var}}} \sqrt{\frac{1}{2N} \frac{S^2}{\langle X \rangle^2}} \quad (4.9)$$

4.5.2 RMS スペクトルの結果

適当に分割したエネルギービン毎に式 (4.7) で RMS 値を算出して、観測データとモデルでそれぞれ RMS スペクトルを作成した。その結果を図 4.5 で示す。観測データに基づく RMS 値の特徴的なエネルギー依存性を、モデルからも再現できていることがわかる。

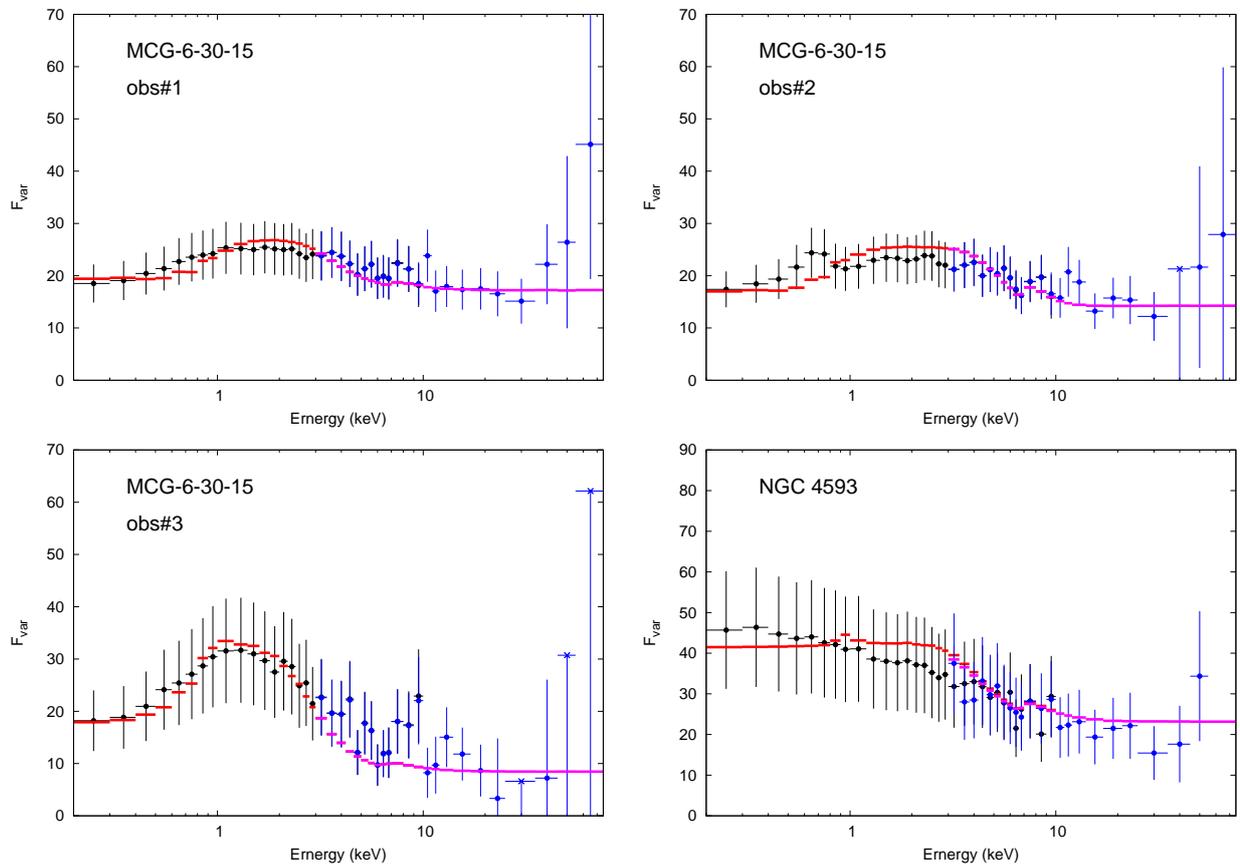
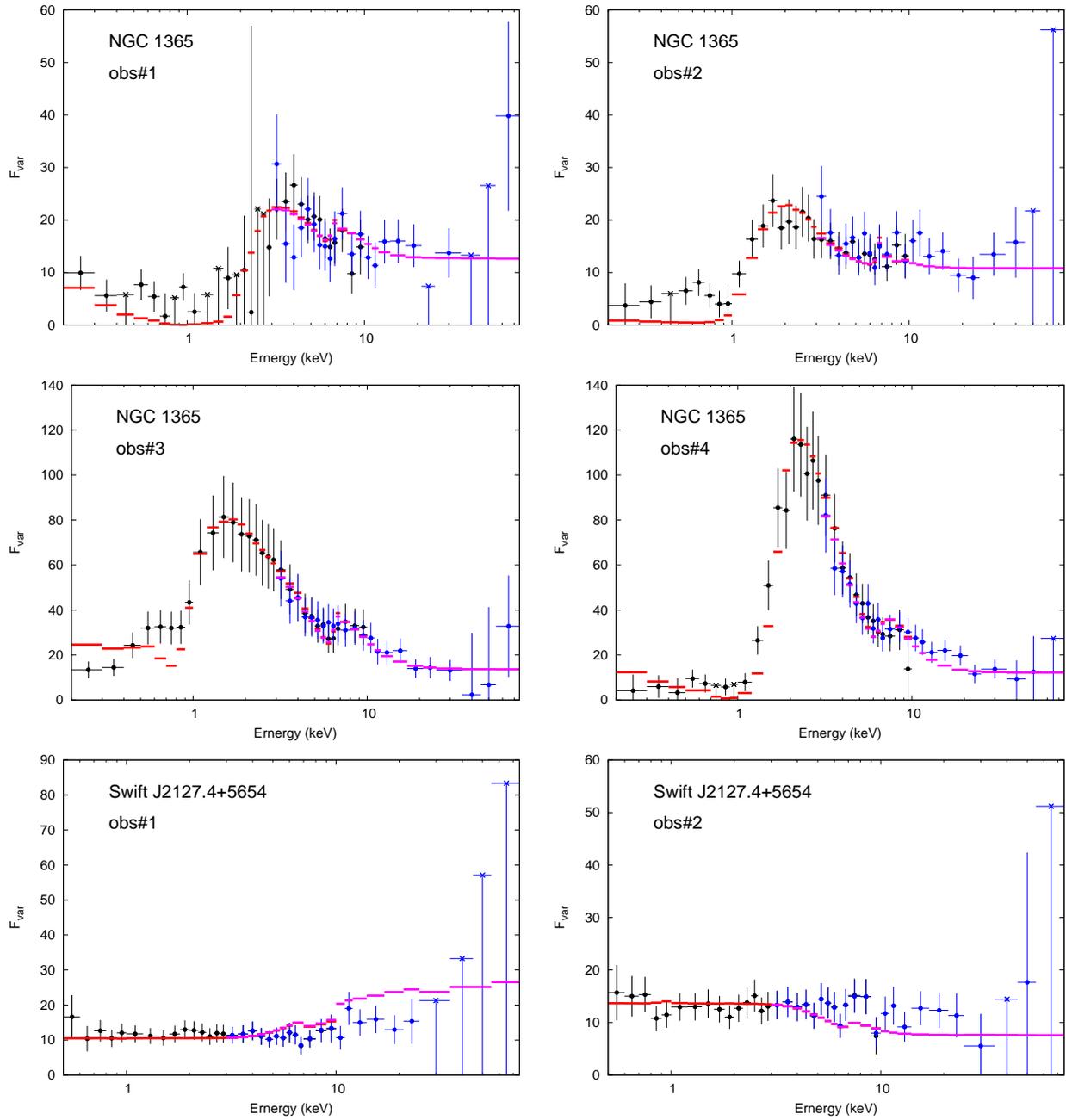


図 4.5: RMS スペクトル。各パネルで横軸にエネルギー、縦軸に式 (4.7) で求まる RMS 値をとっている。式 (4.9) で与えられる誤差棒の付いた点が観測データ (XMM-Newton または Suzaku が黒、NuSTAR が青) に基づく RMS 値、誤差棒なしの線がモデル (XMM-Newton または Suzaku が赤、NuSTAR がピンク) に基づく RMS 値をプロットしたもの。

図 4.5: *continue.*

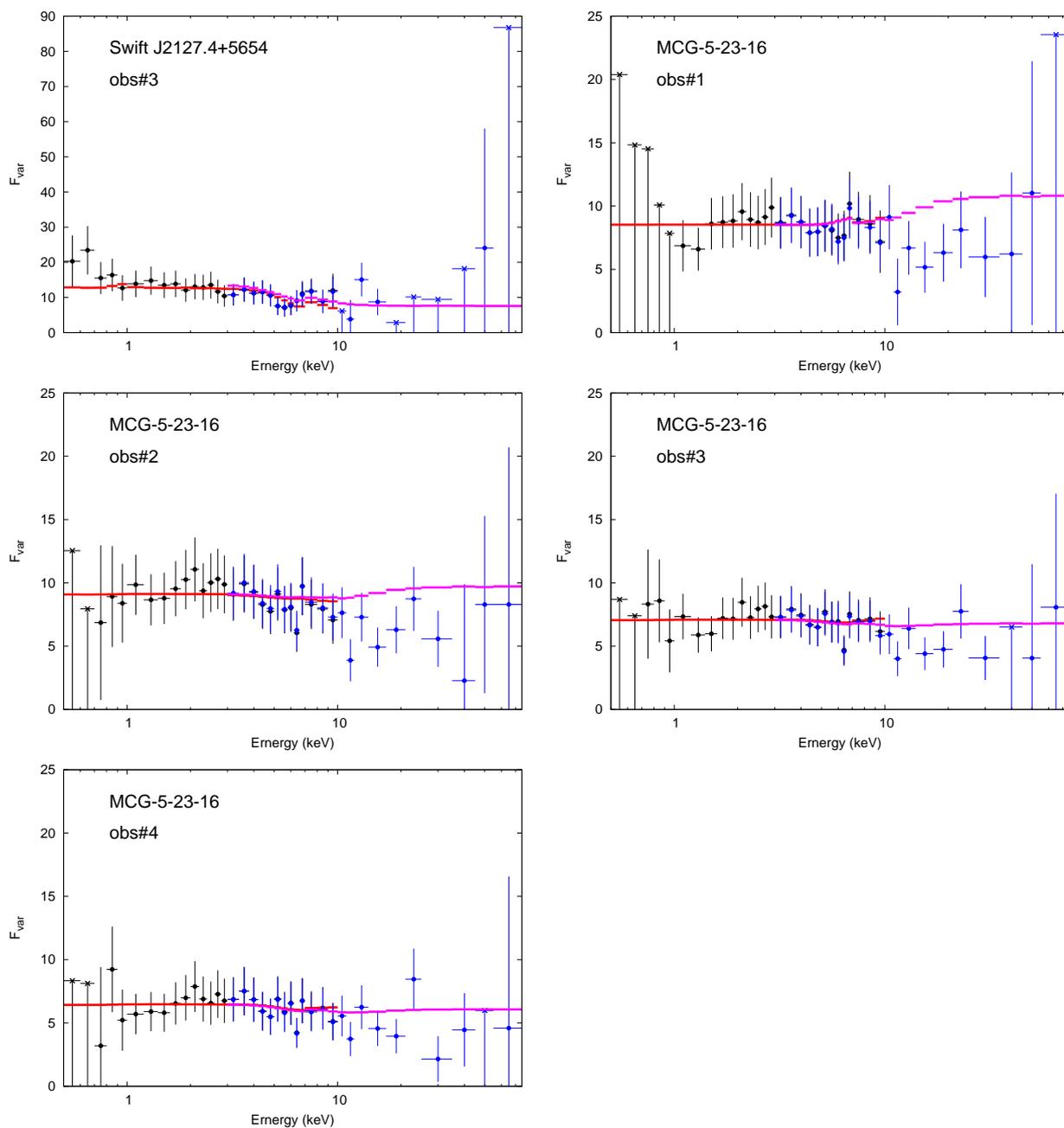


図 4.5: *continue.*

4.6 ライトカーブ

4.6.1 ライトカーブシミュレーションの手順

時間スライススペクトルに対するフィッティングモデルを使用して、モデルライトカーブを作成した。スペクトル変化を引き起こすモデルパラメータは、カバリングファクタ $[\alpha]$ と連続成分の強度 [PLnorm]

のみと仮定した。ここでは XSPEC のシミュレーションツールである `fakeit` を用いて、入力したモデル関数があるパラメータセットに対して与えるカウントレートを計算した。ライトカーブシミュレーションの実行手順を以下で示す。

