

広帯域X線スペクトル解析による 活動銀河核周辺の物質構造の研究

広島大学 理学研究科 物理学専攻
高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

M064766

山崎 智紀

主査 深沢 泰司 副査 志垣 賢太

平成20年3月23日

概要

宇宙に存在する銀河の中には、太陽系程度のごく狭い領域から 1 つの銀河に匹敵する明るさで輝いているものがあり、その中心部を活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) と呼んでいる。コンパクトな領域から莫大なエネルギーを放出していることから、AGN の中央には太陽の $10^6 \sim 10^{10}$ 倍の質量を持つ巨大なブラックホールがあると考えられている。

AGN を X 線で観測すると、連続成分 (power-law) のほか、輝線、吸収・反射成分、高エネルギー側での折れ曲がりなどが複雑にまざりあっている。これらの成分は AGN 周辺の物質構造を反映していると考えられており、詳細に解析することで AGN の物理的描像を明らかにすることができる。これまで 10 keV 以上の領域は、ノイズが圧倒的に多いため天体からの信号を正確に検出することが不可能であったが、わが国 5 番目の X 線天文衛星「すざく」は、徹底したノイズ除去により過去最高の S/N 比を実現している。さらに 2 桁にわたる広範なエネルギー領域を同時観測できるので、変動する信号を精度良く得ることができるので、AGN を解析するには極めて効果的である。

本研究では、「すざく」が観測した AGN の中でも、比較的近傍にあるセイファート銀河に対してスペクトル解析を行った。2 ~ 200 keV に及ぶ幅広いエネルギー領域を解析することで、AGN の包括的な物質構造の解釈を試みている。典型的なモデルによるフィッティング及び天体個別の詳細な解析により、連続成分のべき (Γ) と鉄輝線の 2 つのパラメータに対して制限を加えることができた。天体によらずパラメータ値を制限できたことは、AGN 周辺の物質構造を統一的に理解するための布石となる。

目次

第1章	はじめに	4
1.1	これまでのX線天文学	4
1.2	硬X線領域を観測する意義	4
1.3	本研究の目的	5
第2章	活動銀河核 (AGN) について	6
2.1	活動銀河核とは	6
2.1.1	クェーサー	7
2.1.2	Blazar	7
2.1.3	電波銀河	7
2.1.4	Seyfert 銀河	7
2.2	AGN の統一モデル	8
2.3	X線スペクトルからわかる AGN 周辺の物理的描像	10
2.3.1	軟X線超過	10
2.3.2	Cold Absorber	11
2.3.3	Warm Absorber	13
2.3.4	Power-law(連続成分) とカットオフエネルギー	14
2.3.5	鉄輝線近傍からの物理的情報	17
2.3.6	反射成分	18
第3章	X線天文衛星すざくについて	21
3.1	すざくの概要	21
3.2	すざくに搭載されている機器	23
3.2.1	X線望遠鏡 (X-ray Telescopes;XRTs)	23
3.2.2	X線 CCD カメラ (X-ray Imaging Spectrometer;XIS)	24
3.2.3	硬X線検出器 (Hard X-ray Detector;HXD)	26
第4章	データ解析およびその結果	29
4.1	観測データの選定について	29
4.2	データリダクション	29
4.3	本研究での解析の流れ	30
4.4	ベースとなるモデルでのフィッティング	31
4.5	かに星雲 (Crab) との比較	34
4.6	GSO 領域における信号検出の有意性について	35
4.7	天体個別のフィッティング	36
4.7.1	部分吸収を含んだモデルでのフィッティング	36
4.7.2	鉄のアバンダンスを導入してのフィッティング	38
4.8	観測データと地没データとの差分のフィッティング	39

第5章	まとめと考察	41
5.1	各天体のベストフィットモデル	41
5.2	NGC 4388、M 106 及び NGC 3783 の再フィット	44
5.2.1	NGC 4388 の再フィット	44
5.2.2	M 106 の再フィット	45
5.2.3	NGC 3783 の再フィット	46
5.3	得られたパラメータの相関及び過去の結果との比較	48
5.3.1	吸収成分と鉄輝線の等価幅	48
5.3.2	連続成分のベキ (Γ) と反射成分・カットオフエネルギー	48
5.3.3	鉄輝線の中心値と輝線幅	51
5.4	まとめ	52
付録A	各天体の解析結果	53
A.1	Centaurus A	53
A.1.1	ベースモデルでのフィッティング	53
A.1.2	かに星雲 (Crab) との比較	55
A.1.3	GSO 領域における信号検出の有意性について	55
A.1.4	部分吸収を含んだモデルでのフィッティング	56
A.2	NGC 2110	58
A.2.1	かに星雲 (Crab) との比較	60
A.2.2	GSO 領域における信号検出の有意性について	60
A.2.3	部分吸収を含んだモデルでのフィッティング	61
A.3	MCG-5-23-16	63
A.3.1	かに星雲 (Crab) との比較	65
A.3.2	GSO 領域における信号検出の有意性について	65
A.3.3	部分吸収を含んだモデルでのフィッティング	66
A.4	NGC 4388	68
A.4.1	かに星雲 (Crab) との比較	70
A.4.2	GSO 領域における信号検出の有意性について	70
A.4.3	部分吸収を含んだモデルでのフィッティング	71
A.5	NGC 4945	73
A.5.1	かに星雲 (Crab) との比較	75
A.5.2	GSO 領域における信号検出の有意性について	75
A.5.3	部分吸収を含んだモデルでのフィッティング	76
A.6	Mrk 509	77
A.6.1	かに星雲 (Crab) との比較	79
A.6.2	GSO 領域における信号検出の有意性について	79
A.6.3	部分吸収を含んだモデルでのフィッティング	80
A.7	M 81	81
A.7.1	かに星雲 (Crab) との比較	83
A.7.2	部分吸収を含んだモデルでのフィッティング	84
A.8	M 106	85
A.8.1	かに星雲 (Crab) との比較	87

A.9	NGC 3783	89
A.9.1	かに星雲 (Crab) との比較	91
A.9.2	GSO 領域における信号検出の有意性について	91
A.9.3	部分吸収を含んだモデルでのフィッティング	92
付録 B	鉄のアバダンスを導入したフィッティング	94
付録 C	観測データと地没データとの 差分フィッティング	96

第1章 はじめに

1.1 これまでのX線天文学

X線天文学は天文学の中でも比較的新しい分野である。1962年に Bruno Rossi、Ricardo Giacconi らによるロケットを使った観測により初めて系外のX線天体が発見された。「自然は人間よりもはるかに想像力豊かである」と語った Rossi の言葉のとおり、可視光で見ると静かな宇宙も、X線で見ると活動的な一面を垣間見ることができる。その様子は超新星残骸による宇宙線の粒子加速、銀河間に存在する高温プラズマ、銀河系中心の巨大ブラックホールからの放射と宇宙のあちらこちらで見られる。

X線は地球の大気によって遮られてしまうため、一般に観測は装置を人工衛星に搭載して行われる。これまでに20機以上のX線天文衛星が打ち上げられ、日本も1979年以降、5機の衛星を投入してきた。中でも特筆すべきは1993年に打ち上げられた先の衛星「あすか」である。軽量で大きな有効面積をもつX線望遠鏡と高いエネルギー分解能をもつ検出器が搭載されており、0.5 ~ 10 keV のX線領域を撮像しながらスペクトルを取ることができた。その活躍はX線天文学を大いに発展させるとともに、後に打ち上げられたXMM-Newton、Chandra の観測結果の多くも「あすか」の成果を支持することから、その活躍が如何に大きいか分かる。

1.2 硬X線領域を観測する意義

宇宙空間には無数の銀河が存在しているが、太陽系程度のごく狭い領域から銀河1個に匹敵するほどの明るさで輝いている銀河があり、その中心部を活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) と呼んでいる。AGN の中央には太陽の $10^{6\sim 10}$ 倍の質量を持つ巨大なブラックホールがあり、ガスが落ち込むときにその重力エネルギーが高い効率で放射に変換され中心が明るく輝くと考えられている。

AGN を見つける際のもっとも良い方法は、10 keV 以上の硬X線を精度良く検出することである。これまでの観測から、AGN のスペクトルは100 keV 程度までべき型でのびており、このことからAGN では光学的に薄いプラズマ中での放射があると考えられている。降着円盤の近くに高温のプラズマがあると、円盤から出てきた低エネルギーの光子が逆コンプトン散乱され高エネルギー側まで叩き上げられる。ただプラズマの温度以上にはならないので、あるエネルギーを境にスペクトルは折れ曲がり(カットオフ)を示すと予想されている。事実、多くのAGN でX線のスペクトルが硬X線領域までのびていないことが観測からわかっており、硬X線領域でカットオフがあると示唆されている。

カットオフエネルギーに制限を加えることができると、プラズマの温度 kT_e と光学的厚さ τ を見積もることができ、ブラックホール近傍の描像を推測することができる。AGN がどのような構造をもち、どのような物理が成り立っているのか？ AGN の描像を明らかにすることはブラックホールのそのものを知ることにつながり、現代の天文学において重要なテーマのひとつである。

1.3 本研究の目的

これまで硬X線領域の観測は、目標天体からの信号が弱いうえにノイズが圧倒的に多いので、信号を正確に検出することが難しかった。また外来からの荷電粒子と検出器が反応し検出器自体がノイズを発生させるなど、S/N比のよい観測が難しく大きな問題となっていた。

この問題点を克服し、広帯域同時観測を実現させたのがわが国 5 番目のX線天文衛星「すざく」である。X線 CCD カメラと硬X線検出器を搭載し、広範なエネルギー領域を同時に観測できるとともに、10 keV 以下の軟X線領域において過去最高の S/N 比とエネルギー測定精度をもつ。このため、AGN を解析するには極めて効果的である。

本研究では、「すざく」を用いて AGN の一種であるセイファート銀河の広帯域スペクトル解析を行い、AGN の物理的描像を探ることを目標としている。特に 10 keV 以上の領域にみられる反射成分、カットオフエネルギーに制限をかけ、硬X線領域における描像に迫ることを試みた。

第2章 活動銀河核 (AGN) について

2.1 活動銀河核とは

活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) は、1943年に Carl Seyfert によって電離した水素輝線を示す銀河として発見された。その後、様々なタイプの AGN が発見されたが、発見当初は全く異なる天体であると考えられていたので、個々の観測結果から細かく分類されている (表 2.1 参照)。

	L(erg/s)	変動	z	radio	optical(輝線)	X, -ray
RL QSO	$10^{44\sim48}$	$> 10^6 s$	> 0.1	明	広 H α	明
RQ QSO	$10^{44\sim47}$	$> 10^6 s$	> 0.1	暗	広 H α	明
Blazar	$10^{43\sim45}$	$10^{3\sim4} s$	< 0.3	明 (偏光)	明 (偏光)	輝線なし
電波銀河	$10^{43\sim45}$	$> 10^4 s$	< 0.3	明	広/狭 H α	明
Seyfert 1 型	$10^{42\sim44}$	$10^{3\sim4} s$	< 0.1	暗	広 H α +狭	N_H 小さい
Seyfert 2 型	$10^{42\sim44}$	ほとんどなし	< 0.1	暗	狭	N_H 大きい
LLAGN	$< 10^{42}$	$\sim 10^6 s$	< 0.1	暗	狭 H α	暗

表 2.1: AGN の伝統的分類

AGN の大きな特徴は、太陽系程度のコンパクトな中心領域から 1 つの銀河に匹敵するほどのエネルギー ($L = 10^{44\sim48}$ erg/s) を放出している点である。高い光度を示す条件として、放射圧と重力が等しいとして Eddington 限界よりどれだけの質量が必要か見積もると、

$$\frac{\sigma_T L}{4\pi r^2 c} = \frac{GMm_p}{r^2} \quad (2.1)$$

$$L_E = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} = 2 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_\odot}\right) \text{erg/s} \quad (2.2)$$

となり、 $10^{6\sim10} M_\odot$ の質量が必要となる。これだけの質量を太陽系程度の狭い領域 (10AU 程度) に入れるとなると、AGN のエネルギー源はブラックホールでなければならない。このことから、銀河中心に巨大なブラックホールがあり、周囲から降り積もる大量の物質が重力エネルギーを解放することで明るく光っている天体が AGN であると考えられている。AGN が巨大ブラックホールであることは受け入れられているが、それ自体を形成するためにも莫大な質量・エネルギーが必要なため AGN の進化についてはまだよくわかっていない。

もうひとつの特徴として、AGN はすべての波長領域で観測することができる。そのため、それぞれの波長から AGN のさまざまな姿を捉えることができる (表 2.2)。

以下、代表的な AGN の分類を示す。

電波	ジェット
遠赤外線	ダスト・トーラスによる再放射
近赤外・可視光	AGN からの放射で電離されたガスの輝線 AGN からの連続成分
紫外線	降着円盤からの直接成分
X線	連続成分・輝線・反射成分
線	ジェット

表 2.2: 各波長から「見える」AGN の姿

2.1.1 ケーサー

ケーサーは AGN の中でもっとも光度が大きい天体である。発見された当初は恒星のような点源に見える天体であったことから、準恒星状天体 (Quasi Stellar Object: QSO) と呼ばれていた。特筆すべき特徴は、大きな赤方偏移を示しており、遙か遠方に存在していることである。これまでの研究の結果、ケーサーは相対論的な距離にある極めて明るい AGN であると考えられている。ケーサーは電波域での明るさの違いから、Radio-Loud QSO (RL QSO)、Radio Quiet QSO (RQ QSO) と分類される。

2.1.2 Blazar

Radio Loud である AGN のうち、激しい時間変動と強い偏光を示す AGN である。Blazar はさらに BL Lac 型天体と OVV (Optically Violent Variables) に分類される。前者は連続スペクトルのみで輝線はないか非常に弱いのが特徴で、後者は可視光と電波領域で激しく変動する。相対論的なビーミング効果を考慮すると熱的放射が隠れてしまい、観測者に指向するジェットの放射成分しか表れなくなるため、Blazar は AGN の中心から吹き出るジェットを真正面から見ている天体であると考えられている。

2.1.3 電波銀河

電波銀河は中心核から強力なジェットが噴き出しており、周囲のガスに衝突して「電波ローブ」という吹きだまりを形成している。これらがシンクロトロン放射によって強い電波を出している銀河である。そのサイズは 100 kpc を軽く超えるものもあり、母銀河よりはるかに大きな空間での構造をもっている。電波銀河も、観測される輝線の幅によって Broad Line Radio Galaxy (BLRG)、Narrow Line Radio Galaxy (NLRG) と分類される。

2.1.4 Seyfert 銀河

ケーサーとは対照的に、比較的近傍に存在する AGN である。Seyfert 銀河は可視光のスペクトルによって大きく 2 つに分類され、幅の広い輝線と狭い輝線両方が観測されるものを Seyfert 1 型、幅の狭い輝線しか観測されないものを Seyfert 2 型と区別している。しかし偏光観測によって、2 型にも幅の広い輝線が観測されている。現在最も有力な AGN の統一モデルでは、両者は本質的には同じ AGN で、輝線が放射される領域を見込む角度によって、見え方が異なっていると解釈されている。詳しくは次節を参照のこと。

AGN には様々な種類が存在するが、これらを統一的に理解することができればブラックホールの進化や周辺の物理的猫像を明らかにするための大きなステップとなる。スペクトルを見てみると、Blazar の一種である BL Lac 天体を除く AGN からは、可視光や X 線領域で輝線が観測される。特に可視光の輝線は大きく 2 つに分類できる。

ひとつは FWHM で 1000-2000 km/s 以上のドップラー幅をもつ輝線で、Broad Line と呼ばれる。もうひとつは Broad Line に対して「狭い」幅をもち、禁制線が顕著に表れる輝線で Narrow Line と呼ばれる。Broad Line をもつ AGN は、Radio loudness によらず Seyfert 1 型に分類される。一方 Narrow Line のみ観測される AGN は、Seyfert 2 型もしくは LINER (Low Ionized Narrow Emission line Region) に分類される。

通常、密度の高いガス内では禁制線の遷移よりも原子同士の衝突によって他のエネルギー準位に移るため、禁制線は観測されない。しかしガス密度が非常に低いところでは、原子同士の衝突が起こりにくくなるため禁制線が観測されうる。Broad line には禁制線は観測されないので、ガス密度の高い中心のブラックホール近傍領域 (Broad Line Region:BLR) から放射されていると考えられる。この場合、降着円盤のドップラー効果により輝線幅が広がることも説明がつく。一方の Narrow line は、禁制線であり輝線幅も狭いことから、ブラックホールから遠く離れた領域 (Narrow Line Region:NLR) から放射されていると推測できる。

これらの描像を統一的に解釈するため、中心核を取り囲む光学的に厚いトーラスを見込む視線方向によって、AGN を統一的に説明するモデル (Antonucci & Miller, 1985, ApJ 297,627) が提唱された (図 (2.1) 参照)。このモデルによると AGN は本質的には同じものであり、NLR、BLR とともに見える角度から AGN を観測したものを Seyfert 1 型、BLR がトーラスによって見えない角度から観測したものを Seyfert 2 型、降着円盤の軸方向に噴出している jet を直接見ているものを Blazar としている。

これまでのところ、この統一モデルに対して大きく矛盾するような観測はなされておらず、一般的に広く受け入れられている。ただ、吸収量の極端に少ない Seyfert 2 型の発見や大きくスペクトル変動する観測結果がなされており、従来のモデルではうまく説明がつかない。そのため、今後統一モデルを修正する必要がある。

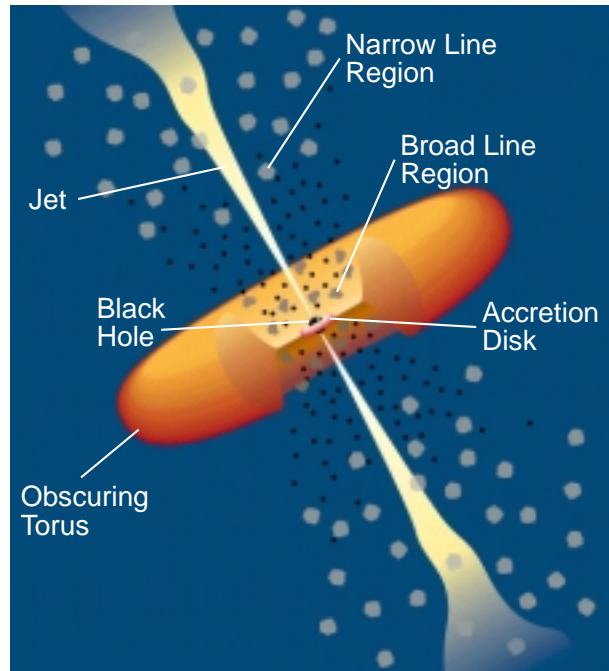


図 2.1: AGN の統一モデル [9]

2.3 X線スペクトルからわかるAGN周辺の物理的描像

スペクトル解析をすることで、天体固有の物理的描像を明らかにすることができる。AGN をX線領域で観測すると以下のような特徴的な構造が見られ、周辺状況を知るための重要な手段となっている。