1. 低エネルギー側 (XMM-Newton/EPIC-pn または Suzaku/XIS の 10 keV 以下) を 4 つの帯域^{*3}(1) all: 0.2–10 keV, (2) soft: 0.2–1 keV, (3) medium: 1–3 keV, (4) hard: 3–10 keV に分割し、各帯域の観測ライトカーブを用意する。
2. 時間スライススペクトルのフィッティングモデルで、 α の値を 0 から 1.00 まで 0.01 刻みで振り、その他のパラメータは全て固定して `fakeit` を実行する。ここから、入力した α 値に対する出力カウントレートのテーブルを、各帯域それぞれについて得る。
3. soft (または medium) 帯域の観測カウントレートから、ライトカーブの各時間ビンに対する α 値を決定する。その値から各帯域でのモデルカウントレート値を得る。
4. 求めた各 α 値に対し、時間スライススペクトルのフィッティング結果である PLnorm 値の 0.5 倍から 2 倍までをその幅の 0.01 倍刻みで振って `fakeit` を実行する。ここから、入力した PLnorm 値に対する出力カウントレートのテーブルを各帯域それぞれについて得る。
5. hard 帯域の観測カウントレートから、ライトカーブの各時間ビンに対する PLnorm 値を決定する。その値から各帯域でのモデルカウントレート値を得る。
6. 求めた各 PLnorm 値に対し、再び α 値を現在の値から ± 0.1 の幅で 0.005 刻みに振って `fakeit` を実行する。ここから、入力した α 値に対する出力カウントレートのテーブルを、各帯域データそれぞれについて得る。
7. soft (または medium) 帯域の観測カウントレートから、ライトカーブの各時間ビンに対する α 値を決定する。その値から各帯域でのモデルカウントレート値を得る。

以上の方法により、シミュレーションによるモデルライトカーブの他、 α 変動および PLnorm 変動を表すパラメータカーブも作成した。

4.6.2 ライトカーブシミュレーションの結果

得られたライトカーブとパラメータカーブを天体ごとに図 4.6 から図 4.10 で示す。結果として、どの帯域についてもモデルから観測ライトカーブを再現できていることがわかる。さらに、時間スライススペクトルのフィッティングから得られるよりも、細かい時間ビンでのパラメータ変動が明白に現れている。大局的に捉えて α 変動と PLnorm 変動に明らかな相関は見られず、両パラメータは独立に変化している。

^{*3} Swift J2127.4+5654 と MCG-5-23-16 については、表 4.2 に基づき (1) all: 0.5–10 keV, (2) soft: 0.5–1 keV である。

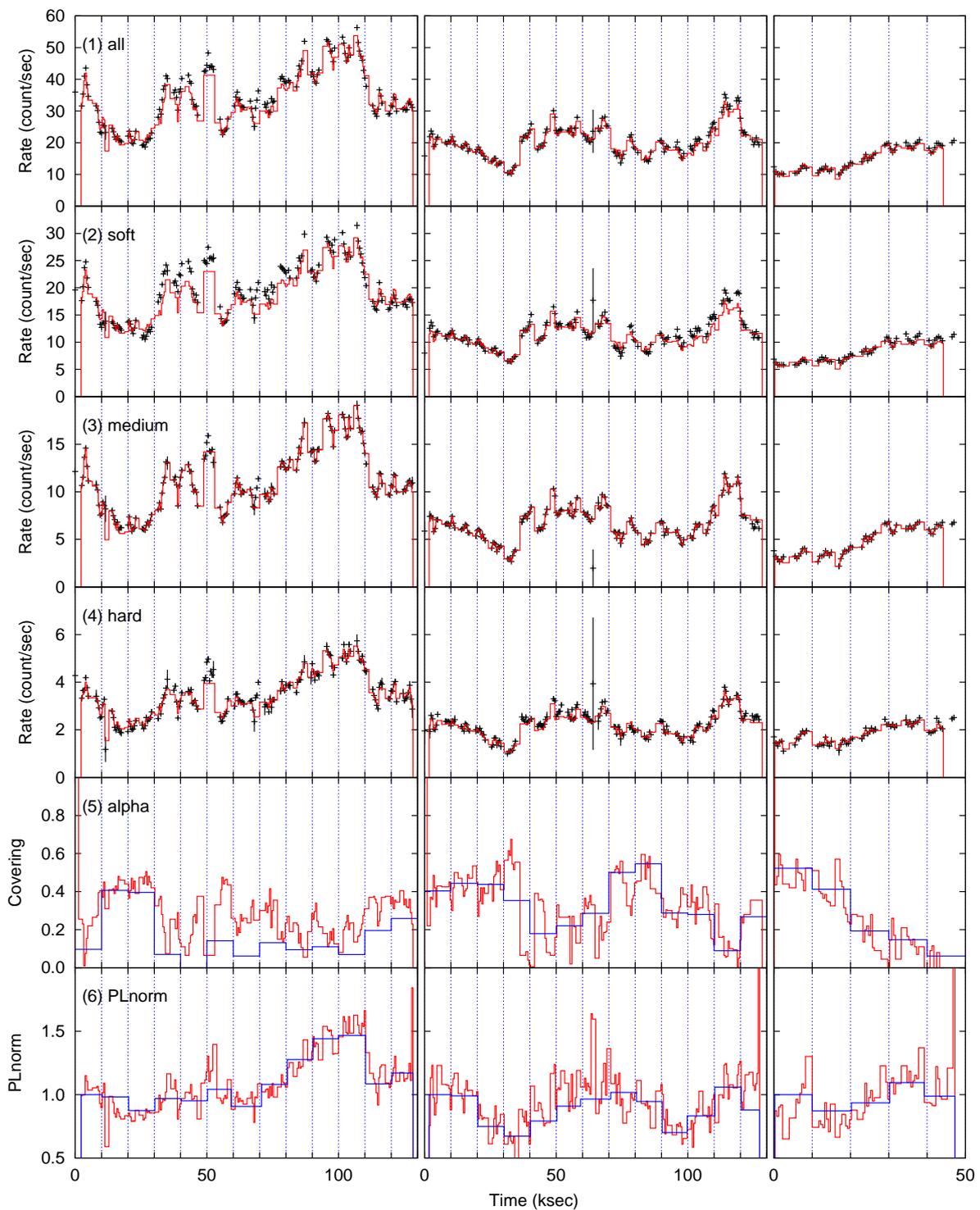


図 4.6: MCG-6-30-15 のライトカーブとパラメータカーブ。左から順に obs#1, 2, 3 のデータを表し、上から順に (1) all: 0.2–10 keV, (2) soft: 0.2–1 keV, (3) medium: 1–3 keV, (4) hard: 3–10 keV の各帯域における観測 (黒い点) とモデル (赤い線) のライトカーブ、(5) α のパラメータカーブ (6) 時刻 $t = 0$ での PLnorm 値で規格化した PLnorm 変動に対応するパラメータカーブで、それぞれ時間スライススペクトルフィッティング時の値 (青; 表 4.5) とシミュレーション結果 (赤)。

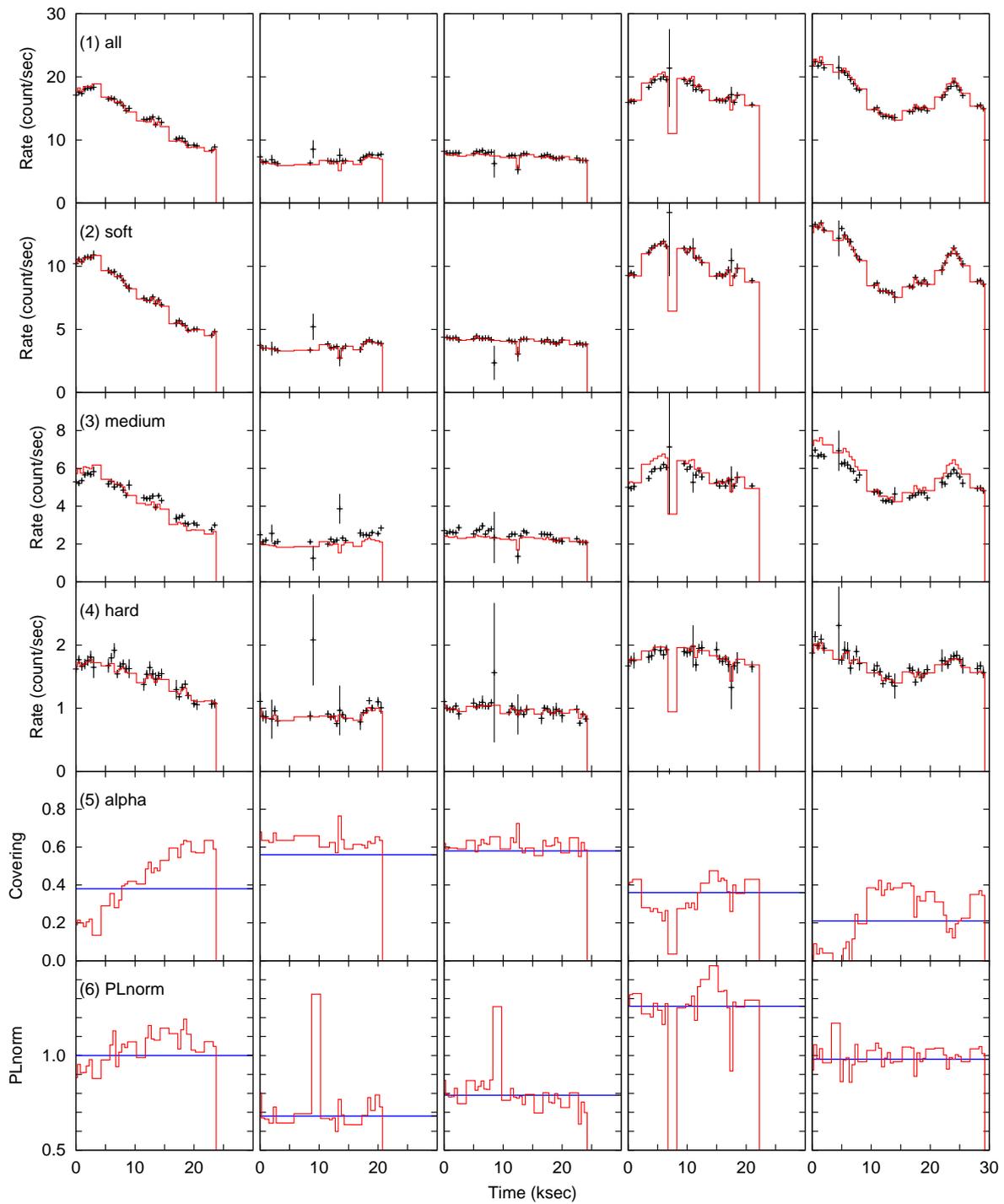


図 4.7: NGC 4593 のライトカーブとパラメータカーブ。左から順に obs#1, 2, 3, 4, 5 のデータを表し、(1)–(5) については図 4.6 と同様である。

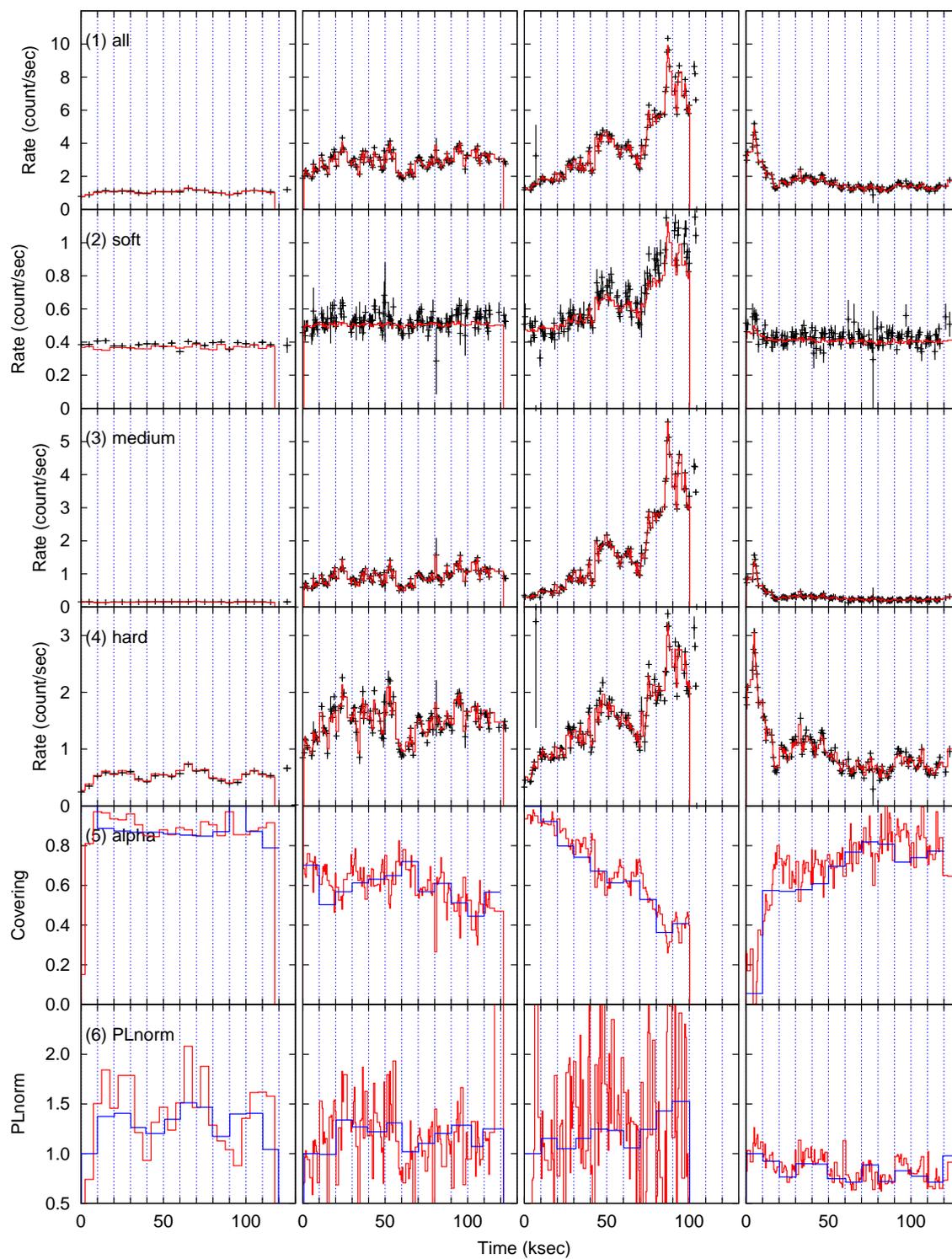


図 4.8: NGC 1365 のライトカーブとパラメータカーブ。左から順に obs#1, 2, 3, 4 のデータを表し、(1)–(5) については図 4.6 と同様である。