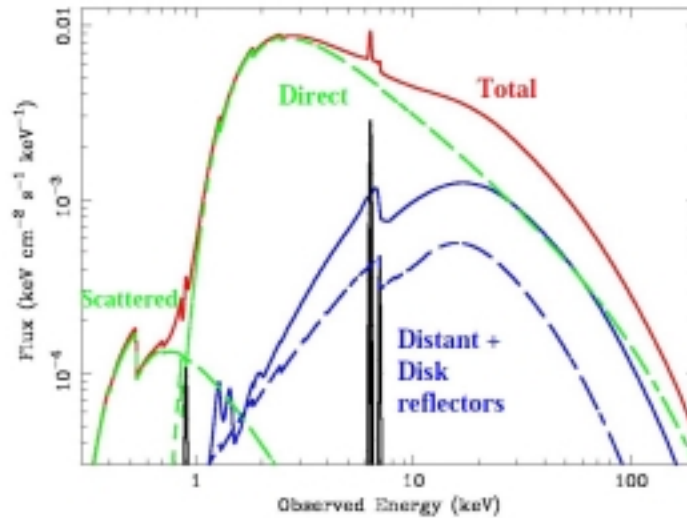


図 2.2: 典型的な AGN のスペクトル成分 [17]

2.3.1 軟X線超過

AGN の連続成分はべき型のモデル (power-law) で表される。軟X線領域から硬X線領域まで power-law でフィッティングすると、2 keV 以下の領域で超過成分が表れることがあるが、この成分は光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤からの黒体放射のたしあわせ (Multi Color Diagram モデル;MCD モデル) で表すことができる。パラメータは降着円盤の内縁半径における温度 T_{in} と normalization の 2 つである。

いま、中心から距離 r 離れたところで温度 $T(r)$ 、厚さ dr の微小円環部分から単位面積・単位時間あたりに放射されるエネルギーを考えると、Stefan-Boltzmann の法則から $E = \sigma T(r)^4$ ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$) となる。また質量降着率 \dot{M} は一定であるとする。

ビリアル定理より、解放される重力エネルギーの半分は回転エネルギーになり残り半分は円環からの黒体放射となる。つまり、円環部分の重力エネルギーの半分がその部分からの黒体放射と等しくなる。放射は円環の上下から起こるので、

$$2 \times 2\pi r dr \cdot \sigma T(r)^4 = \frac{1}{2} \left(-\frac{G\dot{M}M_x}{r} \right) \quad (2.3)$$

これを温度 $T(r)$ について解くと、

$$T(r) = \left(\frac{3G\dot{M}M_x}{8\pi\sigma r^3} \right)^{1/4} \quad (2.4)$$

$$L_{disk} = 2 \cdot \int_{r_{in}}^{r_{out}} 2\pi r \cdot \sigma T(r)^4 dr = 4\pi r_{in}^2 \cdot \sigma T_{in}^4 \quad (2.5)$$

スペクトル解析を行うことで T_{in} と L_{disk} がわかるので、これらの式から内縁半径 r_{in} を推定することができる。理論上、物質がブラックホールの周りを安定して回転できる半径 (最終安定軌道) は Schwarzschild 半径の 3 倍程度 ($r_{in} \sim 3r_s \sim \frac{6GM}{C^2}$) と考えられている。これにより中心のブラックホールの質量も見積もられており、その値は観測結果とよく一致している。

参考：標準円盤モデルによる降着円盤の温度

ここでは、ケプラー運動の角速度を Ω_K 、質量降着率を \dot{M} 、降着円盤の内縁を r_{in} とし、計算がしやすいように $C \equiv 1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}}$ を定義する。

Stefan-Boltzmann の法則から

$$E = \frac{3}{8\pi} \dot{M} \Omega_K^2 C = \sigma T_{eff}^4 \quad (2.6)$$

式 2.6 を 温度について解くと、

$$T_{eff} = \left(\frac{E}{\sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{3\dot{M}\Omega_K^2 C}{8\pi\sigma} \right)^{1/4} \quad (2.7)$$

ここで次のような規格化を行う。

$$M_* = \frac{M}{M_\odot} \quad (2.8)$$

$$\dot{M}_* = \frac{\dot{M}}{\dot{M}_{Edd}} = \frac{L}{L_{Edd}} = \frac{\frac{1}{12}\dot{M}c^2}{4\pi cGMm_p\sigma_T^{-1}} = \frac{\sigma_T c \dot{M}}{48\pi GM_* M_\odot m_p} \quad (2.9)$$

$$r_g = \frac{r}{3r_s} = 1.37 \times 10^4 M_*^{-1} r_*^{-3/2} \quad (2.10)$$

式 (2.8)、(2.9)、(2.10) を (2.7) に代入して整理すると、

$$T_{eff} = 2.86 \times 10^7 \dot{M}_*^{1/4} M_*^{-1/4} r_g^{-3/4} C^{1/4} (K) \quad (2.11)$$

AGN における典型的な値 ($\dot{M}_* = 0.2, M_* = 10^8, r_g = 2, C = 0.3$) を代入すると、 $T_{eff} = 9.42 \times 10^4 K$ と求まる。よって、降着円盤から放射される電磁波の持つエネルギーは、最も高い内縁温度で ~ 8 eV となり、放射は主に紫外線領域であることがわかる。紫外線領域の波長は我々の銀河にある星間ガスによって吸収されるので、降着円盤からの放射は直接観測できない。

2.3.2 Cold Absorber

wabs モデル

宇宙空間は真空ではなく、様々な星間物質によって満たされている。このため、天体から放射される X 線が我々に届くまでに吸収が起こる。この星間物質による光電吸収をモデル化したものが wabs モデルで、式 2.12 で表される。

$$M(E) = \exp[-N_H \sigma(E)] \quad (2.12)$$

N_H は水素の柱密度 (単位面積あたり 10^{22} 個) で、視線方向に水素がどれだけ存在するかを表す指標となる。また $\sigma(E)$ は光電吸収断面積で、トムソン散乱は考慮していない。

一般に $N_H \sim 10^{20\sim 21} \text{ cm}^{-2}$ では sub-keV、 $N_H \sim 10^{22\sim 23} \text{ cm}^{-2}$ では 1 ~ 5 keV、 $N_H > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ では 10keV 付近のエネルギー領域で吸収が効いてくる。典型的に銀河面以外の方向では $N_H = 10^{20\sim 21} \text{ cm}^{-2}$ 程度である。

スペクトル解析では、天体 ~ 観測者間に存在する吸収成分とともに、我々の銀河固有の吸収も考慮する必要がある。天の川銀河の星間吸収はよく知られているので、ある値に固定して解析を行う。

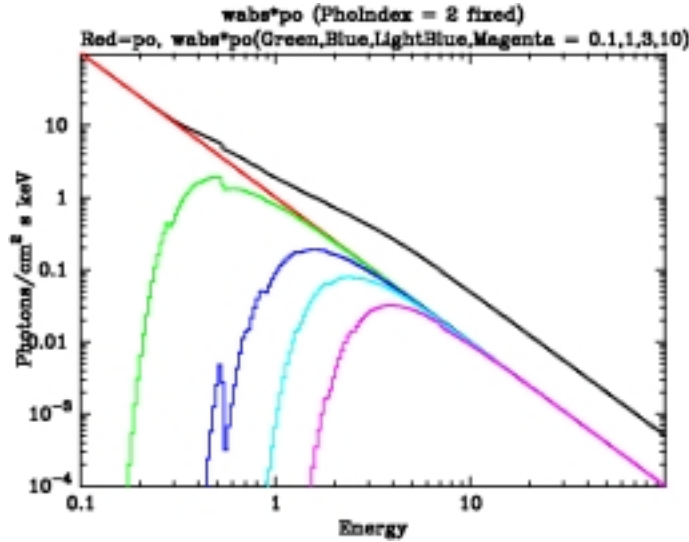


図 2.3: 吸収を含む連続成分のシミュレート図。それぞれ赤色 : power-law のみ、緑色 : $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ 、青色 : $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 、空色 : $3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 、桃色 : $1 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ である。0.5 keV 付近に酸素の吸収端が見える。

pcfabs モデル

wabs モデルでは、視線方向に存在する吸収体が一様であると仮定している。しかし、広大な宇宙空間において星間物質が一様に分布しているとは到底考えられない。物質が濃い領域・薄い領域とむらがあるのは当然で、様々な量の吸収体が様々な割合で存在していると考えるのが普通である。

このような部分吸収に関するモデルが pcfabs モデルである。

$$M(E) = f \cdot \exp[-N_H \sigma(E)] + (1 - f) \quad (2.13)$$

f は covering fraction といい、吸収体の 'むら' を表す指標で、0 から 1 までの値を取る無次元量である。いま $f = 0.3$ とすると、視線方向の視野の 3 割に吸収体が存在し、放射の 3 割が吸収されて残りの 7 割が我々に届くとされている。 $f = 1$ のときは wabs モデルと同じ振る舞いを示す (図 2.13 参照)。

部分吸収が幾重にも重なっているモデル (多層部分吸収モデル) を考えることで、AGN の複雑な物理的描像を明らかにする手段になることが期待されている。

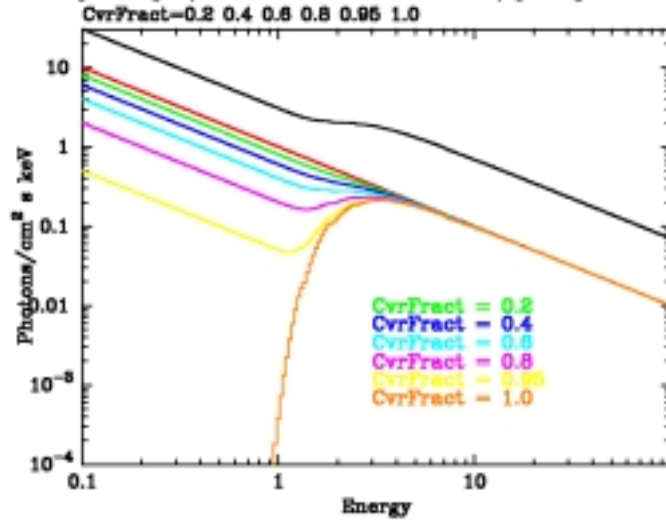


図 2.4: 部分吸収のシミュレート図 ($N_H = 3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ で固定)。fraction の割合で吸収が起こり、fraction = 1.0 のとき一様な吸収体と同じになる。

2.3.3 Warm Absorber

軟X線領域にみられる吸収体で、1984年 Einstein 衛星で QSO MR 2251-178 を観測した際に発見された。その後「あすか」の観測により、Seyfert 1 型のおよそ半分に warm absorber が見つかった。

最近の XMM-Newton や Chandra による高分解能X線観測により、この吸収体は、数 100km/s で青方偏移している高階電離した元素の吸収端構造の集まりであることが明らかになっている。これらの電離状態は、 L を Luminosity、 n を密度、 R を中心から元素までの距離として、式 (2.14) で表される。

$$\xi = \frac{L}{nR^2} (\text{erg} \cdot \text{cm}/\text{s}) \quad (2.14)$$

同様の吸収体が BL Lac 天体にもみついているが、こちらは吸収線であるという証拠はまだみつけない。

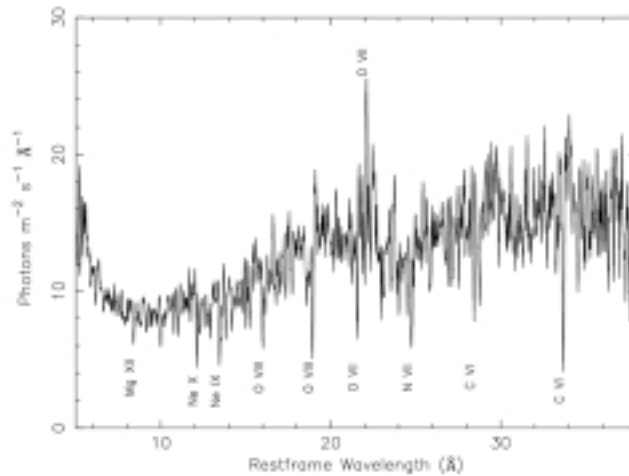


図 2.5: NGC 5548 (Seyfert 1 型) の軟X線吸収端構造 [11]

2.3.4 Power-law (連続成分) とカットオフエネルギー

降着円盤からの直接成分は観測できないが、観測データからは 100 keV 以上までのびる連続成分が得られる。この連続成分は、降着円盤のまわりに高温のプラズマがあるモデルを考えるとよい。降着円盤の近くに光学的に薄い高温のプラズマがあると、降着円盤から放射された紫外線領域の光子は、逆コンプトン散乱によって高エネルギーまでたたきあげられる。そのため、硬X線領域までべき型 (power-law) でスペクトルが延びている。power-law の式は以下で表される。

$$A(E) = KE^{-\Gamma} \quad (2.15)$$

K は単位エネルギー・単位時間・単位面積あたりの放射光指数、 Γ は光子指数と呼ばれる無次元量である。

ただ、プラズマの温度以上にはならないので、あるエネルギーを境にスペクトルは折れ曲がり (カットオフ) をしめすようになる (図 2.7 参照)。これまでの観測から、多くの AGN にカットオフエネルギーがあり、100 keV 以上に存在すると示唆されている。最近の研究では、カットオフエネルギーと他のパラメータ (power-law のべきや反射成分) との相関関係も議論されている。カットオフエネルギーに制限をつけることができれば、ブラックホール近傍の描像を推測することが可能となる。ただ、Seyfert 1 型と 2 型でカットオフの振る舞いが違っていたり、不定性が大きいことから推測の域を出ていない。

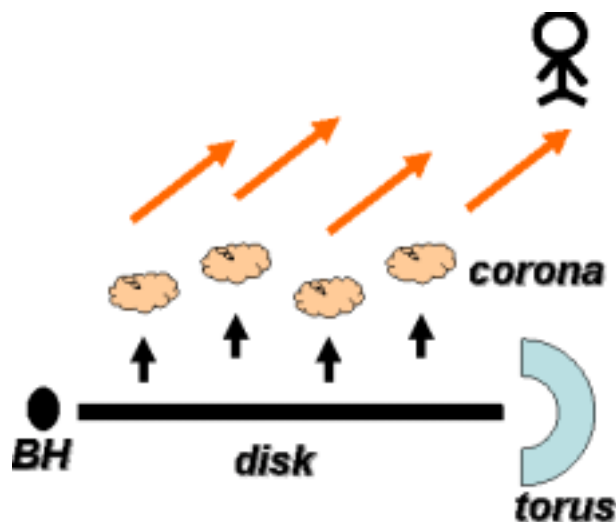


図 2.6: disk からの放射が高エネルギー側に叩き上げられる概念図

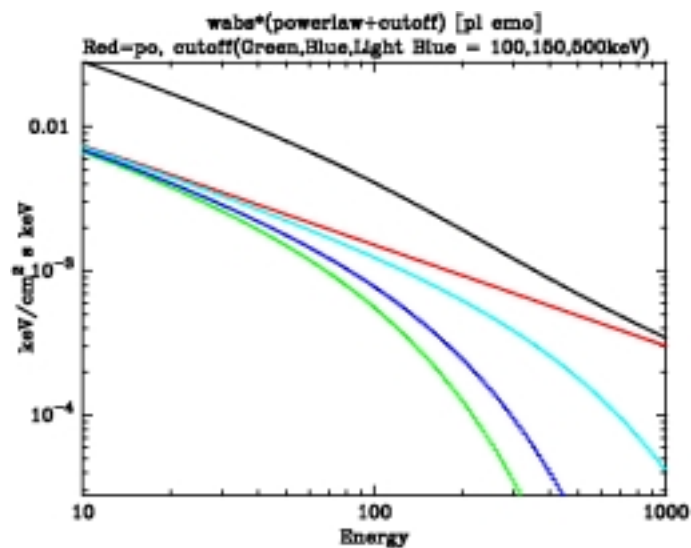


図 2.7: カットオフを含む power-law のシミュレート図。それぞれ赤色:単純な power-law、緑色: $E_{cut} = 100\text{keV}$ 、青色: $E_{cut} = 150\text{keV}$ 、空色: $E_{cut} = 500\text{keV}$ である。

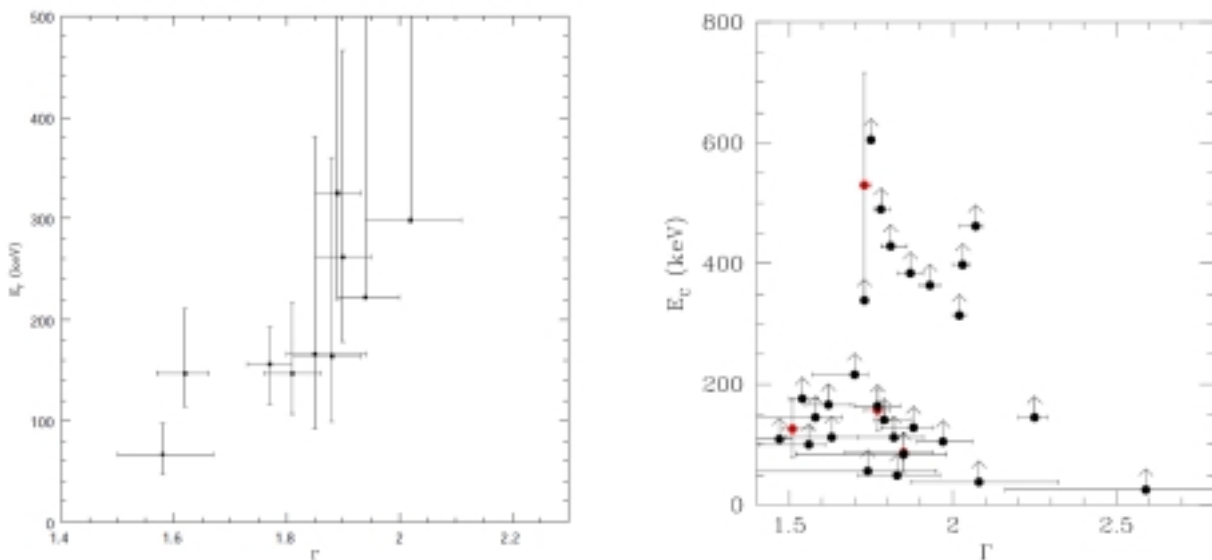


図 2.8: power-law のべきとカットオフの相関。左が Seyfert 1 型で右が 2 型である。[18, 19]

実験室系と電子静止系をかんがえる。電子の質量を m 、散乱前後の光子のもつエネルギーを実験室系で E, E_1 、電子静止系で E', E'_1 とそれぞれおく。また、散乱角を図 2.9 のように定義する。