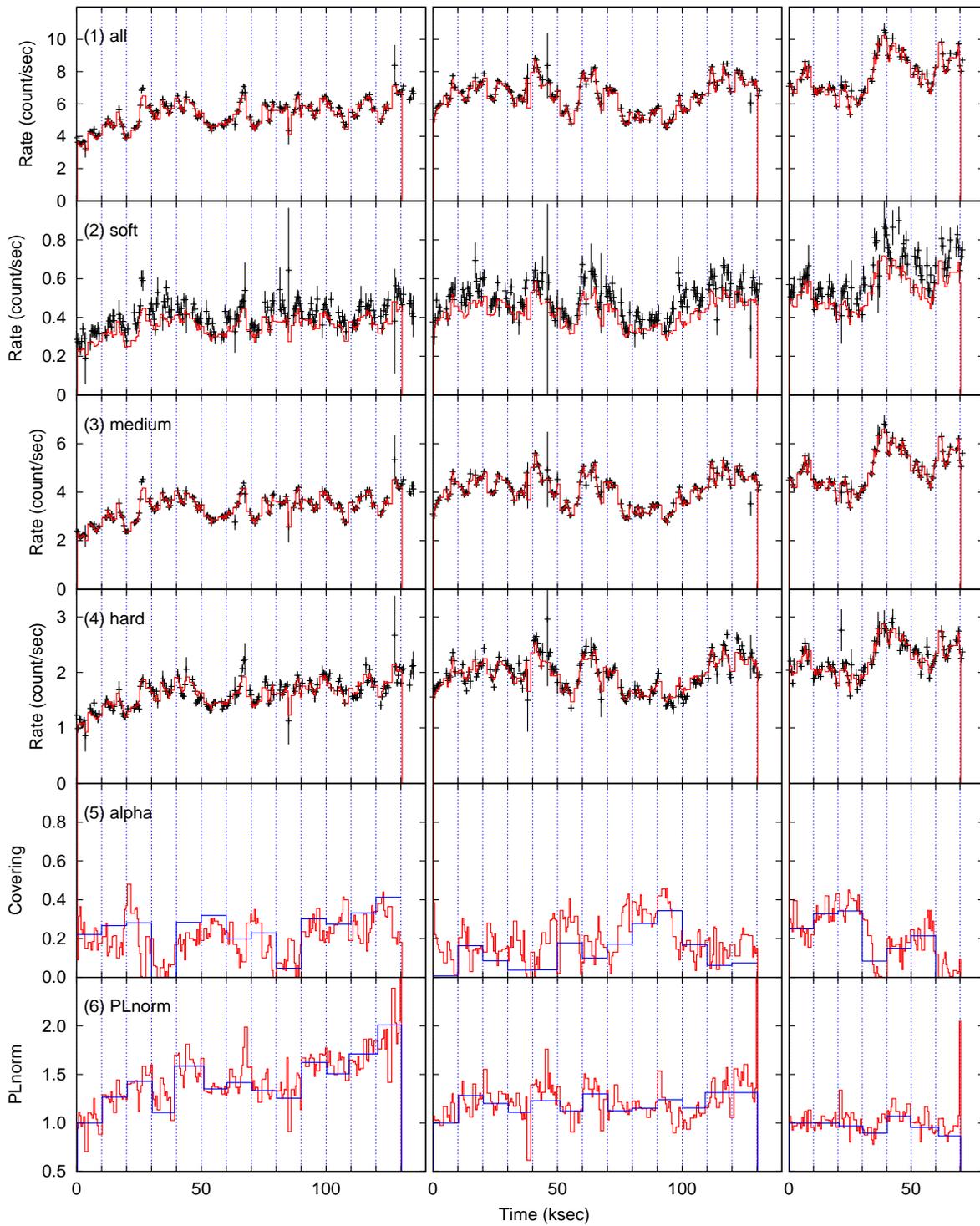


図 4.9: Swift J2127.4+5654 のライトカーブとパラメータカーブ。左から順に obs#1, 2, 3 のデータを表し、(1)–(5) については図 4.6 と同様である。

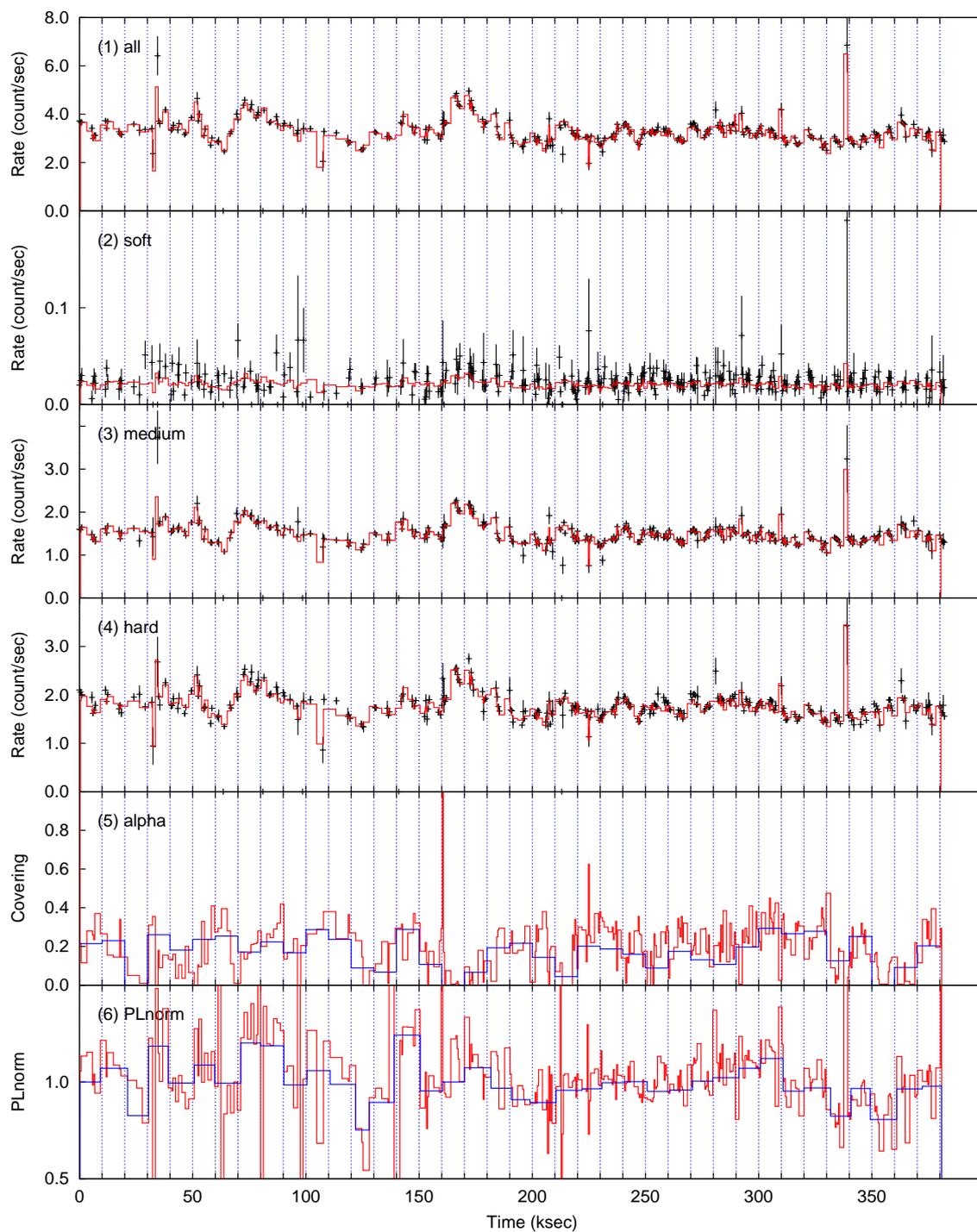


図 4.10: MCG-5-23-16 のライトカーブとパラメータカーブ。(1)-(5) については図 4.6 と同様である。

第 5 章

議論

Contents

5.1	VDPC モデルの適合性	98
5.1.1	エネルギースペクトルの解釈	99
5.1.2	RMS スペクトルの解釈	101
5.1.3	ライトカーブの解釈	101
5.1.4	VDPC モデルによる解釈の汎用性	102
5.2	部分吸収が起きていることの検証に向けて	103
5.2.1	仮想 AGN スペクトルのモデルフィッティング	103
5.2.2	RMS スペクトルで見るカバリングファクタ変動	109
5.2.3	二重吸収線とカバリングファクタ	111

本章では、前章で示した解析結果に基づき、活動銀河中心核における広帯域 X 線スペクトル変動の解釈と、モデルの妥当性についてまとめる。また、将来の X 線天文衛星ミッションによって、異なるモデルが観測データからどのようにして区別されるのか、その手法を検討する。

5.1 VDPC モデルの適合性

今回、各種解析を行った 5 つのセイファート銀河 (16 観測) について、0.2–78 keV の広帯域に渡るエネルギースペクトルを式 (4.1) で示す VDPC モデルに基づいて説明することができた (図 5.1)。ただし、以下のように、天体によって必要なモデル成分に多少の違いがある。

- 全ての天体で、X 線源 (幕関数の連続成分 P) を部分的に覆う電離吸収体 (W_1, W_2) と、遠方からの冷たい反射成分 (R_{Fe}) を要する。
- MCG-5-23-16 は部分吸収体が一様な密度および電離度であった (W_1) が、その他の天体では密度および電離度の異なる二層構造 (W_1, W_2) を要する。
- Swift J2127.4+5654 以外の天体では、視線上で X 線源の全体を覆う電離吸収体 (W_3) を要する。
- MCG-6-30-15, NGC 4593, NGC 1365 は円盤からの黒体放射成分 (B) を要し、このうち NGC 4593 の黒体放射成分は部分吸収を受けている。
- NGC 1365 では、母銀河からのものと思われる拡散したプラズマ熱放射 (I_{gas}) を要する。

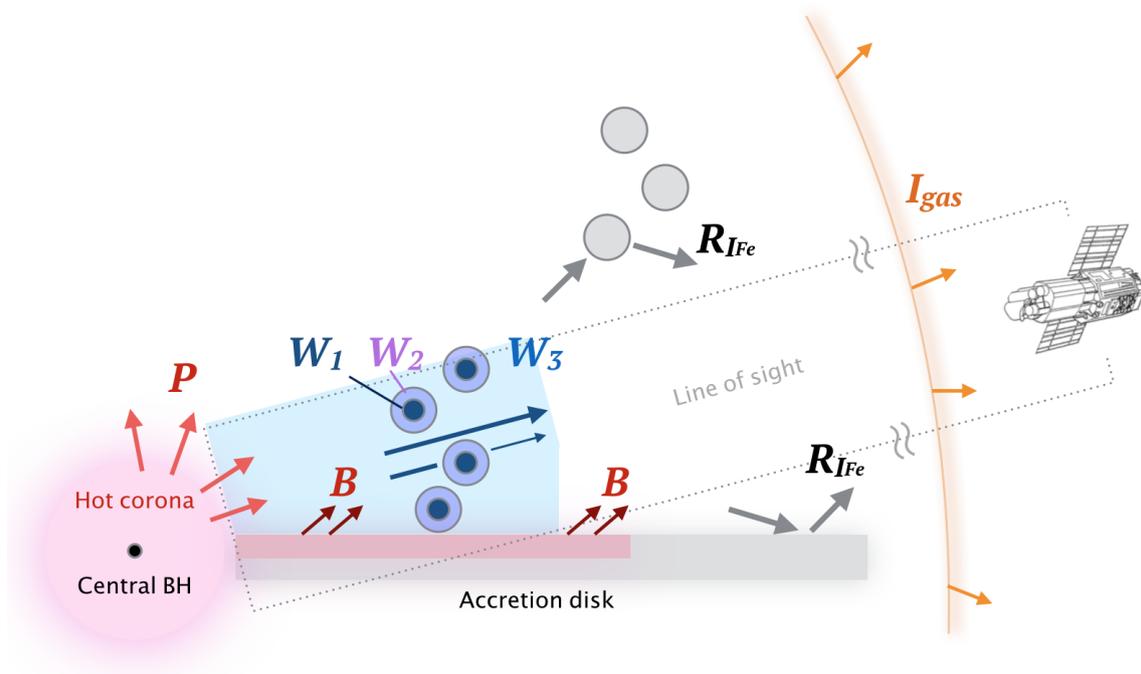


図 5.1: VDPC モデルで考える AGN 中心ブラックホール周辺における X 線放射領域の物理構造。

観測される広帯域スペクトル変動は、X 線源に固有な強度 [PLnorm] と部分吸収体のカバリングファクタ $[\alpha]$ の、ただ二つの独立な変動パラメータの重ね合わせによって説明できる。このことは 5 天体すべてに適用され、統一的に以下のことが言える。