このとき、電子静止系における散乱後の光子のエネルギーは、エネルギー保存則および運動量保存則より、

$$E'_1 = \frac{E'}{1 + \frac{E'}{mc^2}(1 - \cos\theta')} \quad (2.16)$$

と表せる。これをローレンツ変換

$$E' = E\gamma(1 + \beta\cos\phi) \quad (2.17)$$

$$E_1 = E'_1\gamma(1 - \beta\cos\phi'_1) \quad (2.18)$$

によって変換すると、実験室系での光子のもつエネルギーは、

$$E_1 = \frac{E\gamma^2(1 + \beta\cos\phi)(1 - \beta\cos\phi'_1)}{1 + \frac{E\gamma(1 + \beta\cos\phi)}{mc^2}(1 - \cos\theta')} \quad (2.19)$$

と表せる。

したがって、散乱前：電子の静止系：散乱後における光子のエネルギーの比は、ほぼ $1 : \gamma^2 : \gamma^2$ となる。

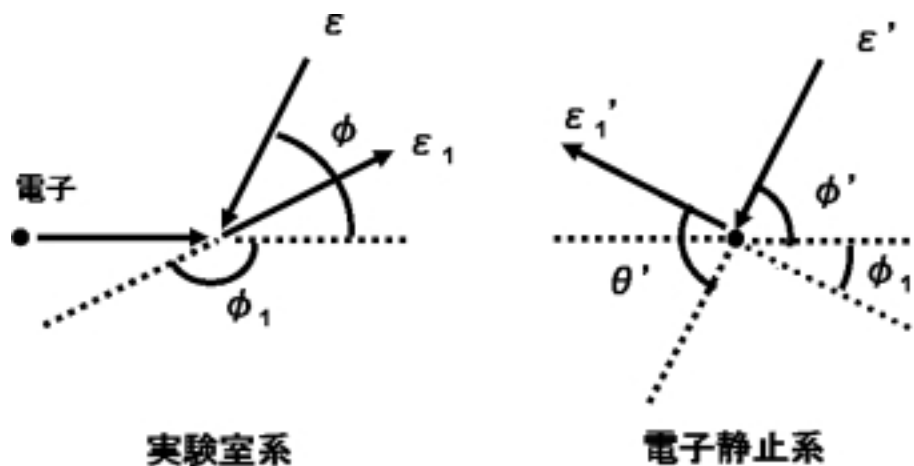


図 2.9: 実験室系と電子静止系で考える 逆コンプトン散乱 [1]

AGN を観測すると、さまざまな輝線がスペクトル上に表れる。これら輝線は、中心からの放射が周辺物質と相互作用したときに発生すると考えられており、その物質特有の輝線として放射されるので、AGN 周辺の物質構造を明らかにすることができる。特に 6.4 keV 付近に表れる鉄輝線は、ほとんどの観測で検出されており、さらに強度も強いことから様々な情報をもたらしてくれる。

まず、輝線幅からその物質の放射領域が推定できる。観測する AGN によって、輝線の幅が広がっていたり狭かったりとはさまざま、FWHM にして 1000 ~ 2000 km/s 以上の広がりを出す輝線を broad line、broad line よりも幅が狭い輝線を narrow line と呼ぶ。broad line は中心のブラックホールに近い領域から放射しているため、降着円盤のドップラー効果とブラックホールの強い重力による赤方偏移の効果により幅が広がるとされる。一方の narrow line は放射領域がブラックホールから遠くにあるので、幅の狭い輝線になると考えられている。

他にも 7.1 keV 付近に表れるエッジの深さからは、鉄の重元素組成比がわかる。光学的厚さ τ は、AGN 本体を取り囲む吸収体の柱密度 N_H と $\tau = N_H / 1.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ なる相関があり、 $\tau > 1$ だとコンプトン散乱に対して光学的に厚い、 $\tau < 1$ だと光学的に薄いと判断できる。また、輝線の放射領域近傍に冷たい物質が存在していると、X線が物質中の電子と衝突することで反跳電子放出分のエネルギー損失が起こり、コンプトン波長で決まる幅をもつ Compton-shoulder が 6.24 keV 付近に表れることもわかっている。さらに Fe-K α と Fe-K β の強度比から、鉄輝線が放射される領域の電離度がわかる。輝線を正確に観測、解析することは AGN 周辺の物理的描像を解き明かすための重要なツールである。

鉄ライン付近からわかること (MCG5-23-16)

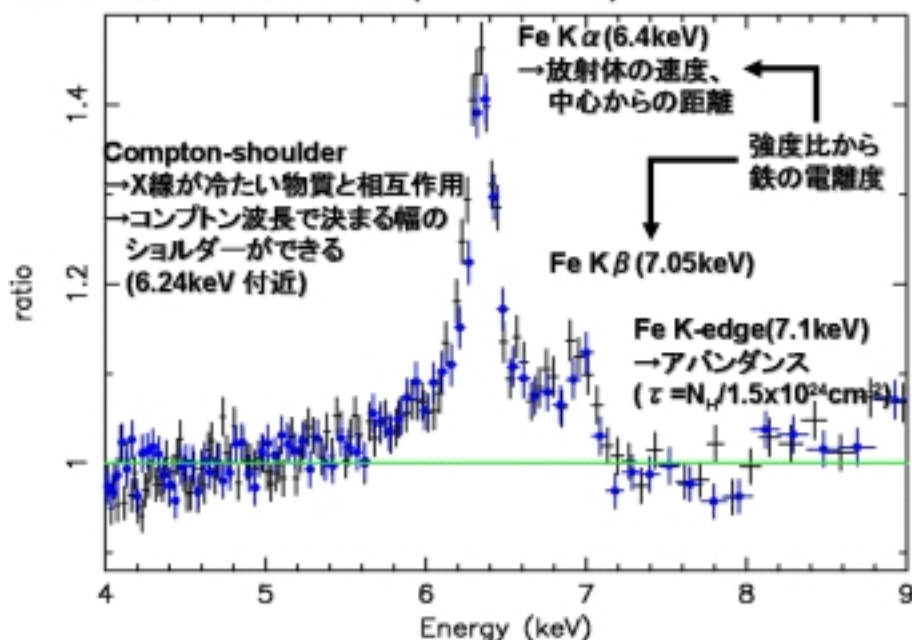


図 2.10: 鉄輝線周辺でわかる AGN の物理的描像について [17]

スペクトルを power-law でフィッティングすると、数 10 keV 付近にピークをもつ残差構造が見られることがある。これは、ある領域から放射された X 線が降着円盤やトーラスによって反射されたものと考えられている。

今回解析に用いたモデル (pexrav; Magdziarz & Zdziarski 1995, MNRAS, 273, 837) では、カットオフエネルギーをもつ power-law 放射が中性物質に反射されることを考慮している。反射成分については、ソースから反射体を見込む立体角を θ として、reflection factor $R = \sin^2 \theta / 2$ を定義し、 $R = 0$ のときは反射成分なし、 $R = 1$ のときは無限平版からの反射とされている (図 2.12 参照)。また、観測者と反射体のなす角度 (図 2.13) や 7.1 keV 付近に見られるエッジ構造を反映する鉄のアバundance (図 2.14) を考慮することもできる。

観測される X 線がどこで反射されたのかを推定することは、AGN の物理的描像に迫るための重要なステップである。この反射領域の推定について、様々なパラメータどうしの相関関係が研究されている。まず、天体固有の水素の柱密度 N_H が大きくなると、鉄輝線の equivalent width が大きくなることが知られている (図 2.15)。輝線は物質と X 線との相互作用で生じることから、reflection factor R と鉄輝線の equivalent width には何らかの相関があるのではないかとされている (図 2.16)。両者に明らかな相関が見られれば、反射領域の形状に制限を加えることができるが、エラーが大きいため結論づけるまでには至っていない。

また AGN は時間変動することがわかっているが、反射成分も幾分変動する。反射成分の中で変動を示すものは放射領域から比較的近い降着円盤からの反射、ほとんど変動しないものは放射領域から遠く離れたトーラスからの反射であると考えられている。

これまでの Seyfert 銀河の解析結果によると、1 型、2 型ともに反射成分が表れるが、直接成分に対する反射成分の強度比が 1 型よりも 2 型のほうが大きい傾向にあることが指摘されている。この違いについて、2 型の吸収体は一様で単純なものではないと考えられている。ただ反射成分に関する議論では、スペクトルフィットの際に仮定したモデル自身が正確であるか不明であったり、硬 X 線領域における S/N 比が芳しくないこと、現状の検出器の精度による限界などからまだまだ改善の余地がある。

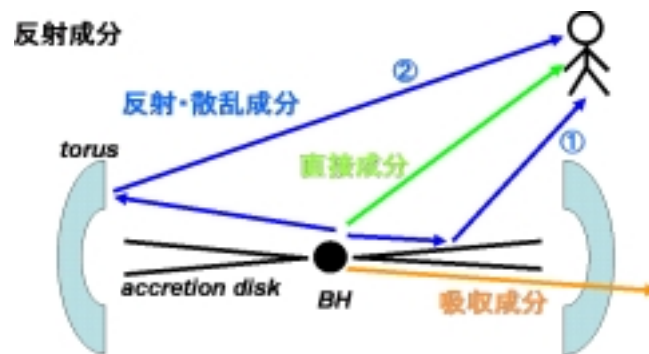


図 2.11: 反射成分の概念図

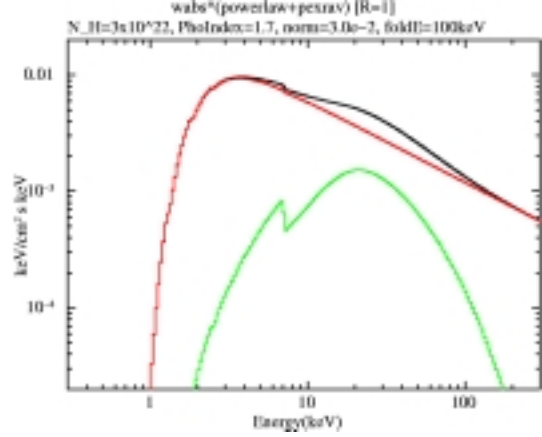
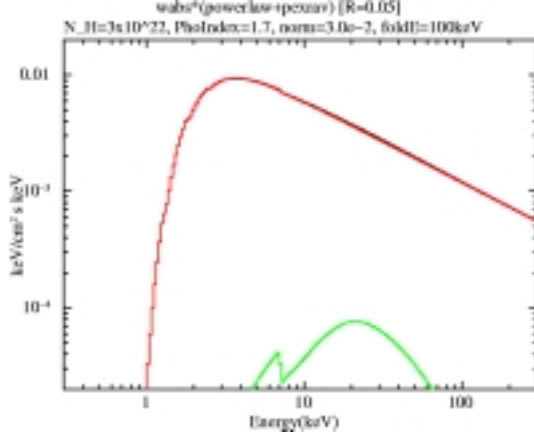


図 2.12: reflection factor:R を変化させたときのシミュレート図。赤:連続成分、緑:反射成分、黒:全体を表す。R が大きいほど 30 keV 付近での盛り上がりが見られることが確認できる。

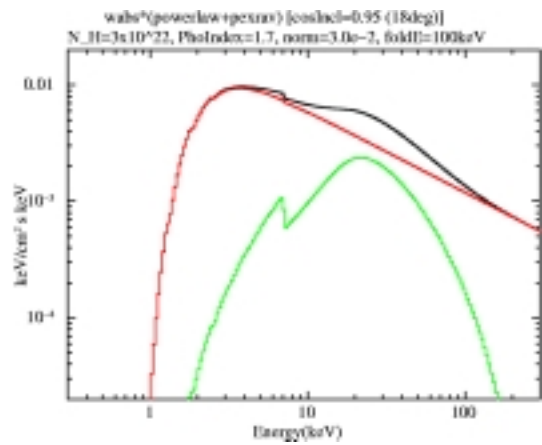
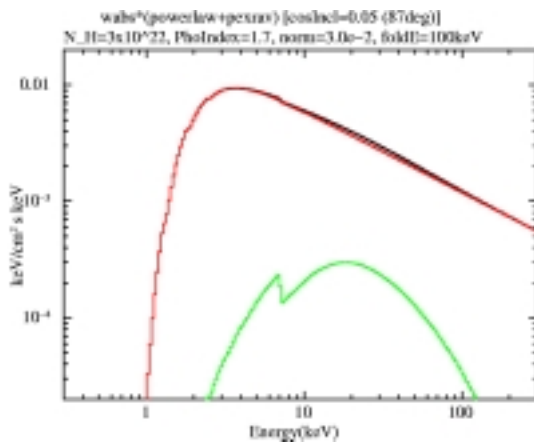


図 2.13: 観測者と反射体のなす角度 (Inclination angle) を変化させたときのシミュレート図。赤:連続成分、緑:反射成分、黒:全体を表す。なす角が小さいほど反射成分は大きくなるのがわかる。

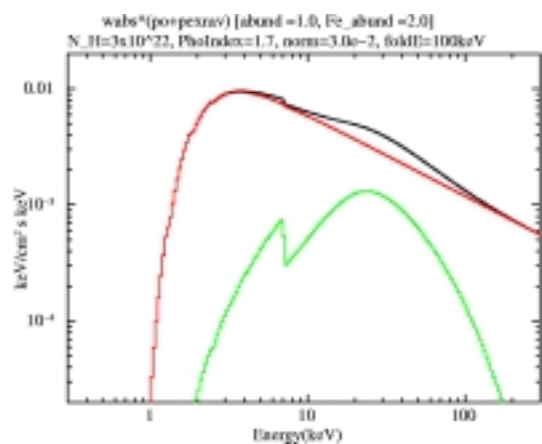
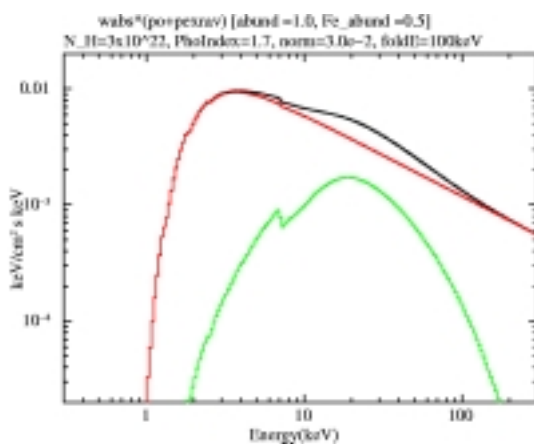


図 2.14: 鉄元素のアバUNDANSを変化させたときのシミュレート図。赤:連続成分、緑:反射成分、黒:全体を表す。鉄のアバUNDANSが多いほど 7.1 keV の鉄のエッジの構造が顕著になる。反射成分のピークがずれたように見えるが、これはエッジの影響が強く出ているためである。

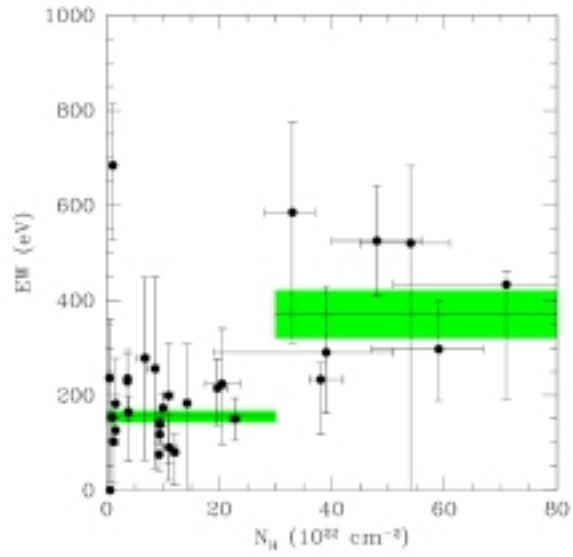


図 2.15: 吸収成分 (水素の柱密度) と鉄輝線の equivalent width との相関関係 [19]

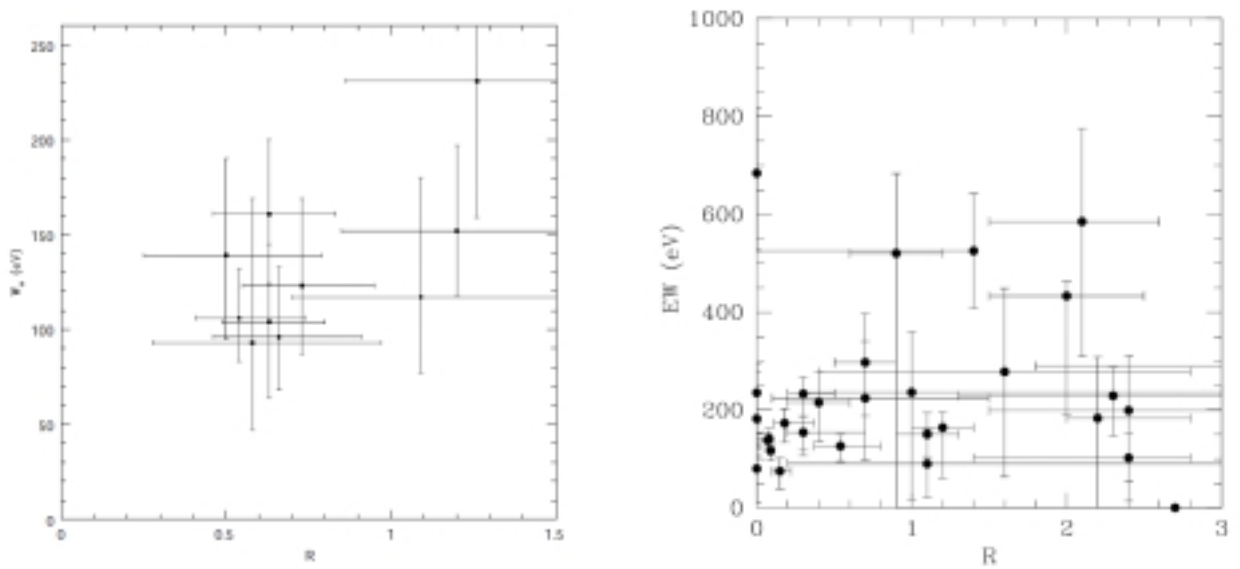


図 2.16: reflection factor:R と鉄輝線の EW との相関。左が Seyfert 1 型で右が 2 型である。 [18, 19]

第3章 X線天文衛星すざくについて

3.1 すざくの概要

X線天文衛星「すざく」は、「はくちょう(1979年)」、「てんま(1983年)」、「ぎんが(1987年)」、「あすか(1993年)」に続くわが国 5 番目のX線天文衛星である。全長 6.5m 重量 1680 kg と日本の科学衛星としてはこれまでにない大型衛星で、2005年7月10日に内之浦宇宙空間観測所から M-V ロケット 6号機によって打ち上げられた。現在、高度およそ 550km、軌道傾斜角 31 °の略円軌道を飛行しながら日々観測を行っている。

すざくの大きな特徴として、観測帯域が 0.2 ~ 600keV と広いこと、徹底した低バックグラウンド化を実現したことの 2 つが挙げられる。すざくには 5 台の軟X線望遠鏡 (X-ray Telescopes; XRTs) と硬X線検出器 (Hard X-ray Detector; HXD) が搭載されている。軟X線望遠鏡の焦点面には CCD カメラを用いたX線撮像分光器 (X-ray Imaging Spectrometer; XIS) が置かれており、0.2 ~ 12 keV のX線領域を観測する。一方の硬X線検出器は 10 ~ 600 keV の硬X線領域をカバーし、両者を同時に用いることでこれまでにない広帯域の観測が可能になった。

また衛星を低周回軌道に投入させることで、地球の磁場によって太陽や宇宙から飛来する宇宙線や荷電粒子の影響を極力抑えるようにしている。さらに検出器自体の徹底した低バックグラウンド化の実現により、他のX線天文衛星 Chandra、XMM-Newton と比較して微弱な信号に対して感度が高い。

広範な観測領域と低バックグラウンド化の強みを生かし、すざくは着実に成果を挙げている。次々と解明される硬X線領域の物理現象や長年謎とされていた仮説を確かなものとする観測データ、さらには過去 2 回における観測公募において世界各国から寄せられた多数の提案数とその活躍を物語っている。また Thomson Scientific 社の調査によると、2007年9月期において満田和久先生を筆頭著者とする「すざく」衛星論文 (The X-ray observatory Suzaku:2007PASJ...59S...1M) が宇宙科学分野で最も引用された論文に認定されており、その活躍は世界的に注目を集めている。

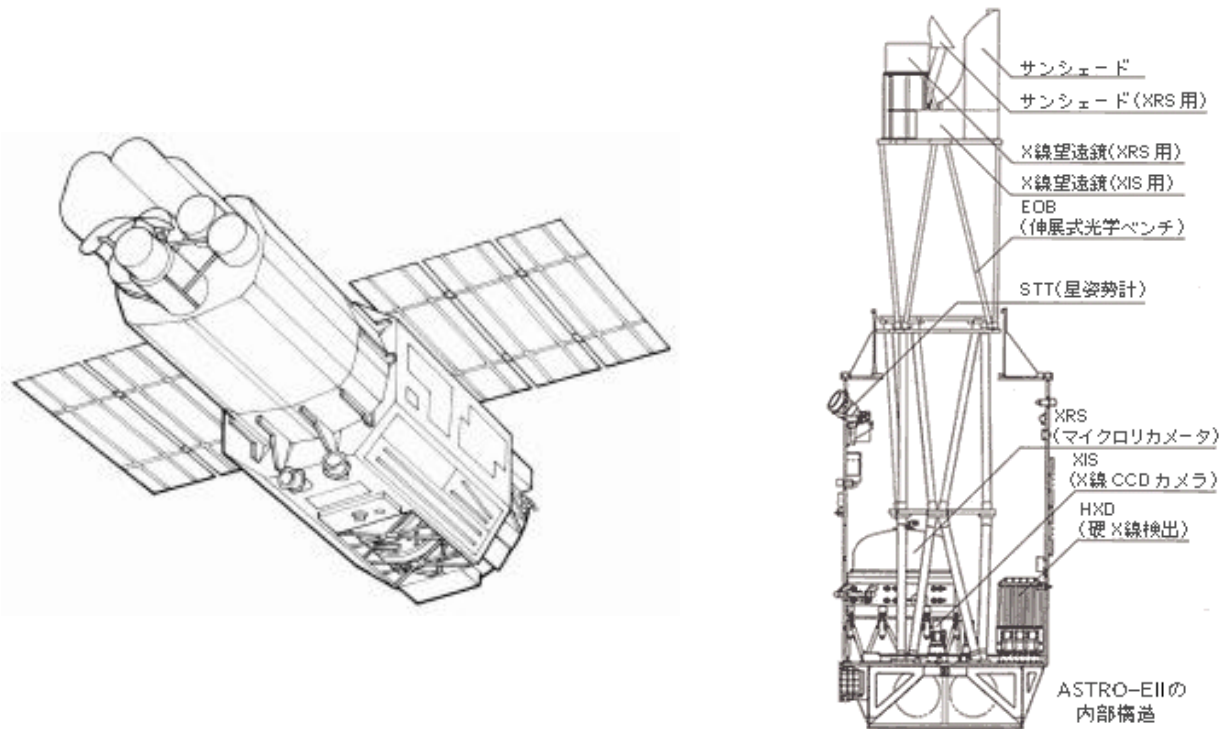


図 3.1: X線天文衛星すざくの概観 [2]

3.2.1 X線望遠鏡 (X-ray Telescopes; XRTs)

すざくには、先の天文衛星「あすか」に搭載されたX線望遠鏡 (ASCA XRT) をさらに改良・大型化した望遠鏡が全部で5台搭載されている。X線は透過力が強いいため、効率良く反射させるのは非常に難しい。またX線は物質中で強く吸収され、屈折率が1よりもわずかに小さいことから全反射させる必要がある。そこで「あすか」では鏡面に金を用いた全反射鏡が搭載された。

すざく搭載のXRTはASCA XRTよりもひとまわり大きく、口径が40 cm (ASCA:35cm)、焦点距離が4.75 m (ASCA:3.5m) となったことで平均の入射角が小さくなり高エネルギー側での反射率が向上した。また、反射鏡面となる膜を接着剤等を用いて基板に剥離・転写する「レプリカ法」を採用することで、X線の散乱を大幅に低減させている。さらに反射鏡にプリコリメータを配しており、視野外にある天体からのもれこみの影響を極力抑えている。

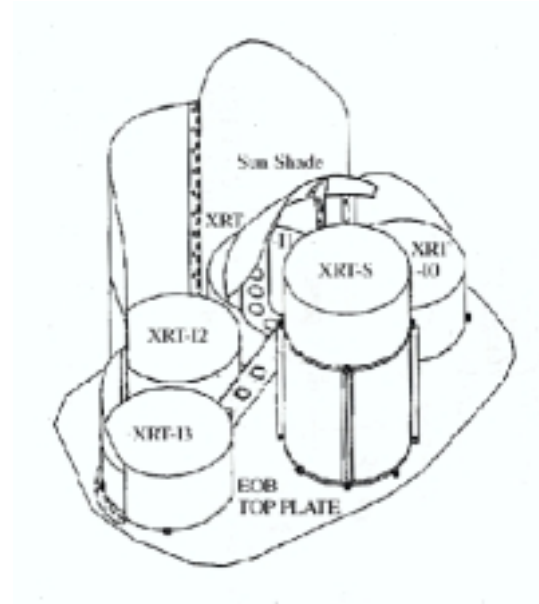


図 3.2: XRT の外観 (左) とその配置図 (右)

	XRTs	ASCA XRT
焦点距離	4.75 m	3.50 m
視野		
@1keV	19'	24'
@7keV	19'	16'
有効面積		
@1.5keV	450 cm ²	300 cm ²
@7keV	250 cm ²	150 cm ²
入射角	0.18 ° - 0.60 °	0.24 ° - 0.70 °
角分解能 (HPD)	2.0'	3.5'

表 3.1: XRT と ASCA XRT との基本性能比較

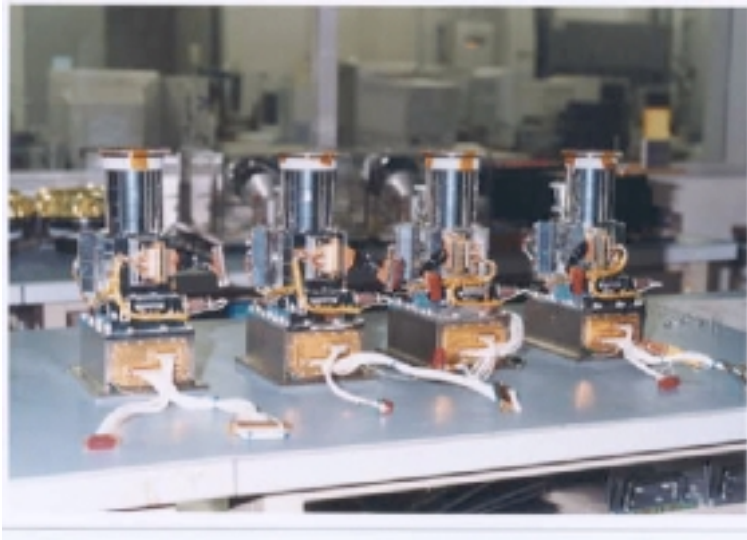


図 3.3: 4 台揃った XIS の外観 [3]

XIS とは X 線検出用の冷却 CCD カメラで、半導体検出器を 2 次元アレイ状に並べたものである。X 線用の CCD カメラは先の X 線天文衛星「あすか」に初めて搭載され、数々の成果を残した。すざくには 4 台の XIS (X0, X1, X2, X3) が搭載されており、天体の撮像と 0.2 ~ 12 keV における X 線のスペクトル取得を行っている。

CCD 検出部はシリコンでできており、電圧をかけると内部に空乏層が生じる。空乏層に外部から X 線が入射すると、ある確率で光電吸収が起こるが、この時生じた光電子はエネルギーを失うまで周辺のシリコンと衝突を繰り返して電子・ホール対を生成する。電子・ホール対の数は入射エネルギー E_{in} (eV) に比例することがわかっており、およそ E_{in} / W [W : 元素の平均電離エネルギー] (個) である (シリコンの平均電離エネルギーは 3.65 eV であるから、生じる電子の個数は $E_{in}/3.65$ (個) となる)。この一連の過程で生じる電子の集まり (一時電子雲) を正確に検出することで、入射 X 線のエネルギーを知ることができる。

XIS は「あすか」搭載の CCD カメラ (SIS) よりも空乏層の厚さが 2 倍あるので、高エネルギー側における感度が向上している。他にも、CCD の動作温度を -90 まで下げることで暗電流を抑えたり、電荷注入端子を取り付けて電荷転送非送率をモニターする、XIS 周辺に十分な遮蔽物を配置して放射線による劣化を防ぐなど、様々な工夫が施されている。また、軌道上における X 線エネルギーの絶対値測定のために、較正線源として Fe^{55} が取り付けられている。この線源からは Mn-K α (5.9 keV) ・ Mn-K β (6.4 keV) の特性 X 線が出ており、エネルギースケールの絶対値を正確に測定することが可能となった。

搭載されている XIS のうち、X0, X2, X3 は電極のある面から X 線が入射し、X1 は電極の無い面から入射するようになっている。前者を前面照射型 (Frontside Illuminated; FI)、後者を裏面照射型 (Backside Illuminated; BI) という。

できるが、BI 型には電極が無く、さらに空乏層と中性領域を利用することで、軟X線領域での感度が高くなっている。図 3.4 に FI 型と BI 型の模式図を示す。なお本修論では、広範なエネルギー領域におけるスペクトル解析を行うので、FI CCD のデータを用いている。

視野	17'.8 × 17'.8
エネルギー帯域	0.2 ~ 12 keV
有効画素数	1024 × 1024
1 画素の大きさ	24 μ m × 24 μ m
エネルギー分解能	~ 130 eV @ 6 keV
有効面積 (XRT-I 含む)	340 cm ² (FI), 390 cm ² (BI) @ 1.5 keV 350 cm ² (FI), 100 cm ² (BI) @ 8 keV
時間分解能	8 s (Normal mode), 7.8ms (P-Sum mode)

表 3.2: XIS の基本性能

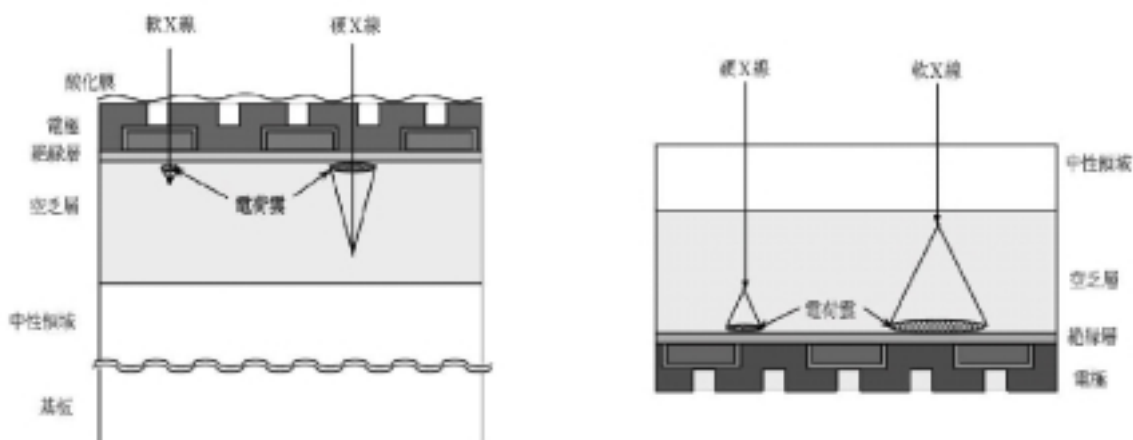


図 3.4: 前面照射型 CCD (左) と裏面照射型 CCD (右) の模式図 [4]

HXD は 4×4 のマトリックス状に配置された 16 ユニットの Well 検出器 (主検出器) と、その周りを取り囲む 20 ユニットの Anti 検出器 (シールド部) から成る。集光系をもたない非イメージング検出器であり、10 ~ 600 keV という広範な硬X線領域を非常に高い感度で観測することができる。

一般的にエネルギーが高くなると、天体からやってくる信号はべき関数的に少なくなる。そのため目標とする天体からの信号が他の信号 (バックグラウンド) に埋もれてしまいかねない。バックグラウンドには視野内から入射するものや視野外からシールドを透過するもの、検出器本体の放射化によるものなど、その由来はさまざまである。したがって、硬X線領域を観測する際、これらの影響を精度良く取り除くことが必要不可欠である。

HXD の Well 検出器は、気球実検で開発された井戸型フォスウィッチカウンタを応用したものである。主検出部は PIN 型 シリコン半導体検出器と GSO ($\text{Gd}_2\text{SiO}_5, \text{Ce } 0.5\% \text{ mol}$) シンチレータで構成されており、10 ~ 600 keV という広範囲の観測が行える。PIN と GSO は BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) の井戸の底に配されており、視野を絞ることでバックグラウンドの影響を低減させている。さらに、これらのユニットを複眼配置することで大きな有効面積を得ることができると同時に、Anti 検出器や隣り合ったユニット間で反同時計数をとることで、より正確にバックグラウンドの影響を除去することができる。

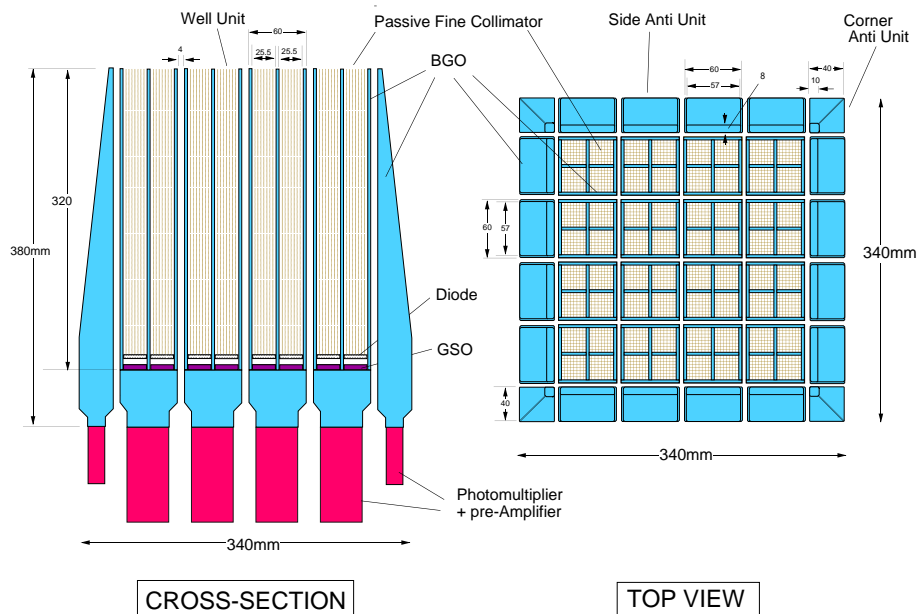


図 3.5: HXD の断面図 (左) と 真上から見た図 (右)[3]

Well 検出器

Well 検出器は目標天体からのX線を検出するところである。BGO からなる井戸の底に PIN 検出器と GSO シンチレータが縦積みで置かれてあり、10 ~ 50 keV 程度のエネルギーをもつX線は PIN 検出器で検出され、それより大きなエネルギーをもつX線は PIN 検出器を突き抜けて GSO シンチレータで検出されるようになっている。図 3.6 に 1 ユニッ

視野	34° × 34° (≤ 100 keV), 4.5° × 4.5° (≥ 100 keV)
エネルギー帯域	10 ~ 600 keV (PIN : 10-60 keV, GSO : 30-600keV)
エネルギー分解能	PIN : ~ 3 keV (FWHM), GSO : 7.6 / √ E_{MeV} % (FWHM)
有効面積	~ 160 cm ² @ 20 keV ~ 260 cm ² @ 100 keV
時間分解能	61 μsec

表 3.3: HXD の基本性能

トあたりの概観を示す。

主検出部の周囲を取り囲む BGO は、有効原子番号が大きく無機シンチレータの中でも放射線阻止能が高い。さらに、エネルギーに対するリニアリティに優れ、荷電粒子による放射化のレベルも NaI の半分程度である。BGO の蛍光時定数は ~ 353 ns(@20°) であるが、GSO のそれは ~ 86 ns(@20°) である。HXD では両者の違いを利用して波形弁別を行い、反同時係数をとることで主検出部に入射した信号のみを得る。

また、主検出部は BGO によって視野を 4.5° × 4.5° に絞っているが、さらに BGO の井戸部分にはファインコリメータとよばれる視準器が挿入されている。これにより入射角の大きな X 線を吸収することができ、PIN の観測領域での視野を 0.56° × 0.56° まで絞っている。こうすることで、宇宙 X 線背景放射 (CXB) を十分低減させ、目標天体以外からの信号の混入を抑えることができる。

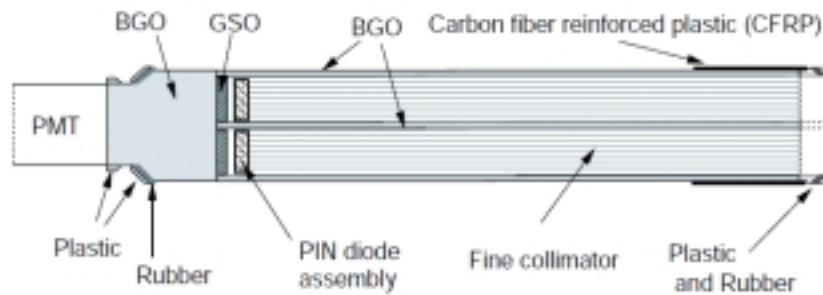


図 3.6: Well 検出器 1 ユニットあたりの概観

Anti 検出器

Anti 検出器は、阻止能の高い BGO 結晶シンチレータとフォトチューブを組み合わせた検出器である。Well 検出器を取り囲むように配置されており、線や荷電粒子から主検出部を守るアクティブシールドの役割を果たしている。Anti 検出器で生じた信号は目