- X 線源に固有な強度変動は、X 線スペクトル全域に渡る冪関数成分の強度変化によって表される。吸収の効果が無視できる ~ 25 keV 以上の帯域では、直接この強度変化が観測される。
- その上で、吸収の効果を顕著に受ける 10 keV 以下の帯域においては、部分吸収体のカバリングファクタ変化に伴う強度変動が支配的となっている。観測されている数時間スケールの激しい時間変動は、主にこのカバリングファクタ変化に起因する。

5.1.1 エネルギースペクトルの解釈

時間スライススペクトルでは、 α と PLnorm の二つを変化させるだけで、スペクトル変動を説明できることを示した。また、強度スライススペクトルでは、低エネルギー版と高エネルギー版のそれぞれについて、 α のみ、PLnorm のみを変化させるだけで、0.2–78 keV の全帯域に対するスペクトル変動を説明できた。これは、両パラメータが独立に変動していることを表し、低エネルギー側と高エネルギー側で α 変動と PLnorm 変動がそれぞれ支配的であることを示している。

ここからは、今回使用したものと同一 XMM-Newton と NuSTAR の同時観測データセットを解析に用いた先行研究を含め、各天体の先行論文と比較して、そのスペクトルモデルについて概観する。

1 型セイファート銀河 MCG-6-30-15

[Marinucci et al. \(2014b\)](#) は、相対論的反射モデルと部分吸収モデルの両方を適用し、どちらでも 0.35–80 keV に渡るスペクトルが説明されることを報告している。ただし、フィッティング結果は相対論的反射モデルの方が良好であると結論している。この部分吸収モデルでは、RGS で観測される低エネルギー側の細かい吸収構造を作る 2 種類の電離物質 (w_1, w_2) と 1 種類の中性物質による全体吸収を要する他、反射成分に対する全体吸収 (w_4) と冪関数に対する部分吸収 (w_5) を担う電離吸収体の、計 5 種類の吸収物質を要する。ここからもわかるように、MCG-6-30-15 の X 線スペクトルは非常に複雑な吸収構造をもつことが知られている。

本研究で適用した VDPC モデルでは、二層の電離物質 (W_1, W_2) による部分吸収と全体吸収 (W_3) という 3 種類の電離吸収に、数本の吸収線を加えるだけで、スペクトルを説明することができている。両者のモデルを比較すると、前者は部分吸収を担う電離吸収体が 1 つであるのに対し、後者は 2 つとなっている。また、遠方の反射体について、前者は電離物質、後者は中性物質を想定している点が異なっている。電離吸収体のパラメータについては、 $\log \xi \sim 2$ の w_1 と W_2 および $\log \xi \sim 1.5$ の w_2 と W_3 は互いにほぼ同等であった。

1 型セイファート銀河 NGC 4593

Ursini et al. (2016) は相対論的反射モデルを適用し、0.3–79 keV のスペクトルを説明している。このとき、冪関数と相対論的反射成分の他に、1 keV 以下に対して円盤の黒体放射成分と輝線、これらに高電離と低電離な 2 種類の物質による全体吸収がかかったモデルを用いている。そして、部分吸収を試行したところカバリングファクタが 1 になったと述べられている。本研究で適用した VDPC モデルでも、部分吸収体として高電離と低電離な物質の二層を要した。すなわち、スペクトルの吸収構造が、実際のところ、全体吸収と部分吸収のどちらに起因するのかが、モデルの縮退を解く鍵と考えられる。

Steenbrugge et al. (2003) では、Chandra 衛星による分光観測から、電離吸収体による吸収線に約 -400 km s^{-1} の青方偏移を発見している。このように、NGC 4593 では円盤風 (アウトフロー) の存在が示唆されている。今回の解析結果では、冷たい反射に伴う鉄の蛍光輝線について $z \sim -0.001$ から -0.005 のエネルギーシフトが得られており、速度にして $V \sim -300$ から -1500 km s^{-1} となる。冷たい反射は降着円盤の遠方で起きることを想定しているが、このような青方偏移がある場合、動的な反射体として、例えば塊状のトーラス (clumpy torus, e.g. Nenkova et al. 2008) にアウトフローの影響が及んでいる可能性が考えられる。

1.8 型セイファート銀河 NGC 1365

5 天体の中で最も顕著なスペクトル変動を示す NGC 1365 は、相対論的反射モデルに基づいた解析から、カーブラックホールのスピンパラメータ $a \geq 0.95$ が得られている (Walton et al. 2014)。その後 Rivers et al. (2015) は、冪関数と相対論的反射成分と冷たい反射成分に加え、 $\sim 2 \text{ keV}$ 以下に散乱された冪関数、中性物質による部分吸収と全体吸収、高階電離した鉄の吸収線 4 本、2 つのプラズマ熱放射成分とこれに付随する輝線 5 本、さらに、現象論的に 0.68 keV に付加した幅広いガウシアン成分から構成されるモデル関数によって 0.3–70 keV のスペクトルを説明している。これに対し本研究では、同じスペクトルをより単純な構造の VDPC モデルによって説明することができた。なお、相対論的反射モデルの視点に立つ Rivers et al. (2015) でも、部分吸収体のカバリングファクタ変化によって NGC 1365 で観測される強度変化を解釈している。

狭輝線 1 型セイファート銀河 Swift J2127.4+5654

Marinucci et al. (2014a) は 0.5–80 keV のスペクトルに相対論的反射モデルを適用し、従来より言われていた中間的スピンパラメータ $a = 0.58$ を導いている。また、Sanfrutos et al. (2013) は 2010 年の XMM-Newton による観測で得られた 0.5–10 keV のスペクトルについて、広がった鉄輝線構造を相対論的に広がったものと解釈しながら、特徴的なスペクトル変動を、部分吸収体が視線をちょうど横断するようにして X 線源を隠した時のカバリングファクタ変化によって説明している。

1.9 型セイファート銀河 MCG-5-23-16

Reeves et al. (2007) は、主にすざく衛星による 2005 年の観測スペクトルを相対論的反射モデルで説明している。本研究の解析結果では、一様な電離物質による部分吸収を要し、そのカバリングファクタ変化は、比較的小さなガス塊としての部分吸収体がうごめいて分布しているとも、一様に分布するガスの密度が変化しているとも解釈できる (式 (1.5) を参照)。

5.1.2 RMS スペクトルの解釈

MCG-6-30-15, NGC 4593, NGC 1365 の RMS スペクトルでは、1 keV 付近での盛り上がりから 6 keV へ向けての落ち込みという典型的な構造が現れている (図 4.5)。NGC 1365 が特に顕著であるが、1 keV 以下で RMS が非常に小さい値をとっているのは、この帯域で円盤放射や母銀河のプラズマ放射といった時間変動しない連続成分が支配的なためと考えられる。一方で、Swift J2127.4+5654 と MCG-5-23-16 は全域的に平坦な構造であり、強度変動のエネルギー依存性が少ないことを示している。

5.1.3 ライトカーブの解釈

10 keV 以下のライトカーブは、カバリングファクタの大きさとほぼ逆相関している。つまり、カバリングファクタが大きければ吸収を強く受けるため、この帯域で強度は弱く観測される。このことは、例えば MCG-6-30-15 の obs#3 (表 4.6)、NGC 4593 の obs#1 (表 4.7)、NGC1365 の obs#3, #4 (表 4.8)、や Swift J2127.4+5654 の obs#3 (表 4.9) における特徴的な強度変化に着目して見ると明らかである。このとき、連続成分の強度 PL_{norm} はほぼ一定の大きさをとっている。

しかし、例えば MCG-6-30-15 の obs#1 (表 4.6) における時刻 70 から 110 キロ秒にかけて、カバリングファクタの値はあまり変化していないが、 PL_{norm} 値が 1.5 倍ほど上昇している。これに伴って、ライトカーブも上昇していることがわかる。また、Swift J2127.4+5654 の obs#1 (表 4.9) では PL_{norm} 値がおおよそ右肩上がりに変化し、最終的に約 2 倍の大きさになっており、ライトカーブにもその傾向が見られるが、カバリングファクタ変動には特に右下がりな傾向があるわけではない。このように、比較的大きく PL_{norm} が変化するとき、 ~ 10 keV 以下の強度変動に対するその寄与が大きくなり、カバリングファクタ変化のみでは説明しきれない変動成分として現れる。そして、比較的長い時間スケールで大きさが変化する PL_{norm} 値に対して、その上に乗ってより短い時間スケールで変化するカバリングファクタの変動が、ライトカーブの細かな構造に寄与していると言える。このことは、1H 0707-495 (Mizumoto et al. 2014) や IRAS 13224-3809 (Yamasaki et al. 2016) について、10 keV 以下の観測データにカバリングファクタのみが変化する VDPC モデルを適用した時に、低エネルギー側の変動は再現できるが、高エネルギー側ほど観測とモデルのずれが大きくなることを説明する。

5.1.4 VDPC モデルによる解釈の汎用性

これまで、セイファート銀河から放射される X 線スペクトルの複雑な形状および激しい時間変動を説明するために、複数のモデルが提唱されてきた。しかし、例えば相対論的反射モデルは、極限の角速度で回転しているカーブラックホールのごく近傍で反射が起こる必要があるなど非常に極端なパラメータを要し、一般的な描像としては考えにくい。一方で、より普遍的な環境を想定し、視線上で部分吸収体がランダムに存在しているという VDPC モデルを適用すれば、複数のセイファート銀河に対する 0.2–78 keV という広帯域に渡る観測データが統一的に解釈される。VDPC モデルの考え方は、AGN における中心ブラックホール周辺のジオメトリとして汎用的なものと考えられる。実際、連続成分の強度変化と部分吸収体のカバリングファクタ変化によってスペクトル変動が説明されるという同様の結論は、1 型セイファート銀河 NGC 5548 の XMM-Newton による観測 (Cappi et al. 2016) や、明るい近傍クエーサー PDS 456 のすざく衛星による観測 (Matzeu et al. 2017) からも得られている。

5.2 部分吸収が起きていることの検証に向けて

5.2.1 仮想 AGN スペクトルのモデルフィッティング

VDPC モデルは、複数のセイファート銀河が示す X 線スペクトル変動を広帯域に渡って説明することができる。それでは、他の様々なモデルが提唱されている中で、VDPC モデルが尤もらしいということスペクトルから判別することは可能であろうか。これを検証するために、仮想的な AGN スペクトルを VDPC モデルに基づいて創出し、他のモデルと比較することを試みた。対象とするモデルは、1.4.1 節で述べた相対論的反射モデル (e.g. Miniutti et al. 2007) と、1.4.3 節で述べた複数の冪型連続成分を想定する Noda et al. (2014) のモデル (以降では Multi-PL モデルと表記する) の 2 つとした。

まず、仮想 AGN スペクトルを次の VDPC モデル関数に基づいて作成した (図 5.2)。

$$F = A_{\text{ISM}}[P(1 - \alpha + \alpha W_1)(1 - \alpha + \alpha W_2) + R_{\text{Fe}} + B] \quad (5.1)$$

そのパラメータを表 5.1 で示す。NGC 1365 と同程度に電離した部分吸収体と、MCG-6-30-15 並みの明るさを想定している。なお、赤方偏移は $z = 0$ と仮定した。

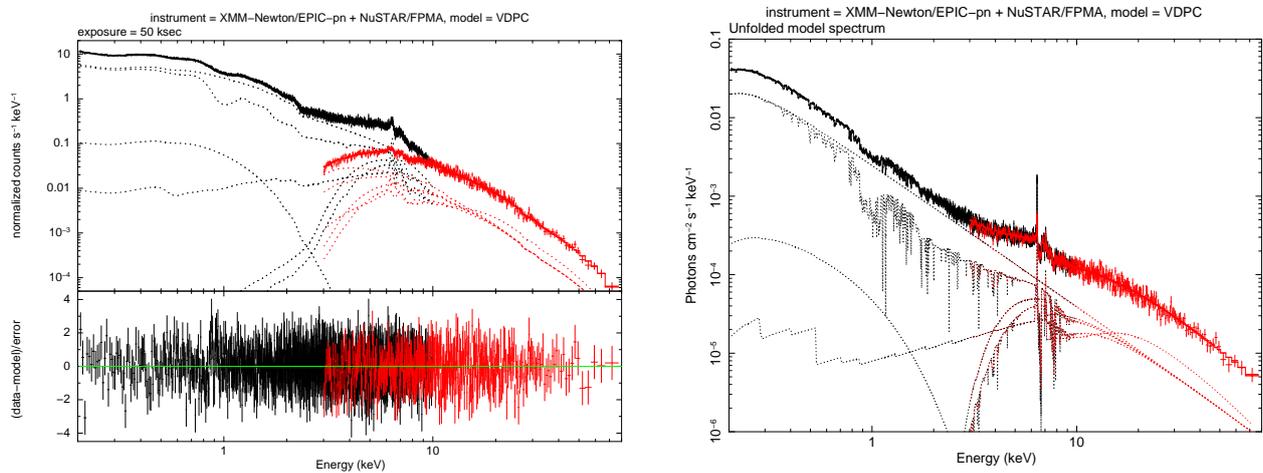


図 5.2: 左: VDPC モデルから創出した仮想 AGN スペクトル。横軸がエネルギーで、縦軸は上段にカウントレート (実線で仮想 AGN データ、点線でモデルの各成分)、下段にデータとモデルの残差をプロットしている。右: モデル (点線) を光子空間でプロットしたもの。