検出器以外からの信号を識別でき、また、全検出器での反方向計数もでき、効率良くバックグラウンドを下げるができる。

有効面積は一面あたり $\sim 1200 \text{ cm}^2$ と非常に大きい。BGO 結晶シンチレータの厚さは平均で 2.6 cm もあるため高エネルギーの放射線に対しても有効で、1 MeV に対して $\sim 600 \text{ cm}^2$ もの大きな面積をもつ。さらに、その配置から常に全天を見渡すことができるので、あらゆる方向で起こるガンマ線バーストのような突発現象に対する全天モニター (Wideband All-sky Monitor:WAM) として利用されている。

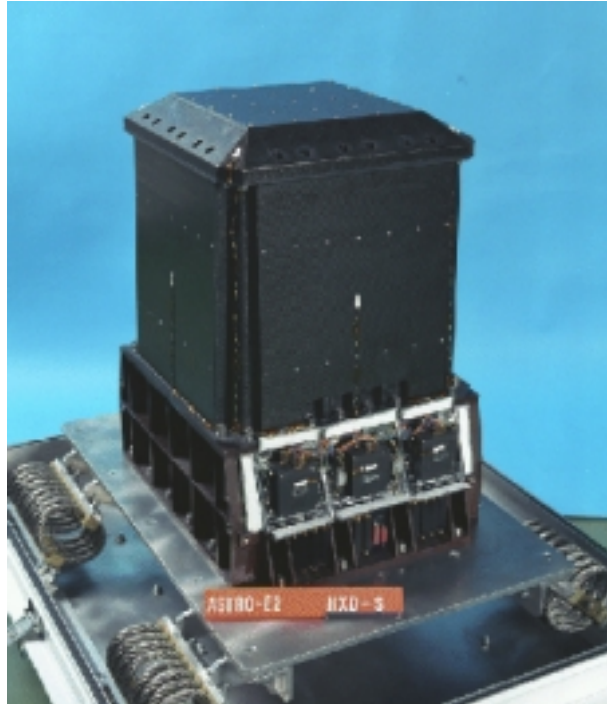


図 3.7: HXD の外観 [3]

第4章 データ解析およびその結果

4.1 観測データの選定について

本研究では、AGN のX線エネルギー側における描像に迫ることを目的としている。理論上、反射成分は数 10 keV 付近に表れ、カットオフエネルギーは 100 keV 以上のところにあることが示唆されている。そのため、少なくとも HXD/PIN の観測領域まで十分な量の信号が受かっている必要がある。本研究では、すざくが観測した天体のうち、2007 年 10 月時点で公開されているデータの中から、過去の論文で十分明るいと思われる 9 つのセイファート銀河を選び出して解析を行った。

表 4.1 に選定したデータを示す。

ターゲット	観測開始日	観測時間 (sec)	RA (deg)	DEC (deg)	距離 (Z)	$N_{H_{Gal}}$	flux
Cen A	2005-08-19	6.43×10^4	201.3695	-43.0177	0.001825	8.62	25.2 [21]
NGC 2110	2005-09-16	7.63×10^4	88.0444	-7.4580	0.007789	18.3	10.5 [22]
MCG-5-23-16	2005-12-07	7.54×10^4	146.9445	-30.9023	0.008486	8.00	9.29 [21]
NGC 4388	2005-12-24	10.1×10^4	186.4461	12.6674	0.008419	2.60	2.50 [21]
NGC 4945	2006-01-15	7.37×10^4	196.3681	-49.4152	0.001878	15.7	0.52 [21]
Mrk 509	2006-04-25	1.54×10^4	311.0194	-10.6637	0.034397	4.11	5.16 [21]
M 81	2006-05-08	7.07×10^4	148.8559	68.9951	-0.000113	4.16	3.87 [21]
M 106	2006-06-10	9.75×10^4	184.7117	47.2376	0.001494	1.16	0.58 [23]
NGC 3783	2006-06-24	6.83×10^4	174.7611	-37.7364	0.009730	8.50	6.40 [21]

表 4.1: 解析に用いたターゲット一覧。 $N_{H_{Gal}}$:我々の銀河固有の吸収成分 (in units of 10^{20} cm^{-2})。 flux:in units of $10^{-11} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (2-10 keV)。 括弧内の数字は参考文献。

4.2 データリダクション

本研究で用いたデータファイルは、すざくチームが公開しているもののうち、予めスクリーニングされている clean event を用いている。clean event とは外来からの宇宙線が多い場所や、天体が地球に隠れて見えない時間帯などが除去されているデータである。今回の解析では、XIS は processing version 2.0、HXD は version 1.2 のデータを用いている。

XIS のスペクトルを解析するには、「ソースデータ・バックグラウンドデータ・レスポンス」の 3 つが必要となる。XIS はイメージ (図 4.1) が得られるので、そこからソース、バックグラウンドそれぞれの領域を切り出してデータを作っている。ソースの領域は天体を中心として 4 分角、バックグラウンド領域は少なくともソース領域と同じ大きさになるようにしており、統計を良くするために前面照射型 (FI) の XIS0、XIS2、XIS3 のデータを全て足し合わせている。また、レスポンスは FTOOLS の xisrmfgen、xissimarfgen を用いて天体毎に作っている。さらに、参考のため XIS 領域の時間変動 (ライトカーブ) も作成している。

のでそれを用いている。まず、観測データとバックグラウンドモデルの時間帯を一致させ
 たうえでリダクションする。正確なX線信号を見積もるために出されている疑似信号を
 pseudo イベントで取り除き、デッドタイム補正を行ってスペクトルを作る。レスポンスは
 天体によって光軸がXIS/HXD と異なるので、PIN は ae_hxd_pinXXnome1_20070914.rsp
 (XX=xi,hx)、GSO は ae_hxd_gsoXXnom_20060321.rsp(XX=xi,hx) を使い分けている。さ
 らにHXD/GSOにはレスポンスを補正するファイルとして ae_hxd_gsoXXnom_crab_2007
 0502.arf (XX=xi,hx) を読み込ませている。

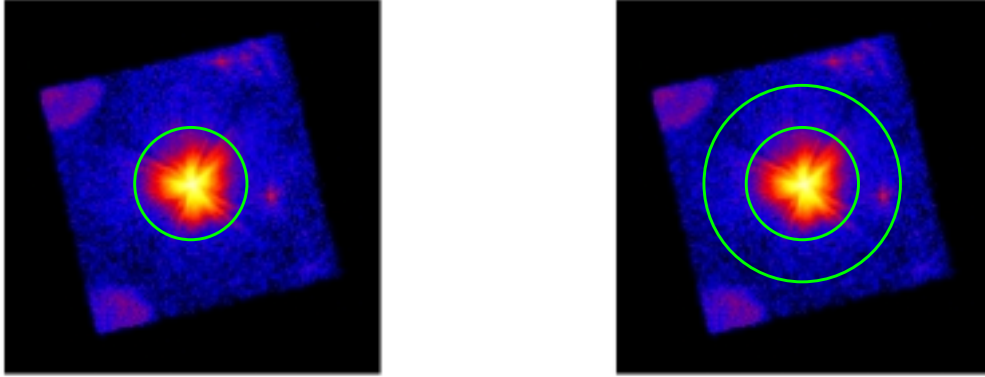


図 4.1: XIS の領域の切り出し方 (天体は NGC 2110)。左図:ソース領域の指定。天体を中
 心として4分角切り出している。右図:バックグラウンド領域の指定。この天体の場合、内
 縁が4分角、外縁が6分角の円環領域をバックグラウンド領域として切り出している。

4.3 本研究での解析の流れ

本研究では、スペクトル解析を通して AGN の物質構造に迫っていく。スペクトル解析
 とは、観測で得られた天体のスペクトルに対して理論的に導き出されたモデルスペクトル
 をフィッティングさせモデルが最も合致するような状態を探し出す作業である。観測デー
 タとモデルとの整合性を示す判断規準として、 χ^2 と degree of freedom(dof) の関係を用
 いている。いま、 x_i に対するデータの値を y_i 、期待値 (理論値) を $m(x_i)$ 、エラーを q_i と
 すると、 χ^2 は以下のように表せる。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - m(x_i)}{q_i} \right)^2 \quad (4.1)$$

また dof とは degree of freedom の略で、「データ数 - パラメータ数」で定義され、モデ
 ルのパラメータの自由度を表す。統計上、 χ^2/dof が 1 に近いほど、モデルがデータをよ
 く再現しているとされる。

本章では、ターゲットの1つである MCG-5-23-16 を例に、典型的なスペクトルモデル
 を用いて χ^2/dof を 1 に近づける一連の解析を示す。大まかな流れは以下のとおりであ
 る。なおその他の天体の解析結果については、付録 A を参照のこと。

1. ベースとなるモデルでのフィッティング
2. かに星雲 (Crab) との比較

4. 天体個別のフィッティング
5. ベストフィットモデルの決定

4.4 ベースとなるモデルでのフィッティング

個々の天体を詳しく解析する前に、まずはじめに典型的な AGN のモデルでフィッティングを行った。このモデルは、吸収成分を含む power-law と輝線 (鉄の $K\alpha$)、反射成分の 3 つを含むモデルである。反射成分は、中性物質からの反射を表すモデルである pexrav (Magdziarz & Zdziarski 1995, MNRAS, 273, 837) を用いている。解析するエネルギー領域は 2 ~ 200 keV でフィッティングしている。

モデルには、予め以下のような処理を施してある。

- HXD/PIN 領域では、宇宙 X 線背景放射 (CXB) を考慮にいれている。
- 我々の銀河固有の吸収成分 (N_{HGal}) を含めている (Dikey & Lockman 1990)。
- 定数をかけ、検出器間の normalization を XIS : HXD = 1 : 1.13 に固定している。

解析では、段階をふんでモデルをフィッティングさせている。解析を進めていくと、中には低エネルギー側で超過成分がみえているものもある。そのような天体には、soft 成分として、ベキを硬 X 線のものと同定した power-law を加えることで、軟 X 線領域でのフィッティングを行った。

以下にモデルとパラメータを示す。

Model A : $\text{constant} \times N_{HGal} \times (\text{zvphabs} \times \text{power-law} + \text{zgauss} + \text{CXB})$

Model B : $\text{constant} \times N_{HGal} \times (\text{zvphabs} \times \text{power-law} + \text{zgauss} + \text{pexrav} + \text{CXB})$

Model C : $\text{constant} \times N_{HGal} \times (\text{zvphabs} \times \text{power-law} \times \text{highcut} + \text{zgauss} + \text{pexrav} + \text{CXB})$

constant	: 検出器間の normalization を補正する定数。XIS=1, HXD=1.13 で固定。
N_{HGal}	: 我々の銀河固有の吸収成分 (10^{22}cm^{-2})。詳細は表 4.1 参照。
zvphabs	: AGN 固有の吸収成分 (10^{22}cm^{-2})。
power-law	: $E^{-\Gamma}$ で減衰する連続成分。
highcut	: カットオフエネルギー (E_{cut} (keV))
zgauss	: 相対論的效果を考慮した輝線。
pexrav	: 中性物質からの反射を考慮した、カットオフ (E_{cut}) をもつ power-law。

表 4.2: ベースモデル及びそのパラメータ

また、これまでの観測から CXB の振る舞いがよく研究されており、power-law \times highcut を用いて $\text{CXB}(E) = 8 \times 10^{-4} \times (E/1\text{keV})^{-1.29} \times \exp[-\frac{E}{40(\text{keV})}]$ で再現できる。本解析では、このパラメータをモデルの中に組み込んでいる。最も簡単な Model A では、連続成分として power-law のみを考えている。これに反射成分 (E_{cut} は 1000 keV に固定) を加えたものが Model B、 E_{cut} をフリーにしたものが Model C である。なお反射成分を加えるときは、pexrav 中の power-law と全体の power-law を同期させ、AGN 固有の吸収成分はかけていない。

Component	Parameter	Model A	Model B	Model C	M.Dadina et al
-Absorber	N_H (10^{22})	1.09 ± 0.02	1.26 ± 0.03	1.18 ± 0.03	~ 0.01
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.66 ± 0.01	1.75 ± 0.01	1.70 ± 0.02	$1.79^{+0.07}_{-0.08}$
	N_{hard} (e^{-2})	2.16 ± 0.02	2.44 ± 0.04	2.32 ± 0.05	
	R	-	0.46 ± 0.06	1.05 ± 0.12	$0.74^{+0.22}_{-0.52}$
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	74.2 ± 8.1	191^{+110}_{-60}
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.397 ± 0.005	6.397 ± 0.004	6.396 ± 0.004	$6.49^{+0.08}_{-0.08}$
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	88.6 ± 6.9	90.6 ± 6.9	74.6 ± 8.3	
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-4})	1.09 ± 0.07	1.10 ± 0.07	0.97 ± 0.08	
$F_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				8.61E-11	9.29E-11
$F'_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				9.46E-11	
χ^2/dof		550/251	481/250	373/249	

表 4.3: ベースラインのベストフィットパラメータと過去の論文との比較。モデルに AGN 固有の吸収成分を含むフラックスを F、含まない元来のフラックスを F' とする。

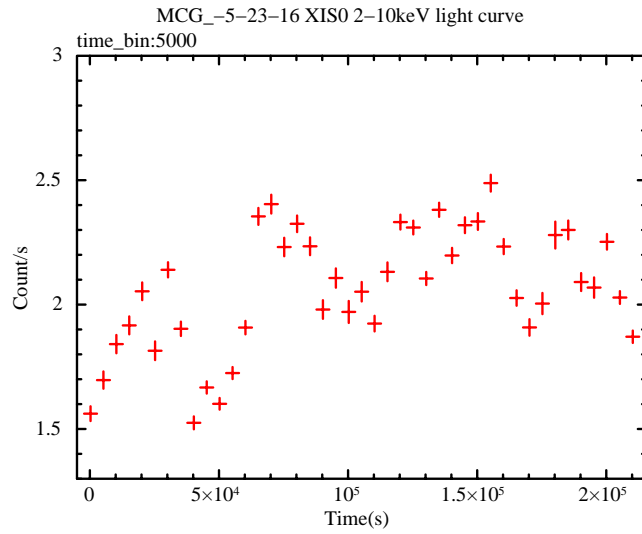


図 4.2: 2 ~ 10 keV 領域のライトカーブ。1 bin あたり 5000 秒でまとめている。

図 4.2 に XIS 領域における天体からの信号の時間変動 (ライトカーブ) を示す。天体からの信号は、周期的に変動していたり、ほとんど一定であったりとさまざまであるが、本解析では観測時間全体を通しての平均的なスペクトル解析を行っている。ただ時間変動が大きい天体については、第 5 章でスペクトルモデルの同定を行う際に、変動している成分のスペクトルを解析している。

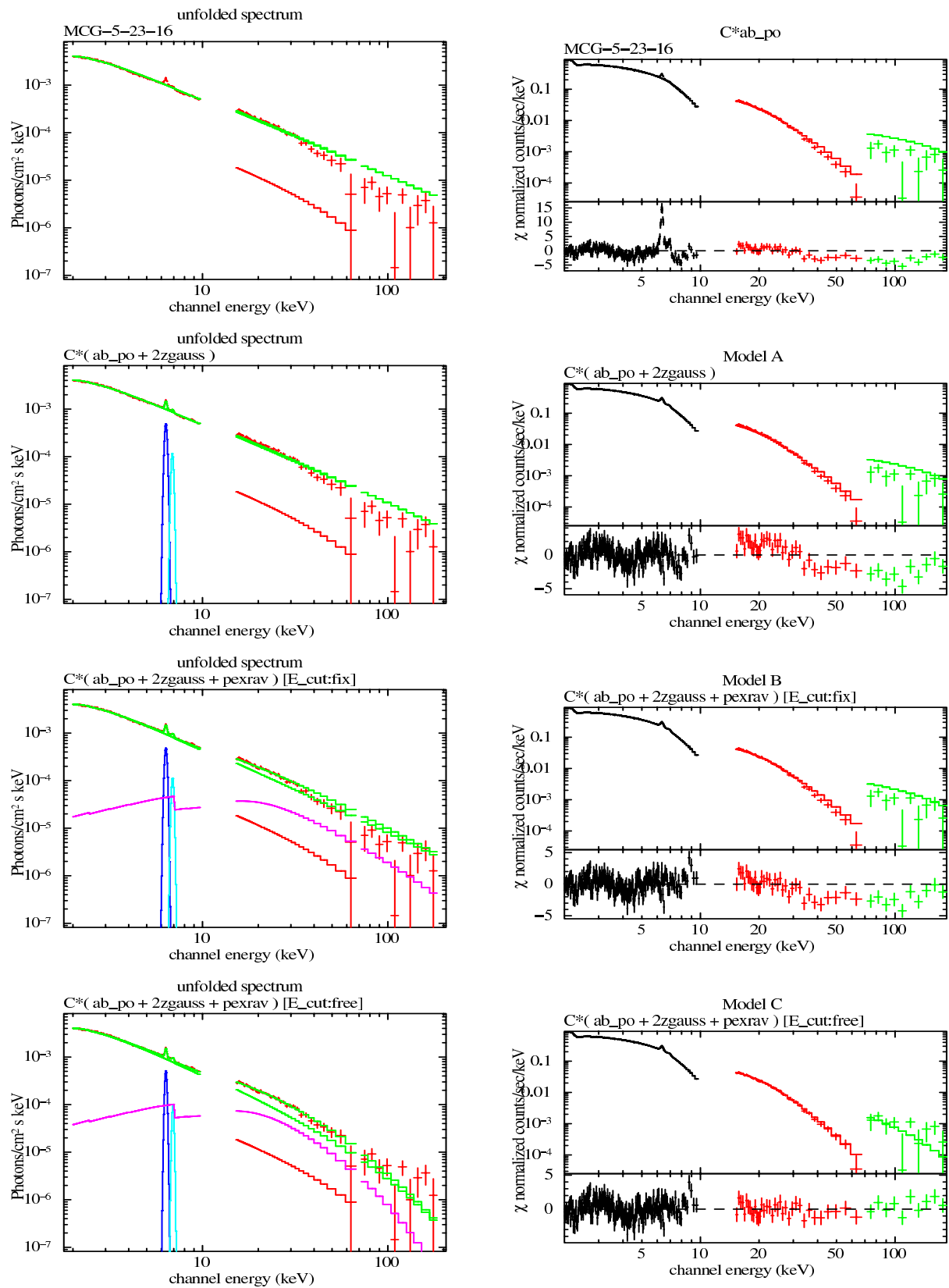


図 4.3: ベースラインモデルによるフィッティング結果。左図：モデルの成分を表示している。右図：モデルとデータとのフィッティング結果。

4.3 かに星雲 (Crab) との比較

天体からの信号を正確に求めるには、検出器のチャンネルとエネルギーの対応関係、正確な有効面積の情報をもつレスポンスが不可欠である。レスポンスは解析する天体に応じて自ら作成したり、公開されているものを用いたりするが、いずれも得られた情報を完全に再現することはできないので、どうしても不定性が残る。正確な解析を行うには、レスポンスの不定性を取り除かなければならない。