表 5.1: 仮想 AGN の VDPC モデルパラメータ

A_{ISM}	P	W_1	W_2	R_{Fe}	B
N_{H}^\dagger	Γ	N_{H}^\dagger	N_{H}^\dagger		$T_{\text{in}} [\text{keV}]$
	$E_{\text{cut}} [\text{keV}]$	$\log \xi$	$\log \xi$		
	norm [‡]	α		norm [‡]	norm [‡]
0.01×10^{22}	1.8	5.0×10^{23}	1.0×10^{24}		0.3
	500	0.1	3.0		
	0.01	0.5		0.004	1.0

[†] $N_{\text{H}} [10^{22} \text{ cm}^{-2}]$

[‡] norm [10^{-3} photons/keV/cm²/s]

今回の解析で使用した観測データと同様に、この仮想 AGN を XMM-Newton/EPIC-pn と NuSTAR/FPMA で観測した場合を考える。つまり、XSPEC の fakeit を使用して入力したモデル関数に対し、両観測装置の応答関数を畳み込んでスペクトルを出力した。応答関数は、シミュレーションツールとして公開されているファイル^{*1}を使用した。ここでは露光時間を 50 キロ秒とし、その時間平均スペクトルについて考える。

相対論的反射モデルによるフィッティング

フィッティングに使用したモデル関数は次である。

$$F = A_{\text{ISM}}[R_{\text{rel}} + R_{\text{rel}} + P * W + B + I_{\text{Fe}} + G] \quad (5.2)$$

R_{rel} は相対論的反射成分であり、電離度の異なる 2 種類を導入した (e.g. Kara et al. 2015)。冪関数 P には電離物質 W による全体吸収がかかっており、他の成分は、円盤黒体放射 B と鉄の蛍光輝線 I_{Fe} および吸収線 G である。仮想 AGN スペクトルに対するフィッティング結果を表 5.2 と図 5.3 で示す。

^{*1} XMM-Newton/EPIC-pn: <http://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/epic-response-files>
 NuSTAR/FPMA: http://www.nustar.caltech.edu/system/media_files/binaries/32/original/nustar_point_sources_for_proposers.tgz

表 5.2: 仮想 AGN に対する相対論的反射モデルのフィッティングパラメータ

A_{ISM}	R_{rel}^*	R_{rel}^*	P	W	B	I_{Fe}	G
N_{H}^\dagger	q	q	Γ	N_{H}^\dagger	T_{in}	$E_{\text{line}} [\text{keV}]$	$\text{Re-}\chi^2$
	ξ	ξ	$E_{\text{cut}} [\text{keV}]$	$\log \xi$		(σ_{line})	(d.o.f)
	norm \ddagger^2	norm \ddagger^2	norm \ddagger^1	α	norm $[10^3]$	norm \ddagger^1	
	Fe/solar						
$0.053^{+0.0002}_{-0.0003}$	$2.62^{+0.18}_{-0.07}$		1.60	$45.6^{+0.6}_{-0.9}$	0.045	6.36 (0.001), 0.028	1.12
	$59.4^{+4.1}_{-1.5}$	1690^{+29}_{-47}	200	$3.125^{+0.003}_{-0.006}$		6.97 (0.001), 0.006	(1587)
	$2.70^{+0.06}_{-0.15}$	$0.0194^{+0.0005}_{-0.0002}$	$4.64^{+0.03}_{-0.06}$	1.0	1970	1.77 (1.55), -0.62	
	$0.40^{+0.03}_{-0.06}$					1.56 (0.0001), -0.014	
						1.00 (0.03), -0.06	

誤差は 90% 信頼区間で、誤差を表記していないものは固定値である。

* q は放射係数 ($\epsilon = r^{-q}$)、 ξ は反射体の電離パラメータ、Fe/solar は鉄の組成比である。この他に円盤内縁および外縁の半径は $R_{\text{in}} = 1.235 r_g$, $R_{\text{out}} = 400 r_g$ 、円盤傾斜角 $i = 50^\circ$ に固定している。

$\dagger N_{\text{H}} [10^{22} \text{ cm}^{-2}]$

$\ddagger^1 \text{ norm } [10^{-3} \text{ photons/keV/cm}^2/\text{s}]$

$\ddagger^2 \text{ norm } [10^{-6} \text{ photons/keV/cm}^2/\text{s}]$

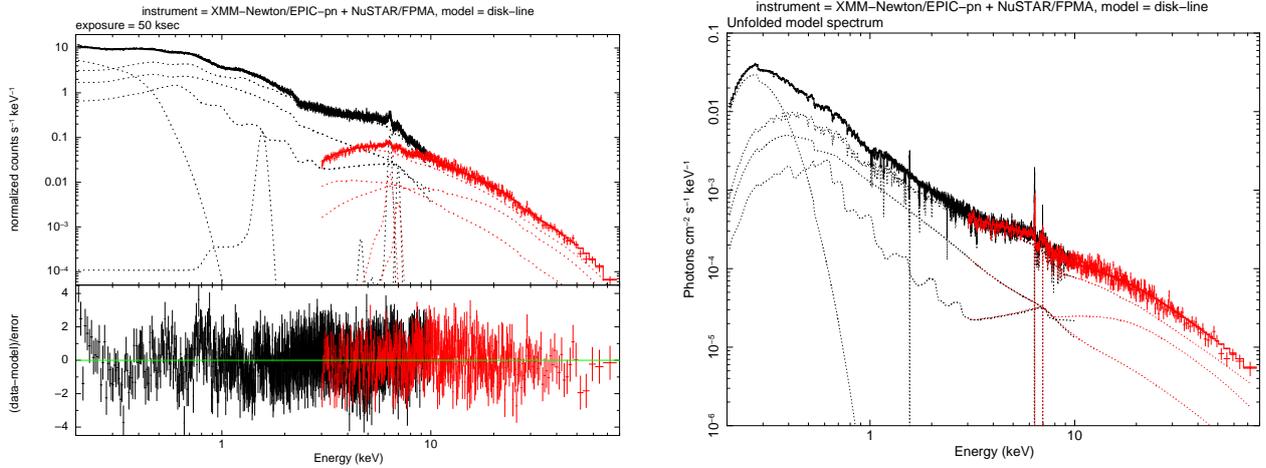


図 5.3: 左: 仮想 AGN に対する相対論的反射モデルのフィッティング結果。横軸がエネルギーで、縦軸は上段にカウントレート (実線で仮想 AGN データ、点線でモデルの各成分)、下段にデータとモデルの残差をプロットしている。右: モデル (点線) を光子空間でプロットしたもの。

Multi-PL モデルによるフィッティング

フィッティングに使用したモデル関数は次である。

$$F = A_{\text{ISM}}[P_0(1 - \alpha_0 + \alpha_0 W) + R_{I_{\text{Fe}}} + P_1(1 - \alpha_1 + \alpha_1 A) + G] \quad (5.3)$$

P_0 は冪関数主成分であり、電離吸収体 W による吸収を受ける。表記上は部分吸収であるが、Noda et al. (2014) の NGC 3227 に対する結果はカバリングファクタ $\alpha_0 = 1$ となっている。 P_1 はハードな冪関数

で、中性の吸収体 A による部分吸収 (カバリングファクタ a_1) を受ける。仮想 AGN スペクトルに対するフィッティング結果を表 5.3 と図 5.4 で示す。

表 5.3: 仮想 AGN に対する Multi-PL モデルのフィッティングパラメータ

A_{ISM}	P_0	W	R_{Fe}	P_1	A	G	
N_{H}^{\dagger}	Γ	N_{H}^{\dagger}		Γ	N_{H}^{\dagger}	E_{line} [keV]	$\text{Re-}\chi^2$
	E_{cut} [keV]	$\log \xi$		E_{cut} [keV]		(σ_{line})	(d.o.f)
	norm ‡	α_0	norm ‡	norm ‡	α_1	norm ‡	
$0.011^{+0.001}_{-0.001}$	$1.86^{+0.01}_{-0.01}$	$33.6^{+2.6}_{-2.3}$		$1.55^{+0.07}_{-0.06}$	$50.8^{+5.1}_{-4.6}$	1.00 (0.02), -0.03	1.04
	200	$3.28^{+0.01}_{-0.03}$		200		1.53 (0.0001), 0.02	(1576)
	$5.10^{+0.07}_{-0.07}$	1.00	5.10	$3.05^{+0.63}_{-0.47}$	$1.00^{+0.00}_{-0.06}$		

誤差は 90% 信頼区間で、誤差を表記していないものは固定値である。

$^{\dagger} N_{\text{H}}$ [10^{22} cm^{-2}]

‡ norm [$10^{-3} \text{ photons/keV/cm}^2/\text{s}$]

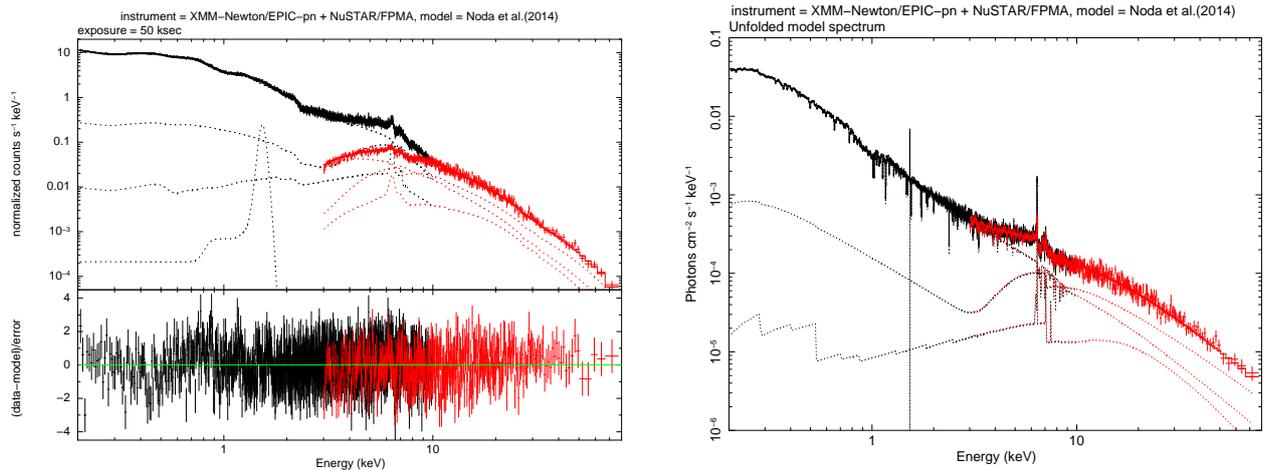


図 5.4: 左: 仮想 AGN に対する Multi-PL モデルのフィッティング結果。横軸がエネルギーで、縦軸は上段にカウントレート (実線で仮想 AGN データ、点線でモデルの各成分)、下段にデータとモデルの残差をプロットしている。右: モデル (点線) を光子空間でプロットしたもの。

各モデルフィッティングの結果

VDPC モデルと相対論的反射モデルおよび Multi-PL モデルは、図 5.2, 5.3, 5.4 のそれぞれ右図で示したように、光子空間では異なるモデルである。しかし、装置の応答関数を通すと、相対論的反射モデルと Multi-PL モデルは、VDPC モデルから創出した同じスペクトルをそれぞれ説明できてしまう。すなわち、現在の観測装置の性能では、同じ観測スペクトルに異なるモデルが縮退し、その判別は困難である。

X線マイクロカロリメータ

次に、高エネルギー分解能を実現する次世代観測装置で同じ仮想 AGN を観測した場合を考える。その観測装置の代表的なものが、X線マイクロカロリメータである。X線の精密分光観測には XMM-Newton/RGS のような回折格子と CCD カメラの組み合わせが用いられてきたが、観測できるのは明るい点源の低エネルギー側 (<2.5 eV) に限られ、空間的に広がった天体に対しては感度を持たなかった。一方で X線マイクロカロリメータは、X線光子の検出原理が全く異なり、入射した X線光子が吸収体に吸収されたときの温度上昇からエネルギーを測定する。そのため、天体の明るさや空間的広がりによらず、より広いエネルギー帯域で回折格子と同等以上の高エネルギー分解能を実現する。測定する温度変化は非常に小さいため、検出器の動作環境を絶対零度近くに下げ、雑音を極限まで小さくする必要がある。

現状として衛星に搭載された例は少なく、すざく衛星搭載の XRS (2.3 節) と、ひとみ衛星搭載の SXS (soft X-ray spectrometer) だけである。しかし、XRS は衛星の打ち上げ直後に起こった液体ヘリウムの損失事故で科学観測をするに至らず、SXS は衛星自体の姿勢異常に伴った事故により、AGN の観測をする前に観測不能となった。ただし、SXS はペルセウス座銀河団や「かに星雲」の観測に成功しており、軌道上でその性能を実証済みである (Hitomi Collaboration 2016)。今後は、欧州を中心に開発が検討されている大口径望遠鏡を有した X線天文衛星 Athena^{*2}や、米国が構想している X-ray Surveyor (Lynx) 計画^{*3}でも X線マイクロカロリメータの搭載が予定されている。表 5.4 で、ひとみ衛星の SXS と Athena 搭載予定の X-IFU (X-ray Integral Field Unit) について性能をまとめ、比較のために、すざく衛星の CCD 検出器 XIS についても記載する。鉄の蛍光輝線がある 6–7 keV に対して、X線マイクロカロリメータのエネルギー分解能は CCD 検出器に比べ 1 桁も向上する。

表 5.4: Hitomi/SXS と Athena/X-IFU の性能

観測装置	Hitomi/SXS † 達成値	Athena/X-IFU ‡ 要求値	Suzaku/XIS (BI) (参考: 表 2.5)
エネルギー分解能	4.97 eV	2.5 eV @ <7 eV	~130 eV @ 6 keV
エネルギー帯域	2–30 keV	0.2–12 keV	0.2–12 keV
視野	2.9' × 2.9'	5' diameter	17.8' × 17.8'
角度分解能	1.2'	–	2'
有効面積	160 cm ² @ 6 keV	1600 cm ² @ 7 keV	160 cm ² @ 8 keV
カウントレート	155 s ⁻¹	1 mCrab	

† 第 17 回宇宙科学シンポジウム P-005 「ひとみ」搭載軟 X線帯観測装置の軌道上性能

‡ <http://x-ifu.irap.omp.eu/the-x-ifu-in-a-nutshell/>

*2 2020 年代の打ち上げが承認されている。 <http://www.the-athena-x-ray-observatory.eu/>

*3 計画段階であり、まだ認められていない。 <http://wwwastro.msfc.nasa.gov/lynx/>

X線マイクロカロリメータによって見えてくる構造

図 5.5 で、SXS の応答関数^{*4}を畳み込んで出力した仮想 AGN スペクトルに、先の XMM-Newton と NuSTAR によるスペクトルフィッティングで求めた相対論的反射モデルおよび Multi-PL モデルの線を重ねてプロットした。つまり、ここで見られるモデルとの残差が、従来の観測装置では判別できなかった

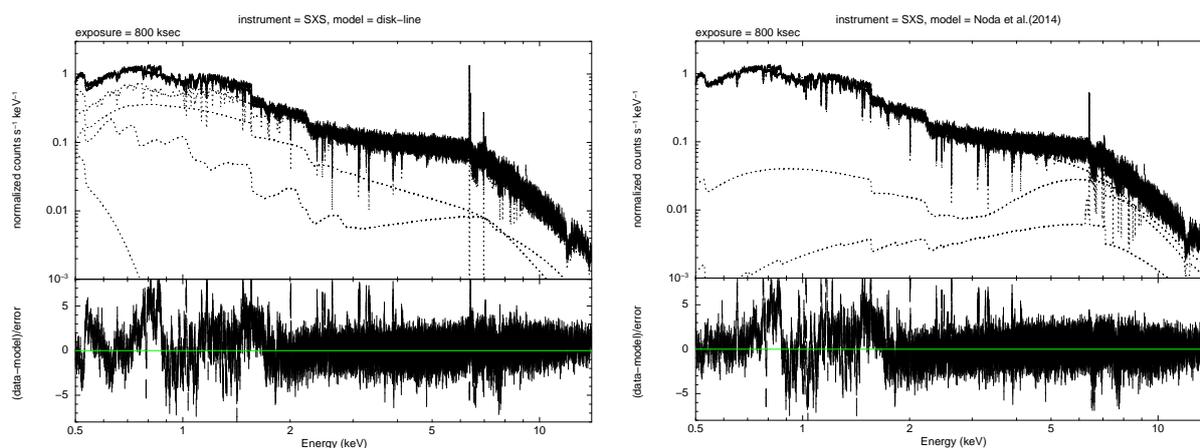


図 5.5: 上段では、仮想 AGN を X 線マイクロカロリメータ SXS で観測した場合のスペクトルに、XMM-Newton/EPIC-pn と NuSTAR/FPMA から求めた、左：相対論的反射モデル (図 5.3) と、右：Multi-PL モデル (図 5.4) を重ねてプロットしている。それぞれ下段でデータとモデルの残差を表す。

VDPC モデルと他のモデルとの違いである。露光時間 300 キロ秒以上で、このような残差が顕著であった。ここで見られる残差は主に、VDPC モデルで考える電離吸収体としての様々な元素のイオンが作り出す吸収線の構造を、他のモデルでは想定していないことに起因する。したがって、この残差に基づき、VDPC モデルと他のモデルとの違いはわかる。ただし、相対論的反射モデルや Multi-PL モデルの根本部分をそのままに新たな吸収や輝線の成分を追加すれば、スペクトルを説明することができる。すなわち、モデルフィッティングという手法のみで、モデルの正誤を判別することはできない。

^{*4} <http://astro-h.isas.jaxa.jp/researchers/sim/>

軌道上での達成値に基づき、エネルギー分解能 5 eV のファイルを使用し、エネルギー帯域を 0.5–15 keV とした。

5.2.2 RMS スペクトルで見るカバリングファクタ変動

VDPC モデルの特徴は、カバリングファクタの変化によって 10 keV 以下の主な時間変動を説明することである。そこで、次に、モデルを仮定することなくカバリングファクタの変動を観測することができるかどうか検証する。

仮想 AGN について、 α と PLnorm の値を 500 秒毎に変化させ^{*5}、典型的な 1 観測の時間として 130 キロ秒に渡る仮想のライトカーブを創出した (図 5.6)。この強度変動に基づき、RMS スペクトルを作成して、従来の観測装置と将来の X 線マイクロカロリメータを比較する。XMM-Newton/EPIC-pn と Hitomi/SXS および Athena/X-IFU による観測の時間ビン 10 キロ秒とした RMS スペクトルを図 5.7 で示す。X 線マイクロカロリメータの高いエネルギー分解能によって、鉄やニッケルのヘリウム様イオンによる微細構造をもった吸収線 (~ 6.6 keV と ~ 7.7 keV) のエネルギービンで特に RMS 値が増大していることがわかる。観測スペクトルで吸収線が存在していても、もしそれが時間的に不変な成分であれ

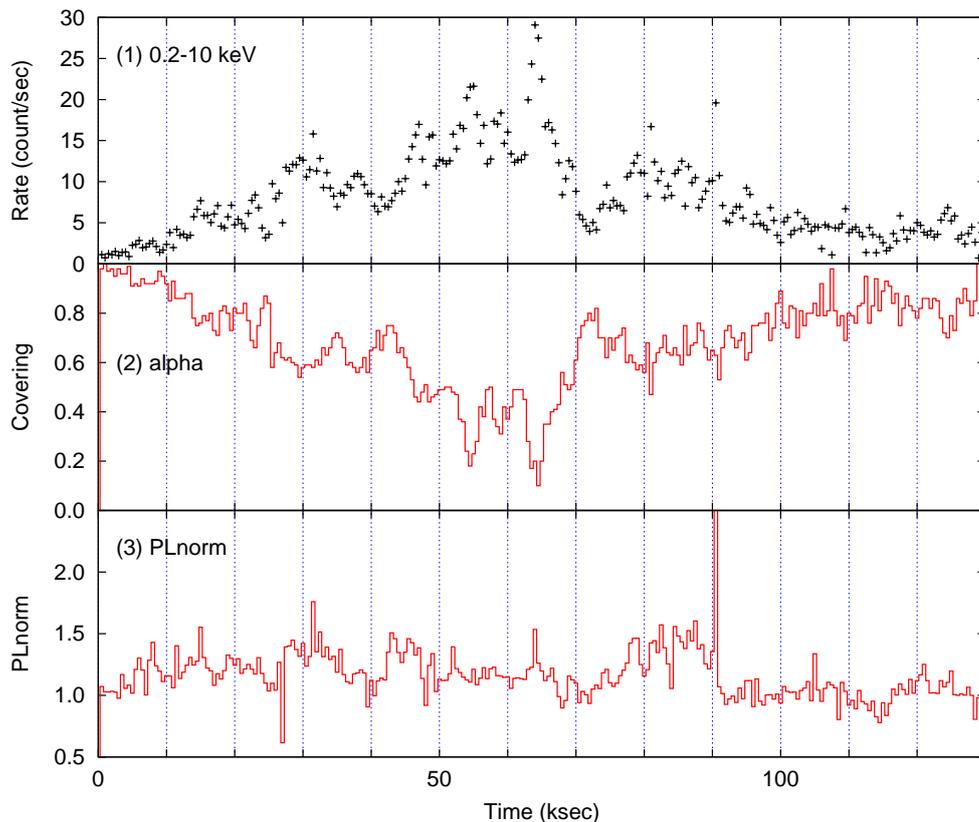


図 5.6: 仮想 AGN を XMM-Newton/EPIC-pn で観測した場合の 0.2–10 keV に対する (1) 仮想ライトカーブ。ここで、(2) カバリングファクタ α と (3) PLnorm の相対値を 500 秒毎に変化させている。

^{*5} α は NGC 1365 のデータ、PLnorm は Swift J2127.4+5654 のデータを参考にした。

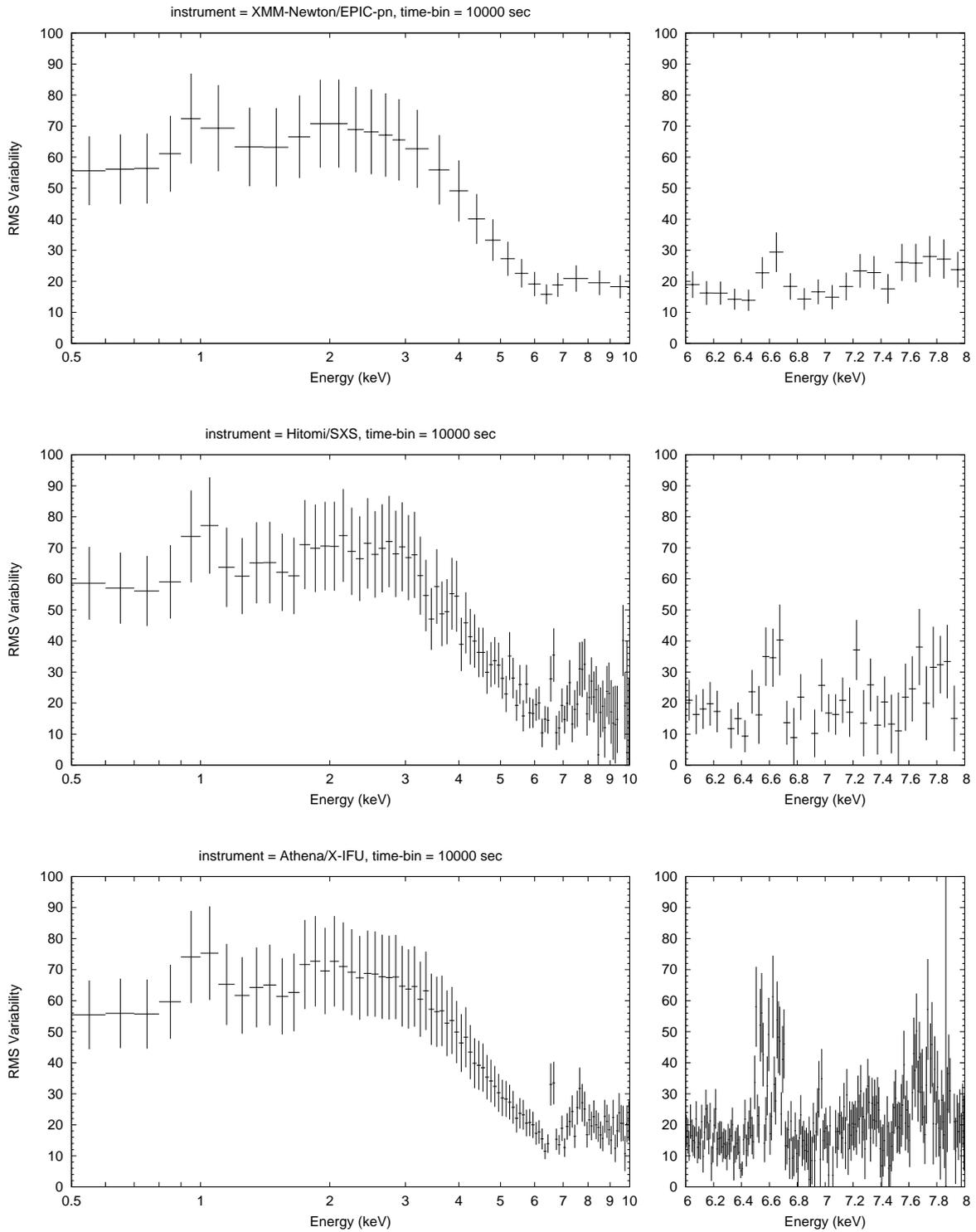


図 5.7: 仮想 AGN の強度変動を XMM-Newton/EPIC-pn (上) と Hitomi/SXS (中) および Athena/X-IFU (下) で観測した場合の、時間ビン 10 キロ秒とした RMS スペクトル。左は 0.5–10 keV で、右は 6–8 keV をより細かいエネルギービン (上: 100 eV、中: 50 eV、下: 10 eV) でプロットしたもの。