そこで、かに星雲 (Crab) との比 (Crab ratio) をとることでレスポンスの不定性を帳消しにし、天体からの正確な信号を得ることにした。Crab は 1054 年に爆発した超新星残骸であり、現在も強烈な X 線を放出している。そのスペクトルはべき (Γ) が 2.10 の単純な power-law で、 $\text{flux} = 2.16 \times 10^{-8} \text{ ergs s}^{-1}\text{cm}^{-2}(@2.0\text{-}10.0 \text{ keV})$ と非常に明るく 500 keV 以上まで信号が検出されている。Crab ratio をとることで、レスポンスの不定性を打ち消し、天体固有のべきや輝線放射、反射成分があるか、など正確な物理的な情報を得ることができる。なお、Crab ratio をとる際、CXB は予め天体のバックグラウンドに組み込んでいるので、図 4.4、図 4.5 には天体からの信号のみを表示している。

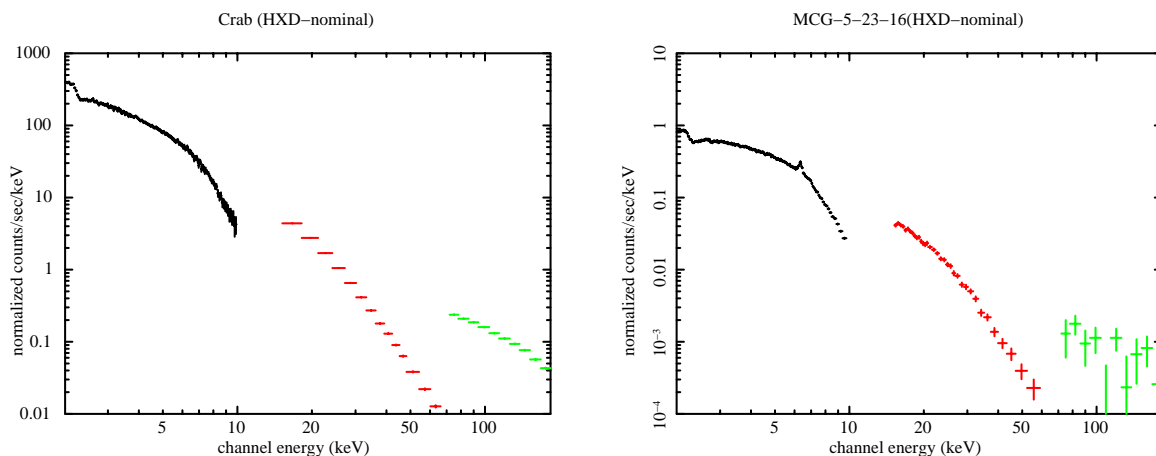


図 4.4: Crab(左) と MCG-5-23-16(右) のスペクトル。縦軸のレンジから、Crab のほうが 100 倍近く「明るい」ことがわかる。

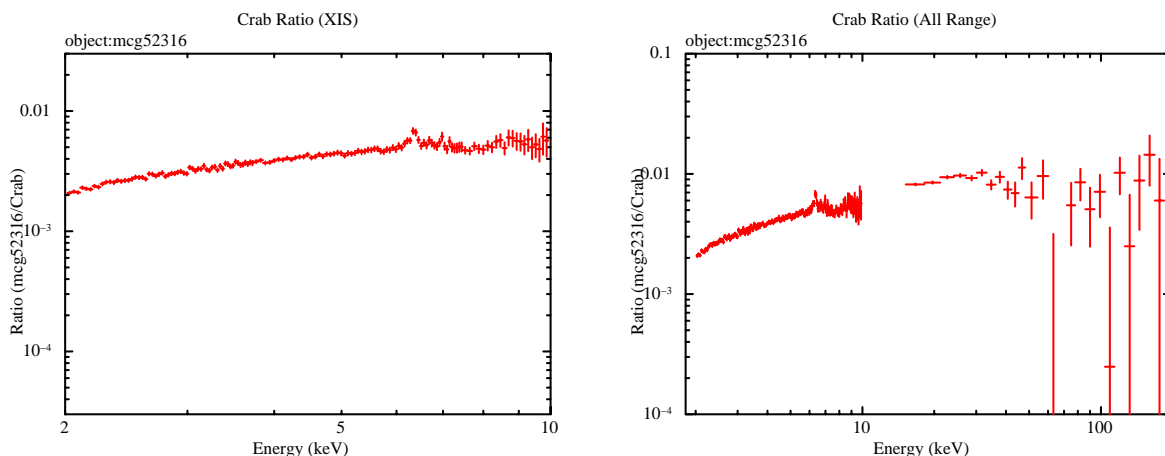


図 4.5: MCG-5-23-16 の Crab ratio。表示しているエネルギー帯域は、それぞれ 2 ~ 10 keV(左) と 2 ~ 200 keV(右) である。

図 4.5 (上) の 6.4 keV と 7.05 keV 付近に輝線があることが確認できる。これは中性の鉄輝線 ($\text{Fe-K}\alpha$: 6.4 keV , $\text{Fe-K}\beta$: 7.05 keV) であるとわかる。また図 4.5(右) の $20 \sim 30 \text{ keV}$ に盛り上がりが見られることから、MCG-5-23-16 には反射成分が含まれていることが推測できる。

4.6 GSO 領域における信号検出の有意性について

ベースモデルでフィッティングを行った結果、MCG-5-23-16 からは 70 keV 以上の信号が検出されていることがわかった。ただ、図 4.3 のフィッティング結果では、データがモデルよりも下に出ているものもあり、天体からの信号を有意に検出しているのか、スペクトル解析から判断することはできない。

検出された信号が有意なものかは、観測データと X 線を検出していないデータとの差をとり、観測データの方が大きいことを示すことができれば良い。そこで今回は、観測データと地没データとの比較を行った。地没とは、すざくが地球を周回している際にターゲット天体が地球に隠れる状態で、天体からの信号はまったく検出しない。そのため、地没データからバックグラウンドデータを差し引くと原理的には信号はほとんど検出されなくなる。同様に観測データからバックグラウンドデータを差し引くと、天体からの固有の信号が得られる。

「観測データ - バックグラウンドデータ」が「地没データ - バックグラウンドデータ」よりも大きいならば、天体からの信号が有意に検出されていると考えてよい。本節では、 $70 \sim 200 \text{ keV}$ 領域におけるバックグラウンドを差し引いた後の両者の残差の違いをみることで、天体の信号が有意であるかを調べた。

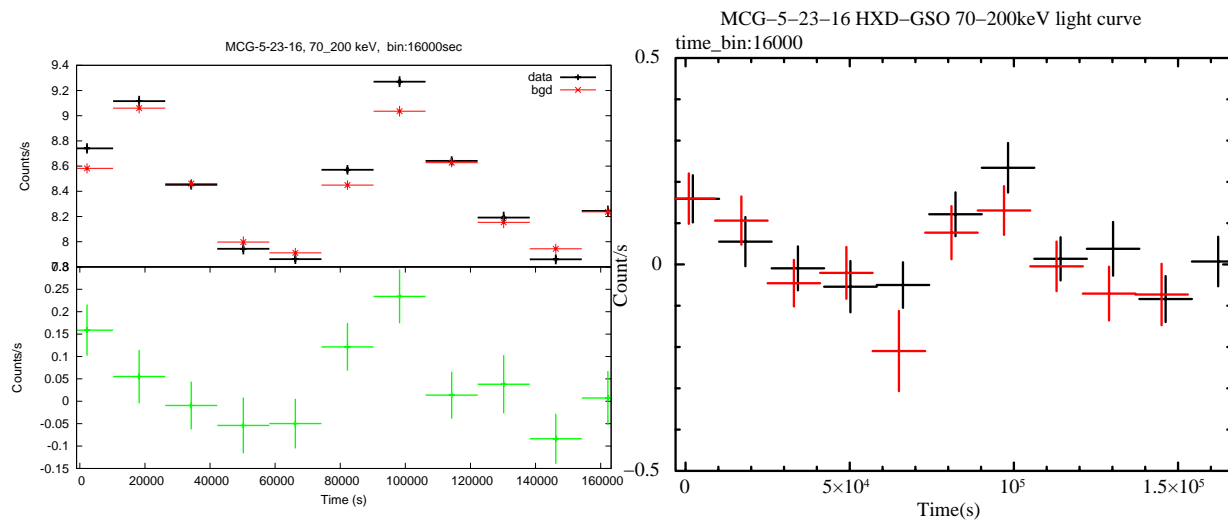


図 4.6: MCG-5-23-16 のライトカーブ。左図：観測データを黒、BGD モデルを赤、両者の差を緑で示す。右図：観測データ (黒) と地没データ (赤) との比較。

図 4.6 (右) より、天体からの信号 (黒) は「地没 - バックグラウンド」データ (赤) よりも全体的に大きいことが確認できる。これより MCG-5-23-16 では、 70 keV 以上の領域でも信号が有意に検出されていると判断した。

4.7.1 部分吸収を含んだモデルでのフィッティング

ベースモデルでフィットした結果 (図 4.3) を見ると、10 keV 以下の領域に「こぶ」のような構造が見えている。このような構造がある天体は、過去の結果と比較して連続成分のべきが小さくなる傾向にある。これは、連続成分に余分な吸収がかかっているために本来よりもべき (Γ) を小さく見積もってしまうためと考えられている。そこでベースモデルの連続成分 (power-law) に部分吸収を加え、どれ程の吸収成分がかかっているか、その際他のパラメータがどのように変化するかを調べた。

表 4.4 より、部分吸収を加えることで power-law のべきは大きくなり、 χ^2/dof も大幅に改善していることがわかる。また、MCG-5-23-16 には「こぶ」の構造が 2 つ見えていたので、吸収体の異なる部分吸収を 2 つ加えてフィッティングを行ったが、目立った改善がみられなかった。そのため、部分吸収は 1 つしか加えていない。

Component	Parameter	Model A×pc	Model A×pc ²	Model B×pc	Model C×pc
-Absorber	N_H (10^{22})	1.56±0.04	1.34±1.55	1.60±0.03	1.46±0.04
-Partial Covering	N_{H1} (10^{22})	70.7±2.06	71.8±2.8	70.2±3.0	80.8±4.4
	f_1	0.38±0.01	0.39±0.01	0.39±0.02	0.38±0.03
	N_{H2} (10^{22})	-	1.19	-	-
	f_2	-	0.24	-	-
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.89±0.01	1.90±0.01	1.92±0.02	1.82±0.03
	N_{hard} (e^{-2})	4.95±0.24	5.08±0.29	5.10±0.26	4.50±0.26
	R	-	-	6.87E-02	0.12±0.10
	E_{cut} (keV)	-	-	1000(fix)	107±20
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.394±0.004	6.394±0.004	6.394±0.004	6.394±0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	44.5±12.9	43.6±13.1	44.8±12.8	47.5±12.2
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.61±0.78	7.56±0.78	7.60±0.78	7.79±0.78
χ^2/dof		326/249	325/247	319/248	289/247

表 4.4: 部分吸収を含んだモデルのフィッティング結果

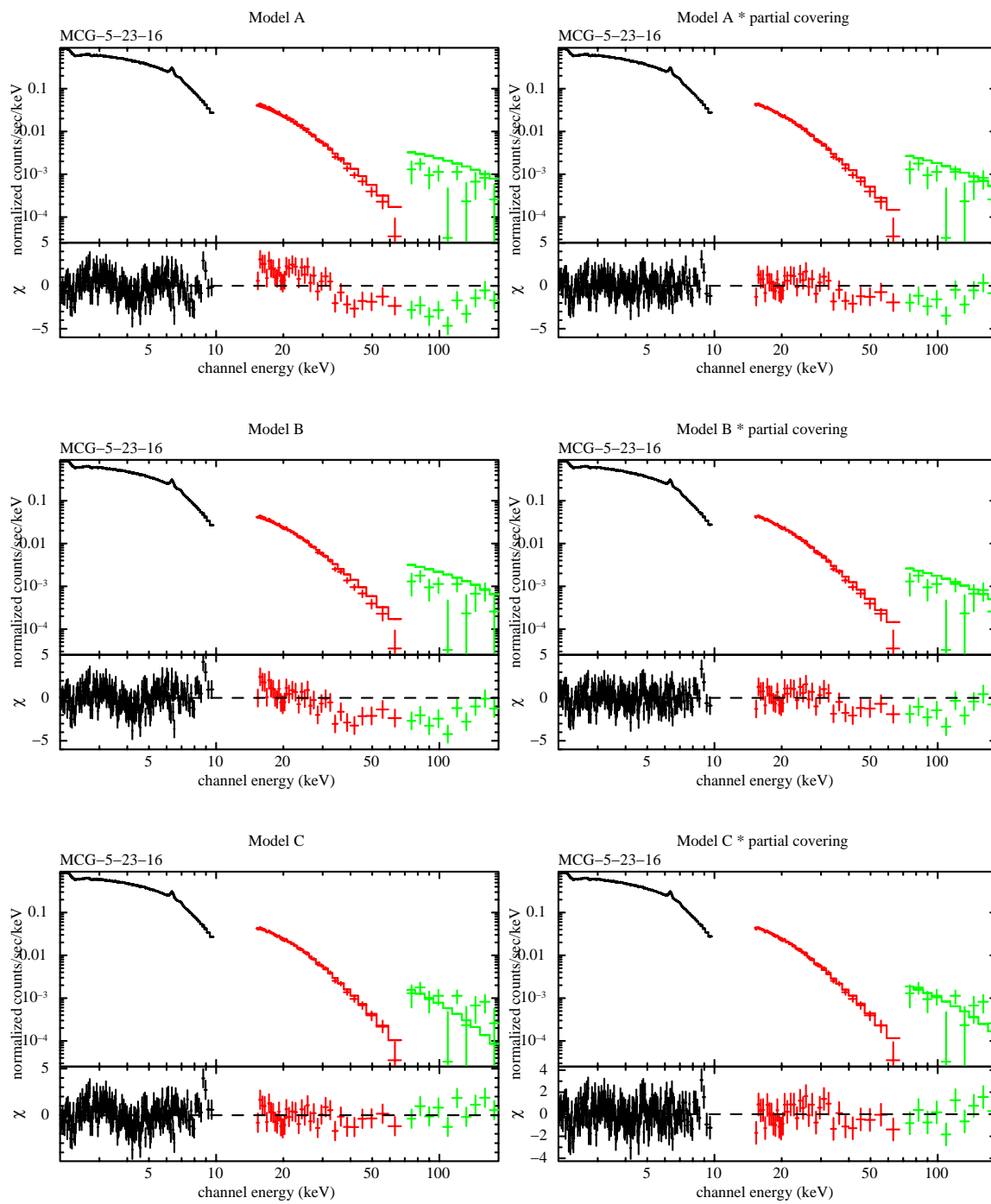


図 4.7: Model A,B,C に部分吸収をかける前後の比較。左が部分吸収をかける前。右がかけた後のフィッティング結果である。

これまでの解析では、反射・吸収成分の物質の元素組成比が太陽のそれと同じと仮定していたが、実際にはそうとは限らない。そこで本節では、鉄の組成比をスペクトルフィッティングで求める試みを行った。鉄を用いた理由は、アバンドンスを決めるエッジの構造が最もはっきりと見えるからである。なおフィッティングは、AGN を取り巻くガスの鉄のアバンドンスと反射成分の鉄のアバンドンスをリンクさせて行っている。

鉄のアバンドンスをフリーにした結果、鉄のアバンドンスは太陽組成比の 60 % 程度であるという結果が出た。ただ、その前後におけるパラメータ値はそれほど変化しておらず、 χ^2/dof も改善しなかった。

Component	Parameter	MCG-5-23-16
-Absorber	N_H (10^{22})	1.61 ± 0.18
-Fe Abundance		0.61 ± 0.33
-Partial Covering	N_H (10^{22})	77.6 ± 6.6
	f	0.37 ± 0.03
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.86 ± 0.06
	N_{hard} (e^{-2})	4.63 ± 0.33
	R	0.24 ± 0.21
	E_{cut} (keV)	118 ± 31
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.394 ± 0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	48.1 ± 12.3
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.84 ± 0.81
χ^2/dof		289/246

表 4.5: 鉄のアバンドンスを導入したときのフィッティング結果

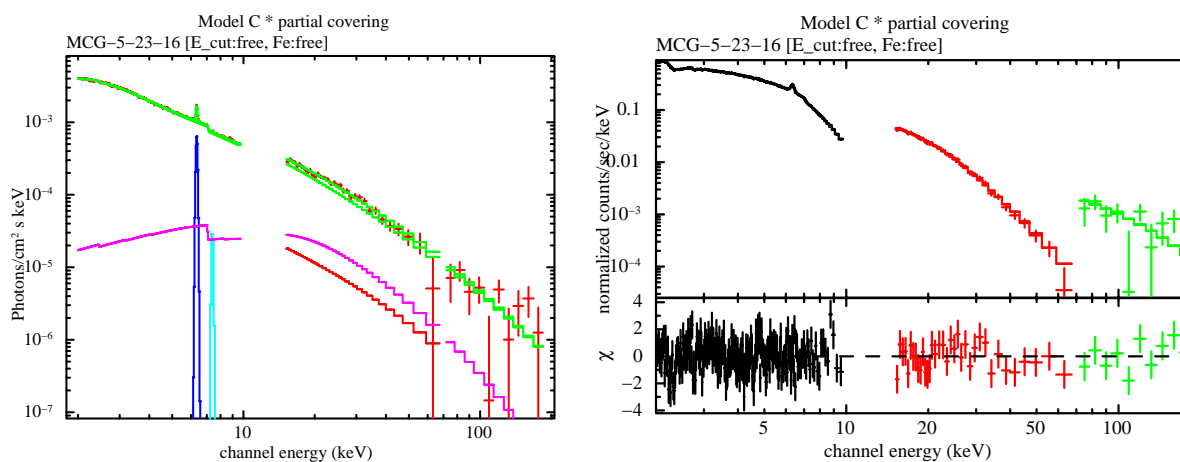


図 4.8: 鉄のアバンドンスをフリーにしたときのスペクトル

第4章6節の観測データと地没データとの比較により、MCG-5-23-16からは70 keV以上の領域でも天体からの信号が有意に検出されていると判断した。ただ図4.6(左)からわかるように、GSO領域における天体からの信号はバックグラウンドモデルの1~2%程度しかなく、非常に明るい天体を除くと、システムティックな不定性が大きく影響してくる。また図4.6(右)では、それぞれバックグラウンドモデルを差し引いた観測データと地没データのライトカーブを比較しているが、本来ゼロ近傍に分布すべき地没データが時間変動していることから、バックグラウンドモデルが正確にノイズを差し引けていない可能性がある。

ただ、観測データのほうが地没データよりもカウントレートが全体的に大きい傾向が見られる。そこで、それぞれバックグラウンドモデルを差し引いた観測データと地没データのライトカーブの差から50-100 keV領域におけるスペクトルを新たに作ってフィッティングし、「観測データ - バックグラウンドモデル」の結果と比較した。なおこの時のモデルは、Model Cに部分吸収を加えたものである(表4.4参照)。

比較の結果、両者間でのパラメータの大きな変動は無く、 Γ や χ^2/dof もほぼ一致していた。したがって、MCG-5-23-16の観測で検出されたGSO領域での信号は、やはり有意であると考えるのが妥当である。また、前節で新たに導入した鉄元素のアバUNDランスも、太陽組成比と変わらない値になっている。

Component	Parameter	data - 地没	data - BGD model
-Absorber	N_H (10^{22})	1.48±0.26	1.46±0.04
-Fe Abundance		0.96±0.80	1.00(fix)
-Partial Covering	N_H (10^{22})	79.3±5.5	80.0±4.4
	f	0.38±0.03	0.38±0.03
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.83±0.06	1.82±0.03
	N_{hard} (e^{-2})	4.53±0.32	4.50±0.26
	R	9.50E-02	0.12±0.10
	E_{cut} (keV)	128±40	107±20
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.394±0.004	6.394±0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	47.9±12.3	47.5±12.2
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.82±0.80	7.79±0.78
	χ^2/dof	286/238	289/247

表 4.6: それぞれバックグラウンドを差し引いた「観測データ - 地没データ」と、従来の「観測データ - バックグラウンドモデル」とのフィッティング結果の比較。

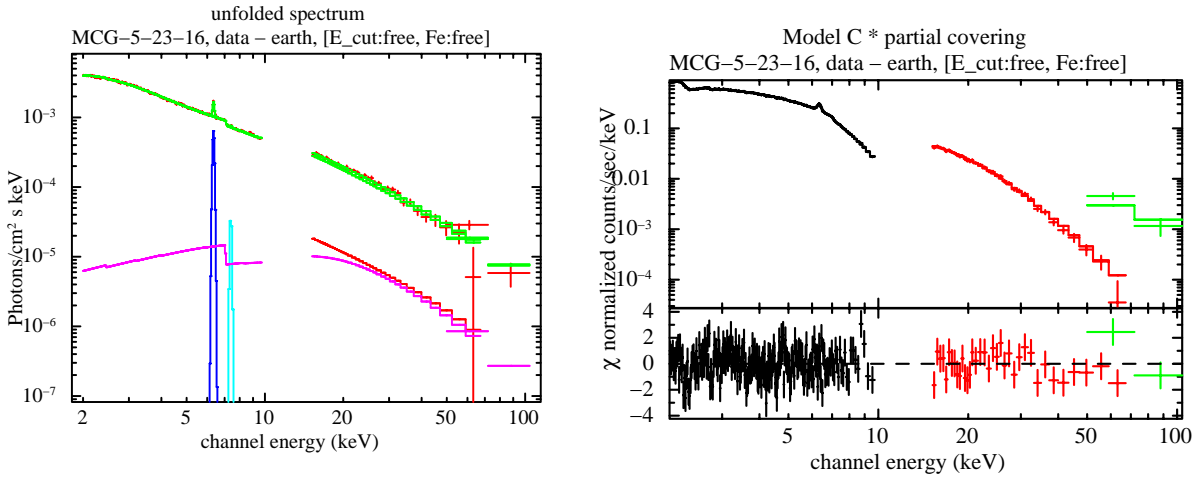


図 4.9: GSO の観測データと地没データとの差分を用いたフィッティング結果

4.9 ベストフィットモデルの決定

これまで、ベースモデルをはじめ様々なモデルを MCG-5-23-16 に対してフィッティングを行い、物理パラメータの最適値を探した。図 4.10 にモデルと χ^2/dof の相関を示す。一般的にモデルの構成要素が多くパラメータ数が多いほど、 χ^2/dof が 1 に近づき、モデルの精度が良くなっていくのがわかる。ただ、Model C に部分吸収を加えたモデル (C * pc) と、さらに鉄のアバundanceを加えたモデル (Fe free) との間では顕著な改善が見られない。さらに鉄のアバundanceを導入しても太陽組成比とほとんど変わらない結果が得られている (第 4 章 8 節参照) ことから、MCG-5-23-16 のベストフィットモデルは Model C に部分吸収を加えたモデル (Model C * pc) であると決定した。

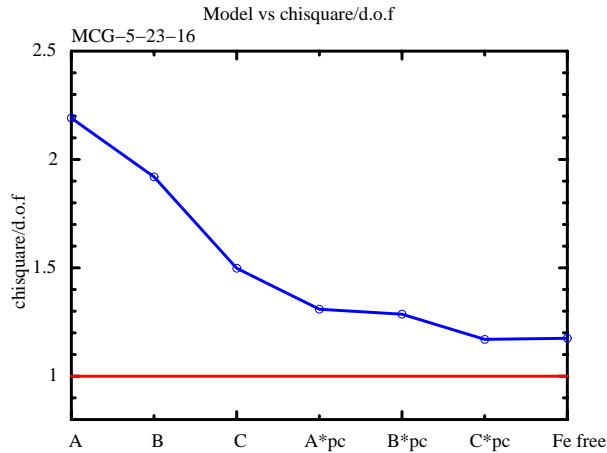


図 4.10: モデルと χ^2/dof との相関。横軸はモデル名で、pc は部分吸収を表す。

第5章 まとめと考察

第4章では、MCG-5-23-16 を用いた一連の解析作業を説明した。本章では、解析を行った全ターゲットの結果を総括し、AGN の統一的な描像を探る。

5.1 各天体のベストフィットモデル

まず各々のターゲットについて、どのモデルが観測データをより良く再現しているか χ^2/dof の値を参考にしてベストフィットモデルを決定した。図 5.1 に各天体におけるモデルの再現性の変化について、ベストフィットモデルとモデルに含まれる物理パラメータを表 5.1 に示す。また、パラメーター一覧を表 5.2、モデル成分を図 5.2 に示す。

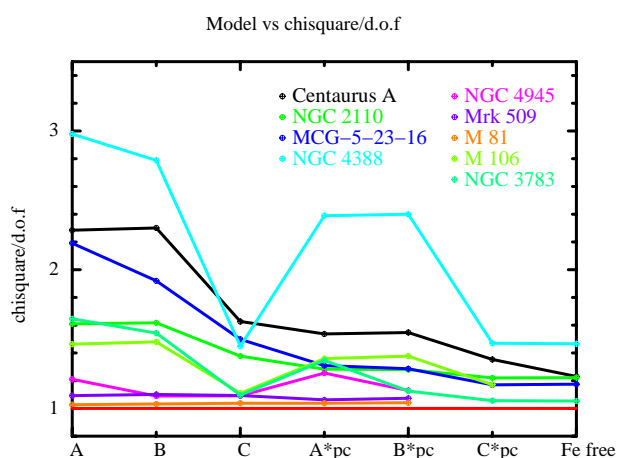


図 5.1: モデルと χ^2/dof との相関。 χ^2/dof が 1 に近づくほど、データに対するモデルの再現性が高いとされる。

	Best Fitted Model	R	E_{cut}	pc	A_{Fe}	$\chi^2/d.o.f$
Cen A	Model C*pc					326/265
NGC 2110	Model C*pc				×	299/245
MCG-5-23-16	Model C*pc				×	289/247
NGC 4388	Model C*pc [†]				×	197/136
NGC 4945	Model B		×	×	×	61/56
Mrk 509	Model A*pc	×	×		×	103/97
M 81	Model A	×	×	×	×	226/220
M 106	Model C			×	×	86/78
NGC 3783	Model C*pc					326/309

表 5.1: 個々のベストフィットモデルに含まれるパラメータについて。R:反射成分、 E_{cut} : カットオフエネルギー、pc:部分吸収、 A_{Fe} :鉄のアバンダンスを示す。†:べきを固定して部分吸収をかけている(次節参照)。

Best Fitted Model	Parameter	Centaurus A	NGC 2110	MCG-5-23-16
		Model C*pc	Model C*pc	Model C*pc
-Absorber	N_H (10^{22})	11.1±0.4	4.13±0.17	1.46±0.05
-Fe Abundance		0.73±0.05	-	-
-Partial Covering	N_H (10^{22})	38.2±5.2	43.8±6.7	80.8±4.4
	f	0.19±0.02	0.14±0.23	0.38±0.03
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.83±0.03	1.70±0.02	1.82±0.02
	N_{hard} (e^{-2})	13.2±0.7	3.66±0.19	4.50±0.26
	R	4.90E-03	5.70E-03	0.12±0.10
	E_{cut} (keV)	361	214	107±20
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	15.5	18.3	-
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.395±0.002	6.401±0.004	6.394±0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	31.4±8.2	34.1±14.1	47.5±12.2
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	24.6±1.5	6.69±0.75	7.79±0.79
χ^2/dof		326/265	299/245	289/247

Best Fitted Model	Parameter	NGC 4388	NGC 4945	Mrk 509
		Model C*pc [†]	Model B	Model A*pc
-Absorber	N_H (10^{22})	27.5±0.8	540±39	0.00
-Fe Abundance		-	-	-
-Partial Covering	N_H (10^{22})	65.2±5.8	-	0.00
	f	0.55±0.02	-	0.95
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.75(fix)	1.92±0.06	1.80±0.01
	N_{hard} (e^{-2})	2.35±0.16	6.61±1.71	1.29±0.02
	R	0.21±0.13	0.20±0.07	-
	E_{cut} (keV)	148±32	1000(fix)	-
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	1.40±0.50	6.6±7.0	-
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.401±0.002	-	6.590±0.059
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	25.1±9.2	-	378±77.2
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.67±0.42	-	7.90±2.58
χ^2/dof		191/131	61/56	103/97

Best Fitted Model	Parameter	M 81	M 106	NGC 3783
		Model A	Model C	Model C*pc
-Absorber	N_H (10^{22})	2.09E-16	9.78±0.66	0.33±0.20
-Fe Abundance		-	-	1.96±1.10
-Partial Covering	N_H (10^{22})	-	-	25.9±12.2
	f	-	-	0.08
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.88±0.02	1.38±0.29	1.58±0.15
	N_{hard} (e^{-2})	0.335±0.021	0.24±0.12	0.98±0.24
	R	-	7.17E-03	1.79±0.35
	E_{cut} (keV)	-	11.6±7.4	42.8±16.0
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	-	2.67±3.79	-
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.615±0.034	6.409±0.029	6.392±0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	233±43	0.00	19.1±16.9
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	1.52±0.43	0.558±0.242	7.10±0.60
χ^2/dof		226/220	86/78	326/309

表 5.2: 各天体のベストフィットモデルパラメータ

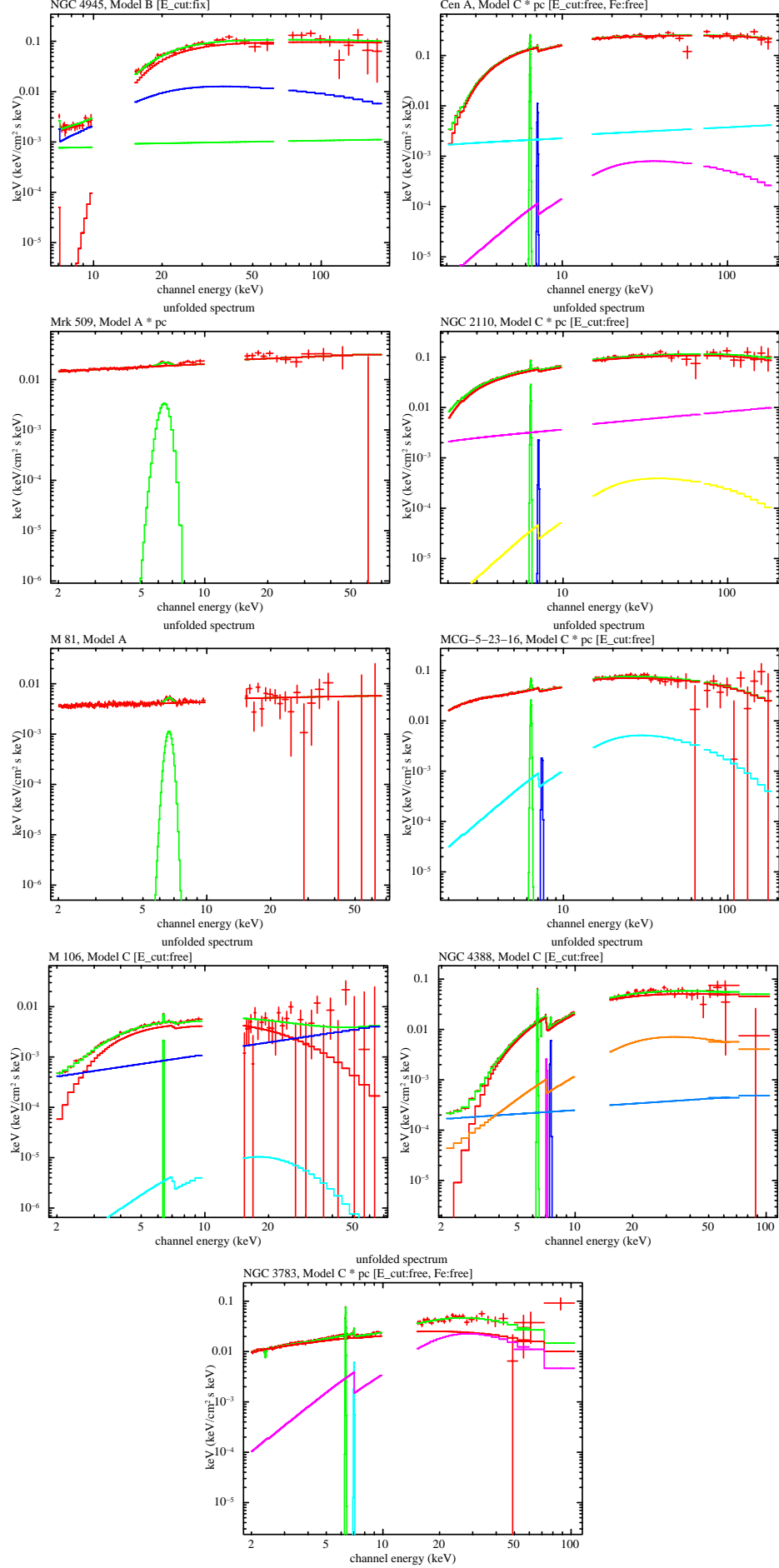


図 5.2: ベストフィットモデルの成分を個々に表示している。なお、CXB は取り除いている。

これまでの、典型的な AGN のモデルを用いてスペクトル解析を行ってきた。しかし、中には χ^2/dof 値がよいものの、物理的描像がうまく説明できない天体もある。そのような天体に対し、新たに条件を加えて再フィットを行った。

5.2.1 NGC 4388 の再フィット

NGC 4388 のフィッティング結果 (表 A.8) より、連続成分のべき (Γ) は 1.19 ± 0.04 、 E_{cut} は 37.2 ± 3.8 (keV) と他の AGN と比較して小さな値をとっている。これは、連続成分の曲がり激しいためにべきが小さくなり、その結果 E_{cut} が小さくなってしまっていることを示している。そのため、連続成分の曲がり方を補正するために反射成分だけに吸収成分をかけて再フィットを行った (表 5.3 中の add phabs)。しかし、 $\Gamma \cdot E_{cut}$ とともに値は大きくなり、改善がみられなかった。

次に、NGC 4388 は時間変動している (図 A.16) ことを利用して、明るいときと暗いときの差分スペクトルを作り、新たに Γ を求めることにした。天体からの信号のうち、明るい時間帯のものを天体からの信号、暗い時間帯のものをバックグラウンドとみなし、両者の差を取ることで、バックグラウンドモデルの不定性を考慮しないで済むようになる。Shirai et al. [24] によると、差分スペクトルの Γ は 1.75 と求められている。そこで、 $\Gamma = 1.75$ に固定した Model C に部分吸収を加えたモデルで再フィットを行った。

Γ を固定した結果、 Γ 、 E_{cut} とともに値が改善し、一般的なセイファート銀河の値を取るようになった。また、 χ^2/dof 値は以前より悪くなったものの、これは power-law 成分が本来に近い状態になった結果、7.5 keV の Ni-K α や 6.6 keV の吸収線がより顕著に表れるようになったため輝線を加えることで改善した。

したがって、今後 NGC 4388 のパラメータは Γ を固定し輝線を 2 本加えたモデルの結果を用いることにする。

Component	Parameter	Model C×pc	add phabs	$\Gamma=1.75$ (fix)	add line
-Absorber	N_H (10^{22})	26.6 ± 1.46	9.72 ± 5.66	28.3 ± 0.94	27.5 ± 0.77
	$N_{H_{Ref}}$ (10^{22})	-	52.9	-	-
-Partial Covering	N_H (10^{22})	29.7 ± 20.7	20.7 ± 3.4	52.7 ± 7.7	65.2 ± 5.7
	f	0.20 ± 0.12	0.95 ± 0.06	0.47 ± 0.03	0.55 ± 0.03
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.27 ± 0.04	1.30 ± 0.05	1.75(fix)	1.75(fix)
	N_{hard} (e^{-2})	0.62 ± 0.01	0.68 ± 0.14	1.91 ± 0.12	2.35 ± 0.16
	R	0.50 ± 0.16	0.83 ± 0.30	0.48 ± 0.15	0.22 ± 0.13
	E_{cut} (keV)	44.6 ± 5.7	38.9 ± 5.7	263 ± 80	148 ± 33
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	0.95 ± 0.19	1.02 ± 0.34	1.08 ± 0.44	1.40 ± 0.50
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.400 ± 0.002	6.400 ± 0.002	6.400 ± 0.002	6.402 ± 0.002
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	33.3 ± 7.2	30.6 ± 7.2	15.8 ± 9.5	25.1 ± 9.2
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	8.39 ± 0.43	8.26 ± 0.41	7.65 ± 0.38	7.67 ± 0.41
-Gaussian	$E_{NiK\alpha}$ (keV)	-	-	-	7.498 ± 0.016
	$I_{NiK\alpha}$ (e^{-5})	-	-	-	1.11 ± 0.27
-Gaussian	Absorption (keV)	-	-	-	6.696 ± 0.015
	$I_{Absorption}$ (e^{-5})	-	-	-	-1.12 ± 0.29
χ^2/dof		197/134	216/133	352/135	191/131