ば、RMS スペクトルは平坦な構造となる。つまり、実際に電離吸収体のカバリングファクタが顕著な変動をしていれば、100 キロ秒程度の観測から、RMS スペクトルによって直接その変動を検出することができる。

しかし、この吸収線変動は、今回仮定したように部分吸収体のカバリングファクタが変化しているとも、全体吸収の光学的厚み $\tau(\xi, N_H) = \sigma(\xi)N_H$ が変化しているとも解釈することができる。両者の変化が RMS 値に与える影響は数学的に同等であり、RMS スペクトルから両者を判別することはできない (Mizumoto & Ebisawa 2016)。よって、X 線マイクロカロリメータを用いて細かいエネルギーピンで描画した RMS スペクトルからは、吸収線変動がカバリングファクタ変化に起因するものかどうか判別できないため、VDPC モデルと他のモデルを区別するまでには至らない。

5.2.3 二重吸収線とカバリングファクタ

VDPC モデルで考えるカバリングファクタ変動の存在を明らかにするためには、直接カバリングファクタの値を求めるという手段が最も有効である。すでに紫外線帯域の分光観測では、二重縮退による微細構造をもつ吸収線 (doublet) の強度比からカバリングファクタを算出する手法がよく用いられている。これを X 線でも応用し、観測データから直接カバリングファクタを求めることを考える。

X 線マイクロカロリメータによって AGN から観測されうる二重吸収線としては、鉄の水素様イオン Fe XXVI による Fe Ly α_1 (6.97316 keV) と Fe Ly α_2 (6.95197 keV) がある。ここで、ある原子の水素様イオンからの束縛-束縛 (bound-bound) 放射のうち、電子エネルギー準位の状態遷移 $n = 2 \rightarrow 1$ に伴う放射が Ly α 線である。このとき選択則によって準位 $n = 1$ の 1s 軌道 (L=0, S=1/2, J=1/2)^{*6} と $n = 2$ の 2p 軌道 (L=1, S=1/2, J=1/2, 3/2) 間で遷移がおこり、Ly α_1 と Ly α_2 は、それぞれ $2p \ ^2P_{3/2} \rightarrow 1s \ ^2S_{1/2}$ と $2p \ ^2P_{1/2} \rightarrow 1s \ ^2S_{1/2}$ に対応する。

高電離な吸収物質を有した AGN からの X 線放射で、鉄の他に観測されうる水素様イオンの Ly α 放射として、カルシウム Ca XX (4.10750 keV と 4.10014 keV) や、硫黄 S XVI (2.6227 keV と 2.6197 keV) も考えられる。ただし、X 線マイクロカロリメータのエネルギー分解能がエネルギーに依らず一定であるのに対し、放射エネルギーが小さいほど二重縮退線のエネルギー差は小さくなる。SXS のエネルギー分解能が 5 eV であり、鉄、カルシウムおよび硫黄の二重縮退線のエネルギー差は順に 21 eV, 6 eV, 3 eV となっていることから、線輪郭の分解しやすい鉄の二重縮退線を解析に用いるのが妥当である。

ここから、カバリングファクタの算出方法について Barlow & Sargent (1997) と Hamann et al. (1997) を参考にして述べる。まず、光学的深さ τ の吸収物質を通過した連続放射成分 I_0 が受ける吸収量は $I_0 e^{-\tau}$ であるから、吸収線の深さは $I_0(1 - e^{-\tau})$ である。そして、これが部分吸収である場合、カバリングファクタ C_f として吸収線の深さは $C_f I_0(1 - e^{-\tau})$ となる。連続成分の強度を $I_0 = 1$ に規格化したとき、連

^{*6} L: 軌道角運動量, S: スピン角運動量, J: 全角運動量

続成分から吸収線の深さを除いた強度 R (residual intensity) は次のように表せる。

$$\begin{aligned} R(\lambda) &= 1 - C_f(1 - e^{-\tau(\lambda)}) \\ &= C_f e^{-\tau(\lambda)} + (1 - C_f) \end{aligned} \quad (5.4)$$

また、光学的深さについて $\tau(\lambda) \propto f\lambda$ の関係が成り立つことが知られている。ここで f は振動子強度であり、Ly α では α_1 と α_2 に対する f の比が

$$\frac{f(1s \ ^2S_{1/2} \rightarrow 2p \ ^2P_{3/2})}{f(1s \ ^2S_{1/2} \rightarrow 2p \ ^2P_{1/2})} \equiv \frac{f_{\alpha_1}}{f_{\alpha_2}} = 2$$

となっている。つまり、 $\lambda_{\alpha_1} \approx \lambda_{\alpha_2}$ とすれば $\tau_{\alpha_1}/\tau_{\alpha_2} = f_{\alpha_1}\lambda_{\alpha_1}/f_{\alpha_2}\lambda_{\alpha_2} = 2$ である。よって、式 5.4 から次が成り立つ。

$$\frac{\tau_{\alpha_1}}{\tau_{\alpha_2}} = \ln\left(\frac{R_{\alpha_1} - 1 + C_f}{C_f}\right) / \ln\left(\frac{R_{\alpha_2} - 1 + C_f}{C_f}\right) = 2 \quad (5.5)$$

これを解くと、次のようにして観測スペクトルの R からカバリングファクタの値を求めることができる。

$$C_f = \begin{cases} \frac{R_{\alpha_2}^2 - 2R_{\alpha_2} + 1}{R_{\alpha_1} - 2R_{\alpha_2} + 1} & (R_{\alpha_2} > R_{\alpha_1} \geq R_{\alpha_2}^2) \\ 1 - R_{\alpha_2} & (R_{\alpha_2} \leq R_{\alpha_1}) \\ 1 & (R_{\alpha_1} < R_{\alpha_2}^2) \end{cases} \quad (5.6)$$

実際に時系列の観測スペクトルから電離吸収体に対するカバリングファクタが変化していることを確認できれば、VDPC モデルは尤もらしい考え方であるということが言える。そこで、Hitomi/SXS あるいは Athena/X-IFU の応答関数を仮定し、先の解析で使用した仮想 AGN (表 5.1) のカバリングファクタ

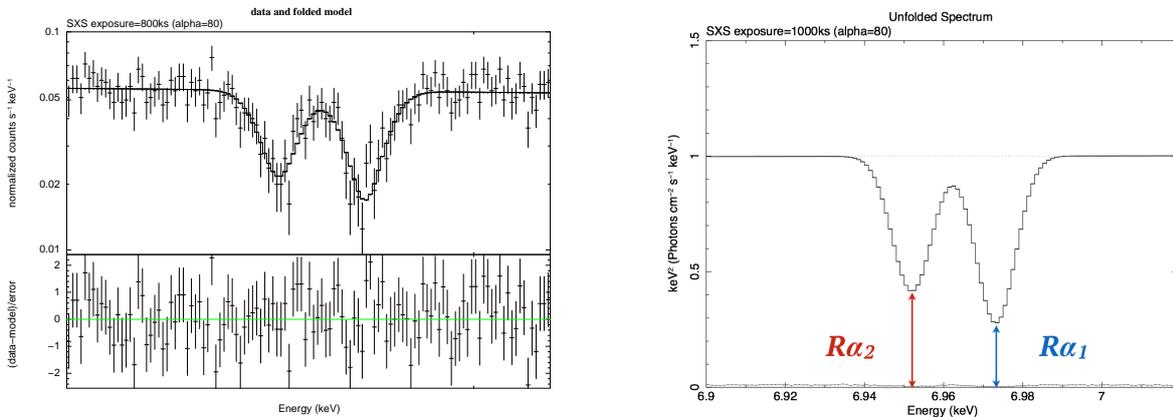


図 5.8: 左: カバリングファクタ $\alpha = 0.8$ の時に SXS の露光時間 800 キロ秒で観測される Fe Ly α 二重吸収線。実線は二本のガウシアンによるフィッティング結果。横軸のエネルギーは 6.90–7.02 keV の帯域で、上段の縦軸はカウントレート、下段はモデルとの残差を示す。右: 連続成分をフラックス強度 $\epsilon F(\epsilon) = 1$ で規格化した時の各吸収線の極小値にあたる強度 R から、カバリングファクタを算出する。

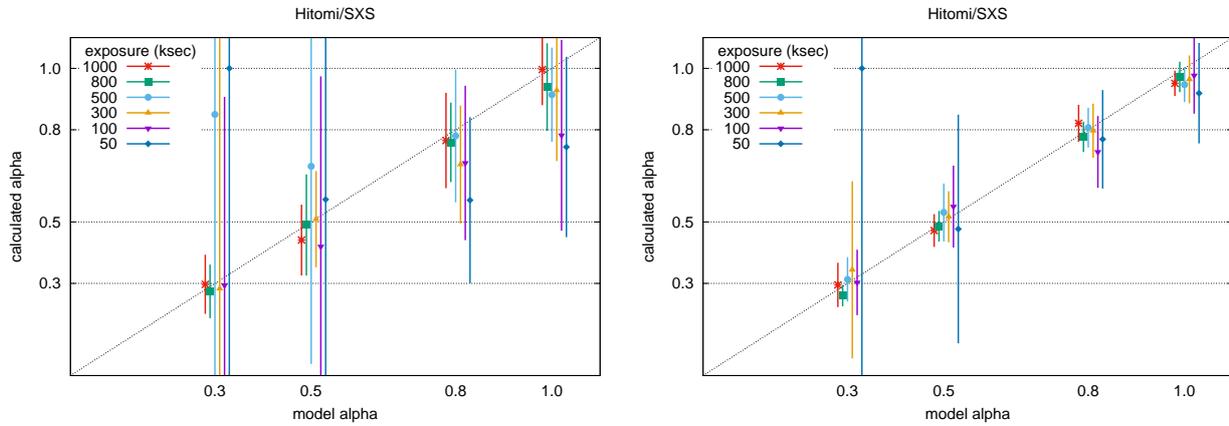


図 5.9: SXS(左) と X-IFU(右) による仮想 AGN(表 5.1) の観測で、露光時間 exposure [ksec] = 1000 (赤), 800 (緑), 500 (シアン), 300 (黄), 100 (紫), 50 (深緑) を仮定したときに計算されるカバリングファクタの値。横軸で示すモデルスペクトル作成時の入力値 [%] に対し、式 (5.6) による算出値を縦軸にとってプロットしている。誤差棒は、吸収線のガウシアンフィッティングにおける R 値の誤差 (90% 信頼区間) によるもの。

が $\alpha = 0.3, 0.5, 0.8, 1.0$ となる各場合のスペクトルを用いて、どの時間スケールまで検出可能であるのか見積もった。このとき、観測の露光時間は 1 メガ、800 キロ、500 キロ、300 キロ、100 キロ、50 キロ秒の 6 通りを仮定した。観測される Fe Ly α 二重吸収線は、二本のガウシアンでフィットし、連続成分をフラックス強度 1 で規格化した時の各吸収線の極小値にあたる強度 R から、式 (5.6) によってカバリングファクタを算出した (図 5.8)。

図 5.9 で、それぞれの露光時間に対して計算されるカバリングファクタの値を示す。SXS では、800 キロ秒以上の観測ならばほぼ確実に、データから誤差の範囲で正しいカバリングファクタ値を求められるということが期待できる。ただし、800 キロ秒以上の時間平均スペクトルは、VDPC モデルで考えるカバリングファクタ変動の時間スケール (数時間) を大幅に上回っているため、SXS の場合には少なくとも「部分吸収が起きているかどうか」の判別にとどまる。一方 Athena/X-IFU は、SXS よりも有効面積が大きい (表 5.4) ため、より短い露光時間でも二重吸収線を分解することができ、100 キロ秒以上あればカバリングファクタが 0.3 から 1 までの各値について、正しく算出することができる。したがって、部分吸収が起きている場合には、数日の時間スケールでカバリングファクタ変動を調べることが可能である。

さらに高電離な吸収体を有する場合、着目している二重吸収線の構造がより強く現れるため、短い時間スケールでも検出されやすくなるはずである。今回の仮想 AGN で仮定したよりも電離パラメータを一桁大きくして、表 5.1 で示す仮想 AGN の電離パラメータ W_2 を $\log \xi = 4.0$ とした「高電離仮想 AGN」についても同じ見積もりを行った。その結果を図 5.10 で示す。 $\alpha \geq 0.5$ の吸収を受けていれば、SXS でも 300 キロ秒程度の時間スケールで変動を検出できる。また、Athena/X-IFU ならば 50 キロ秒の時間スケールでも変動を検出することができ、露光時間が長いほどより精度良くカバリングファクタが算出できる。これによって、VDPC モデルのようにスペクトル変動をカバリングファクタの変化によって説明するモデルと、他のモデルとを明確に判別することが可能となる。

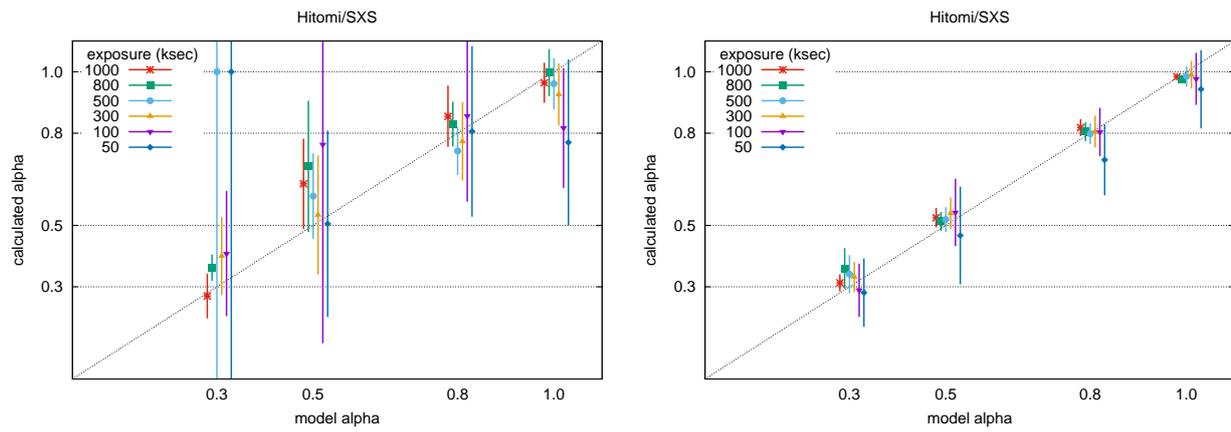


図 5.10: SXS(左) と X-IFU(右) による、より高電離な部分吸収体をもつ仮想 AGN (表 5.1 で W_2 の $\log \xi = 4.0$) の観測で、それぞれの露光時間に対して計算されるカバリングファクタの値。グラフ軸と凡例および誤差の付け方については、図 5.9 に同じ。

第6章

結論

本研究では、X線天文衛星 NuSTAR と、XMM-Newton または「すざく」衛星との同時観測によるアーカイブデータを活用して、セイファート銀河が示す 0.2–78 keV に渡る広帯域 X 線スペクトル変動に VDPC モデルを適用し、その適合性を検証した。得られた結論を以下にまとめる。

1. MCG-6–30–15, NGC 4593, NGC 1365, Swift J2127.4+5654 と MCG-5–23–16 の 5 天体 (16 観測) のエネルギースペクトルは、天体ごとに多少の違いがあるものの、VDPC モデルに基づく同じ関数型でフィットすることができた。
2. 観測される激しい時間変動は、主に 10 keV 以下で顕著なカバリングファクタの変化と、25 keV 以上で直接観測される冪型連続成分の強度変化という二つのパラメータの独立な変化で説明できることを明らかにした。これにより、スペクトル変動、ライトカーブ、変動率のエネルギー依存性 (RMS スペクトル) のいずれも、VDPC モデルによって観測データが再現された。
3. 複数のセイファート銀河に対して統一的に VDPC モデルの解釈が適用されたことは、AGN の中心ブラックホール周辺の物理構造として、同モデルの考え方が汎用的なものであることを示唆する。
4. VDPC モデルに基づく仮想的な AGN について、様々な観測装置の応答関数を用いて観測シミュレーションを行い、VDPC モデルと他のモデルを区別することができるか調査した。その結果、現在の観測装置の性能で、VDPC モデルとは異なるモデルを判別することはほぼ不可能であることがわかった。
5. 将来、X 線マイクロカロリメータの高いエネルギー分解能を以てすれば、電離吸収体による Fe Ly α の 21 eV だけ離れた二重吸収線の縮退を解くことができる。これが観測されると、その吸収線の深さから直接カバリングファクタの値が求まる。この手法を用いれば、「ひとみ」衛星搭載 SXS と同等の性能で、モデルを仮定することなく部分吸収が起きているかどうかを調べることができる。さらに、より大口径の Athena 衛星ならば、そのカバリングファクタが変化しているかどうかも明らかになる。すなわち、カバリングファクタの変化で主なスペクトル変動を説明する VDPC モデルと、他のモデルとを判別することが可能となる。

参考文献

- Antonucci, R. 1993, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 31, 473
- Barlow, T. A. & Sargent, W. L. W. 1997, *Astronomical Journal*, 113, 136
- Cappi, M., De Marco, B., Ponti, G., et al. 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 592, A27
- den Herder, J. W., Brinkman, A. C., Kahn, S. M., et al. 2001, *Astronomy & Astrophysics*, 365, L7
- Dotani, T. & Suzaku Team. 2008, in *The Eleventh Marcel Grossmann Meeting On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation and Relativistic Field Theories*, ed. H. Kleinert, R. T. Jantzen, & R. Ruffini, 1048–1050
- Edelson, R., Turner, T. J., Pounds, K., et al. 2002, *Astrophysical Journal*, 568, 610
- Fabian, A. C., Iwasawa, K., Reynolds, C. S., & Young, A. J. 2000, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 112, 1145
- Fabian, A. C. & Ross, R. R. 2010, *Space Science Reviews*, 157, 167
- Fabian, A. C., Zoghbi, A., Ross, R. R., et al. 2009, *Nature*, 459, 540
- Gallo, L. C., Wilkins, D. R., Bonson, K., et al. 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446, 633
- Hamann, F., Barlow, T. A., Junkkarinen, V., & Burbidge, E. M. 1997, *Astrophysical Journal*, 478, 80
- Harrison, F. A., Craig, W. W., Christensen, F. E., et al. 2013, *The Astrophysical Journal*, 770, 103
- Hitomi Collaboration. 2016, *Nature*, 535, 117
- Iso, N., Ebisawa, K., Sameshima, H., et al. 2016, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 68
- Jansen, F., Lumb, D., Altieri, B., et al. 2001, *Astronomy & Astrophysics*, 365, L1
- Kara, E., Fabian, A. C., Lohfink, A. M., et al. 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449, 234
- Koyama, K., Tsunemi, H., Dotani, T., et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, 23
- Madsen, K. K., Harrison, F. A., Markwardt, C. B., et al. 2015, *Astrophysical Journal Supplement*, 220, 8
- Magdziarz, P. & Zdziarski, A. A. 1995, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 273, 837
- Marinucci, A., Matt, G., Kara, E., et al. 2014a, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440, 2347

- Marinucci, A., Matt, G., Miniutti, G., et al. 2014b, *Astrophysical Journal*, 787, 83
- Matsumoto, C., Inoue, H., Fabian, A. C., & Iwasawa, K. 2003, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 55, 615
- Matzeu, G. A., Reeves, J. N., Nardini, E., et al. 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465, 2804
- Mehdipour, M., Branduardi-Raymont, G., & Page, M. J. 2010, *Astronomy & Astrophysics*, 514, A100
- Miniutti, G. & Fabian, A. C. 2004, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 349, 1435
- Miniutti, G., Fabian, A. C., Anabuki, N., et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, S315
- Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, 1
- Miyakawa, T., Ebisawa, K., & Inoue, H. 2012, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 64
- Mizumoto, M. & Ebisawa, K. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*
- Mizumoto, M., Ebisawa, K., & Sameshima, H. 2014, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 66
- Nandra, K., O'Neill, P. M., George, I. M., & Reeves, J. N. 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 382, 194
- Nenkova, M., Sirocky, M. M., Nikutta, R., Ivezić, Ž., & Elitzur, M. 2008, *Astrophysical Journal*, 685, 160
- Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K., & Yamada, S. 2013, *Astrophysical Journal*, 771, 100
- Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., et al. 2014, *Astrophysical Journal*, 794, 2
- Osterbrock, D. E. 1978, *Proceedings of the National Academy of Science*, 75, 540
- Reeves, J. N., Awaki, H., Dewangan, G. C., et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, 301
- Rivers, E., Risaliti, G., Walton, D. J., et al. 2015, *Astrophysical Journal*, 804, 107
- Sanfrutos, M., Miniutti, G., Agís-González, B., et al. 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436, 1588
- Serlemitsos, P. J., Soong, Y., Chan, K.-W., et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, 9
- Seyfert, C. K. 1943, *Astrophysical Journal*, 97, 28
- Sobolewska, M. A. & Done, C. 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 374, 150
- Steenbrugge, K. C., Tra, J. S. Kaa, tin, A. J. Blu, et al. 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 408, 921
- Strüder, L., Briel, U., Dennerl, K., et al. 2001, *Astronomy & Astrophysics*, 365, L18
- Turner, M. J. L., Abbey, A., Arnaud, M., et al. 2001, *Astronomy & Astrophysics*, 365, L27
- Turner, T. J. & Miller, L. 2009, *Astronomy & Astrophysics Review*, 17, 47
- Turner, T. J., Reeves, J. N., Kraemer, S. B., & Miller, L. 2008, *Astronomy & Astrophysics*, 483, 161
- Ursini, F., Petrucci, P.-O., Matt, G., et al. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463, 382

- Walton, D. J., Risaliti, G., Harrison, F. A., et al. 2014, *Astrophysical Journal*, 788, 76
- Wilms, J., Allen, A., & McCray, R. 2000, *Astrophysical Journal*, 542, 914
- Yamasaki, H., Mizumoto, M., Ebisawa, K., & Sameshima, H. 2016, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 68
- “Users Guide to the XMM-Newton Science Analysis System”, Issue 12.0, 2016 (ESA: XMM-Newton SOC)
- “XMM-Newton Users Handbook”, Issue 2.14, 2016 (ESA: XMM-Newton SOC)
- 小山勝二、嶺重慎 編「シリーズ現代の天文学 8 ブラックホールと高エネルギー現象」2007 年 (日本評論社)
- 井上一、小山勝二、高橋忠幸、水本好彦 編「シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 III 高エネルギー天文学」2008 年 (日本評論社)
- Bradley M. Peterson 著、和田桂一・栗木久光・亀野誠二・谷口義明・寺島雄一・長尾透 共訳「ピーターソン活動銀河核—巨大ブラックホールが引き起こす AGN 現象のすべて」2010 年 (丸善)

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々から、多岐に渡るご支援を賜りました。本修士論文を書き上げることができたのは、日頃より私の研究生生活を支えてくださった皆様のおかげです。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

指導教員である海老沢研教授には、本研究の機会を与えてくださったこと、そして、どんな時にも熱心なご指導と多大なるご助言を賜り、深く感謝しております。また、研究発表や地上観測、衛星運用など貴重な機会を下さり、非常に良い経験となりました。ありがとうございました。研究室の辻本匡弘助教からは、すざく XIS チームや、ASTRO-H/SXS 試験に参加する機会をいただき、X 線天文衛星の現場で様々なことを学ぶことができました。感謝申し上げます。研究員の中川友進さんや、菅原泰晴さんには、解析に用いる計算機を使いやすく整備していただきました。ありがとうございます。研究室の先輩である和田師也さんには、初めに身の回りの研究環境を整えてくださったこと、X 線観測の基本から解析手法、データ校正の仕事など沢山のことを教えてくださったこと、とても感謝しております。また、先輩の水本岬希さんは、いつも解析の細部までフォローしてくださり、研究で困難がある度に助けていただきました。本当に多くの場面でお世話になり、深く感謝しています。京都産業大の鮫島寛明さんには、研究打ち合わせで様々な助言をいただきました。そして、先輩の山崎廣樹さん、後輩の木下聖也くんにも日々の研究室生活でお世話になりました。ありがとうございました。

天文学専攻の同期の皆さんには、普段なかなか会うことができませんでしたが、講義や学会で顔を合わせる度に色々な話をすることができ、励みになりました。特に、谷口由貴さんとは日頃から連絡を取り合って切磋琢磨し、公私にわたってお世話になりました。本当にありがとう。

宇宙科学研究所で過ごす上では、宇宙物理学研究系の同期の皆さんが大きな支えとなりました。一緒にゼミをしたり、飲み会をしたり、種子島へ打ち上げを見に行ったり、楽しい学生生活となりました。また、研究の傍で「君が作る宇宙ミッション」運営スタッフや、展示室の説明員として JAXA のアウトリーチ活動に参加できたことは、自身の研究活動を鑑みるきっかけとなり、また将来を考える大きな糧となりました。そして何より、理工に渡る多くの仲間に囲まれ充実した宇宙研生活が過ごせました。きみっしょんスタッフの皆様、展示説明員で関わった皆様、ありがとうございました。

最後に、今日に至るまで全てにおいて私を支えてくれた両親をはじめ、常に私の考えを尊重し見守ってくれた家族に、深く感謝いたします。