表 5.3: NGC 4388 における再フィットの結果。 $N_{H_{Ref}}$ は反射成分にのみかかる吸収成分。

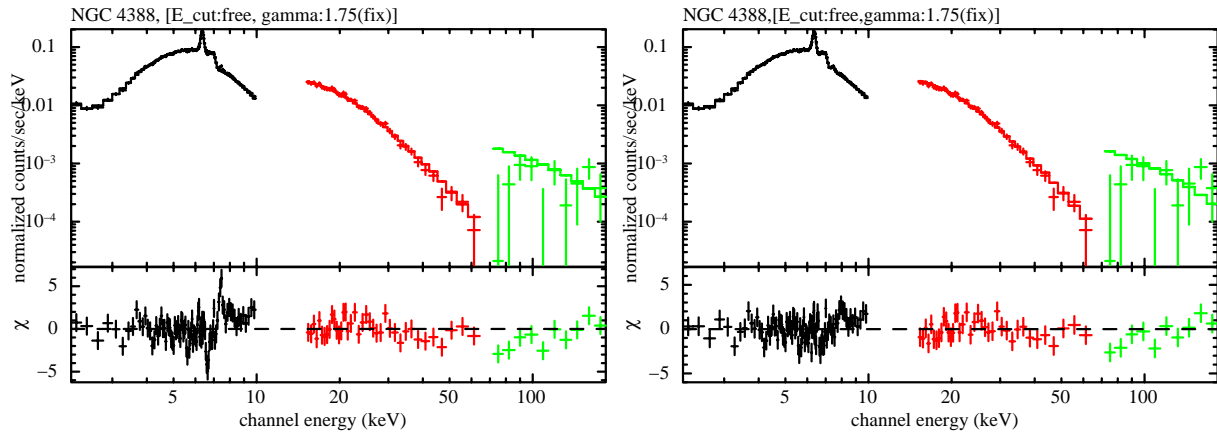


図 5.3: NGC 4388 を再フィットしたときのスペクトル。左図は $\Gamma=1.75$ に固定したとき、右図は Γ を固定後、さらに輝線を 2 本加えたときの結果である。

5.2.2 M 106 の再フィット

AGN における連続成分のべき (Γ) とカットオフエネルギー (E_{cut}) の典型的な値は、それぞれ $\Gamma = 1.7 \sim 2.0$ 、 $E_{cut} \sim 100$ keV であるが、M 106 は Γ 、 E_{cut} ともに極端に小さい値を取っている。図 5.2 で M 106 のベストフィットモデル成分を見てみると、power-law 成分が 30 keV 以上で大きく影響しており、このような描像は通常では考えられない。

power-law がおかしい振る舞いをした主な原因は、低エネルギー側のモデルをべきを固定した power-law で再現したためと考えられる。そこで、低エネルギー側のスペクトルをプラズマ放射をモデル化した brems model で再現するようにしてフィッティングを行った。

解析の結果を表 5.4 に示す。 χ^2/dof 値が最もよくなったのは、Model C に相当する $E_{cut}:free$ である。 Γ はエラーの範囲で典型的な値と一致するが、 E_{cut} はまだ低い値のままである。 E_{cut} を改善させる他の要因として、PIN 領域におけるバックグラウンドモデルに不定性が考えられる。ただデータの統計が少ないこともあり、これ以上の解析は行わない。したがって今後用いる M 106 のパラメータは、Model C に相当する $E_{cut}:free$ のものを用いることにする。

Component	Parameter	$E_{cut}:fix$ (Model B)	$E_{cut}:free$ (Model C)	$\Gamma:fix$ (Model C)
-Absorber	N_H (10^{22})	10.5 ± 0.4	9.51 ± 1.50	10.3 ± 0.5
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.85 ± 0.14	1.47 ± 0.39	$1.70(fix)$
	N_{hard} (e^{-3})	4.02 ± 1.38	2.54 ± 1.96	3.46 ± 0.29
	$R(e^{-3})$	8.41 ± 5.2	7.84	8.05 ± 7.35
	$E_{cut}(keV)$	$1000(fix)$	20.0 ± 6.9	38.9 ± 27.4
-brems	kT (keV)	$7.0(fix)$	$7.0(fix)$	$7.0(fix)$
	N (e^{-4})	4.02	3.84	4.02
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.409 ± 0.028	6.409 ± 0.029	6.409 ± 0.028
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	0.00	0.00	0.00
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-6})	5.83 ± 2.46	5.44 ± 2.53	5.66 ± 2.41
χ^2/dof		100/77	80/76	87/77

表 5.4: M 106 における再フィットの結果

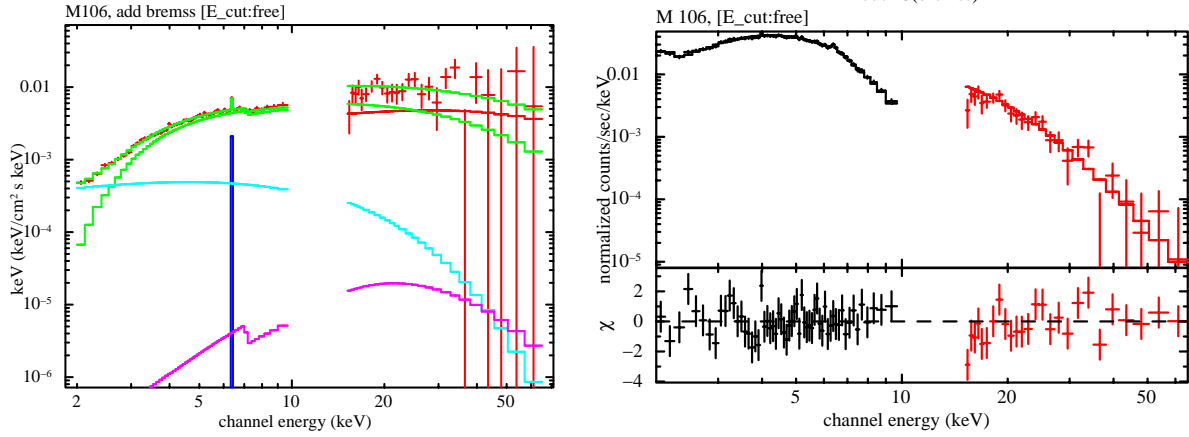


図 5.4: M 106 を再フィットしたときのスペクトル (右) と個々の成分を表示したもの (左)。

5.2.3 NGC 3783 の再フィット

上述の天体と同様、フィッティング結果 (表 B.1) は連続成分のべき (Γ) が 1.58 ± 0.15 、 E_{cut} も 42.8 ± 16.0 (keV) とこちらも比較的小さい値になっている。そこで NGC 4388 と同様、はじめに反射成分にのみ吸収成分をかけて再フィットを行った。その結果、 χ^2/dof に変化は無かったものの、 $\Gamma \cdot E_{cut}$ とともに典型的なセイファート銀河の値に近づいた。さらに鉄元素のアバundanceをフリーにしても大きな変化は見られなかった。また、時間変動しているライトカーブの明るい時間帯と暗い時間帯の差を取って作成したスペクトルからも同様の結果を得ることができた。これらの結果より、今後 NGC 3783 のパラメータは吸収成分を新たに加え鉄元素のアバundanceを固定したモデルの結果を用いることにする。

Component	Parameter	Model C * pc	add phabs [Fe:fix]	add phabs[Fe:free]
-Absorber	N_H (10^{22})	0.33 ± 0.20	0.60 ± 0.38	0.57 ± 0.45
	$N_{H_{Ref}}$ (10^{22})	-	2.86	1.91
-Fe Abundance		1.96 ± 1.10	1.00 (fix)	1.03 ± 0.64
-Partial Covering	N_H (10^{22})	25.9 ± 12.2	20.7 ± 10.4	20.5 ± 7.7
	f	0.08	0.15 ± 0.05	0.15 ± 0.09
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.58 ± 0.15	1.76 ± 0.05	1.76 ± 0.19
	N_{hard} (e^{-2})	0.98 ± 0.24	1.33 ± 0.35	1.30 ± 0.57
	R	1.79 ± 0.35	2.81 ± 0.59	1.81 ± 0.66
	E_{cut} (keV)	42.8 ± 16.0	69.3 ± 19.1	67.6 ± 39.2
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.392 ± 0.004	6.392 ± 0.004	6.392 ± 0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	19.1 ± 16.9	23.4 ± 15.1	23.2 ± 15.3
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.10 ± 0.60	7.18 ± 0.59	7.18 ± 0.60
χ^2/dof		326/309	327/309	327/308

表 5.5: NGC 3783 における再フィットの結果。 $N_{H_{Ref}}$ は反射成分にのみかかる吸収成分

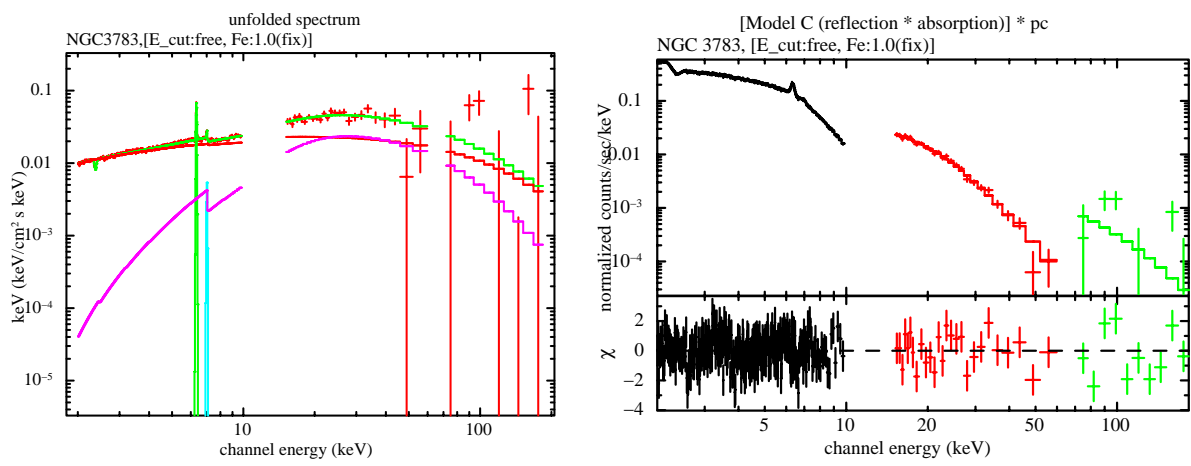


図 5.5: NGC 3783 を再フィットしたときのスペクトル (右) と個々の成分を表示したものの (左)。

5.3 得られたパラメータの相関及び過去の結果との比較

本節では、解析から得られたパラメータを同時プロットし、AGNにおける統一的解釈を行う。なお同時プロットの際、ターゲット天体を低光度活動銀河核 (Low Luminosity AGN: LLAGN) 及び吸収体の厚さ ($N_H = 10^{23}$ を境界) によって3つに分類して表示している。対応関係は以下のとおりである。

- ・黒 (LLAGN) : M81, M106
- ・赤 ($N_H > 10^{23}$) : Cen A, NGC 4388, NGC 4945
- ・緑 ($N_H < 10^{23}$) : NGC 2110, MCG-5-23-16, Mrk 509, NGC 3783

5.3.1 吸収成分と鉄輝線の等価幅

図 5.6 に鉄輝線の等価幅 (Fe-EW) の求まった 6 天体の結果を示す。現在考えられている AGN 統一モデルでは、中心天体の周りをトーラスが覆っている (図 2.1)。そのため Risaliti et al.[19] によると、我々は天体固有の吸収を受けたものを直接成分として観測していることになる。一方、鉄輝線は離れた領域から放射されているので、吸収を受けることはない。そのため、天体固有の吸収 N_H が大きいほど直接成分が吸収を受けるので、結果的に Fe-EW が大きくなるとされている。また、 $N_H = 30 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ を境に Fe-EW の値が変わることも示唆されている (第 2 章図 2.15 参照)。

今回得られた結果は、Risaliti et al の示す描像に矛盾しないものである。ただ天体数が少なく、境界とされる $N_H = 30 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ 程度の吸収をもつ天体が無いため、これ以上の議論は難しい。

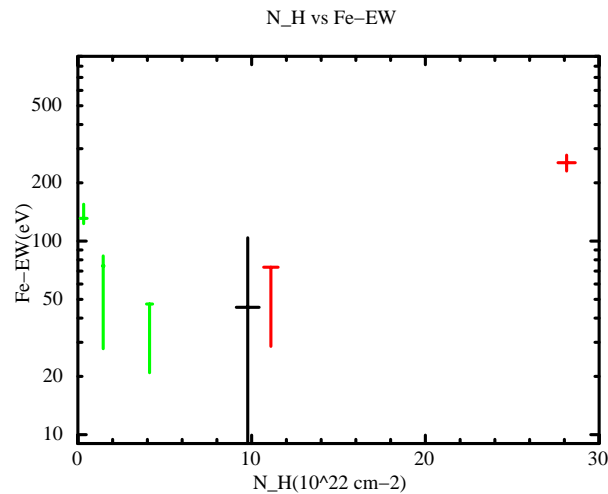


図 5.6: N_H と鉄輝線の等価幅との相関

5.3.2 連続成分のべき (Γ) と反射成分・カットオフエネルギー

今回の解析結果からは、 Γ と反射成分、カットオフエネルギー間における明らかな相関はみられなかった。ただパラメータを個別にみていくと、それぞれに対して制限を加えることができる。

M 106 のとる値が 1.47 ± 0.39 と小さいものの、その他はエラーを考慮しても $1.7 \sim 2.0$ に分布している。全体の平均値は $\Gamma_{ave} = 1.75 \pm 0.08$ 、分散は 0.0159 ± 0.0156 である。LLAGN である M 106 を除くと $\Gamma'_{ave} = 1.79 \pm 0.03$ 、分散は $(4.37 \pm 0.38) \times 10^{-3}$ となり、厳しい制限をつけることができた。 Γ がほぼ一定であることから、降着円盤周辺の高温プラズマに物理状態が推測できる。Petrucci et al.[25] によれば、 Γ と高温プラズマの間にはプラズマの温度を T_e 、光学的厚さを τ として以下のような関係があるとされている。

$$\Gamma - 1 \sim \left(\frac{9}{4} + \frac{m_e c^2}{k T_e \tau (1 + \tau/3)} \right)^{1/2} - \frac{3}{2} \quad (5.1)$$

本解析結果では Γ が天体に依らずほぼ一定であるから、プラズマの温度と光学的厚さの積がある値になるようにうまくカップリングされている必要がある。プラズマの状態を決める主な要因として降着円盤付近でのエネルギー収支が考えられるが、質量降着率などを考慮する必要があり、一意的に求まるものではない。ただし、逆コンプトン散乱で叩き上げられる光子はプラズマの温度を超えることはないとされているので、カットオフエネルギーに制限を加えることでプラズマの物理的描像を推定することが可能となると考えられる。

反射成分

個々の天体によって、様々な値を取り得る。反射成分のパラメータである R は、ソースから反射体を見込む立体角 Ω として $R = \Omega/2\pi$ 定義されている。 Ω は最大でも 4π であるから、理論上 R には $0 \leq R \leq 2$ の制限がつく。今回の解析結果は、この制限に対してエラーの範囲内でおさまっており、特に問題は無い。NGC 3783 を除く天体の R 値は 0.2 以下であることから、反射成分の寄与は少ないことがわかる。また、NGC 3783 の R 値は 2 に近い。このため X 線の放射領域周辺には、ほぼ全天を覆うようにガスなどの反射体が存在していると考えられることができる。

カットオフエネルギー

図 5.7 より、M 106 以外の AGN のカットオフエネルギーは 70 keV 以上のエネルギー領域に存在している。解析した結果のほとんどは不定性が大きいことから、これ以上の包括的な議論は行わない。

MCG-5-23-16 や NGC 3783 のように E_{cut} 値に制限がかかっている場合、降着円盤近傍の高温プラズマの温度を推定することができる。例えば MCG-5-23-16 の場合、 $E_{cut} = 107 \pm 20 \text{ keV}$ である。Petrucci et al. [25] によると、 $N_H \leq 1.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ 程度の光学的に薄い天体について、ボルツマン定数を k 、プラズマの温度を T として、おおよそ $kT \equiv \frac{1}{2} E_{cut}$ で表される。したがって、MCG-5-23-16 を取り巻くプラズマの温度は $T \sim 6.21 \pm 1.16 \times 10^8 \text{ K}$ であると推定される。なお Petrucci et al. では、理論式の値と実際のモデルフィットとの値を比較すると、理論の方が低めに出てしまうことが示されており、今後確認が必要である。

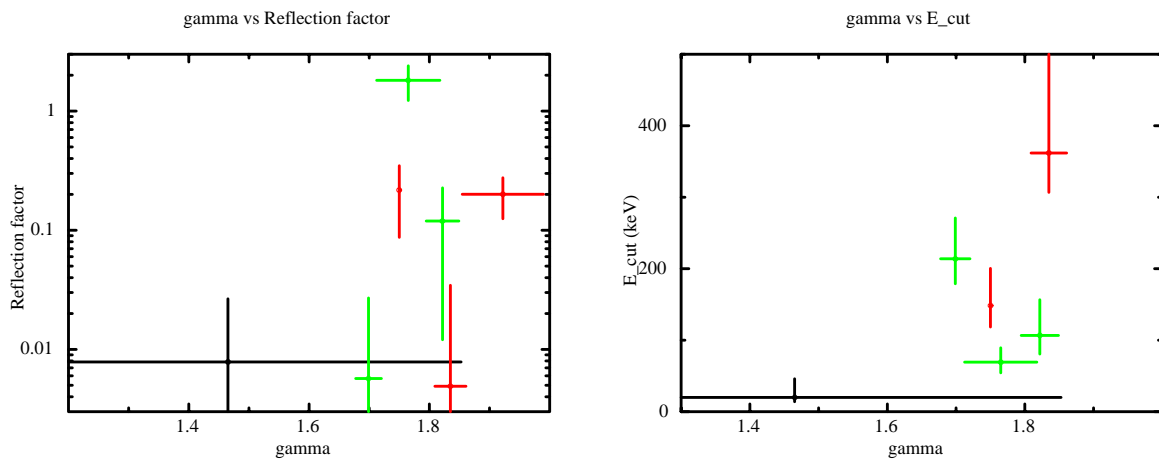


図 5.7: 左図 : Γ と Reflection factor との相関。右図 : Γ とカットオフエネルギーの相関。

図 5.8 に 7 天体の相関を示す。NGC 4945 はもともとモデルに鉄輝線を入れておらず、M106 は $\sigma \sim 0$ だったので除いた。まず σ が 200 eV 以上を示す天体が 2 つ (M 81, Mrk 509) ある。M 81 は Dewangan et al.[26] より Fe-K α 、Fe-K β が存在することがわかっている。一方 Mrk 509 は Pounds et al.[27] より、XMM-Newton によって Fe-K α とともに 6.7 ~ 6.9 keV 付近に弱い輝線が検出されている。本研究では、始めから広範なエネルギー領域を一度に解析しており、Fe-K α を先にフィッティングさせている。そのため Fe-K α 近傍に弱い輝線があると、2 つの輝線を 1 つでフィッティングしてしまうので、中心値・輝線幅ともに大きくなってしまったと考えられる。

次に Fe-K α 近傍の結果を示す (図 5.8 右図)。ほとんどが 6.4 keV 近傍にあり、AGN からの鉄輝線放射は中性の鉄由来であることが推測できる。さらに、実験室系での輝線の波長を λ_0 、観測される波長を λ とすると、 $E = h\nu$ とドップラーシフトの式

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad (5.2)$$

より、放射している物質の運動速度を見積もることができる。例えば NGC 2110 の場合、 $E_{K\alpha} = 6.401$ keV, $\sigma = 34$ eV より $\lambda \sim 0.193$ nm と求まるから、式 (5.2) に代入すると、 $v \sim 1550$ km/s と求めることができる。

また物理状態を単純化することで、鉄の存在する領域が推定できる。いま中心天体の周りを物質が円運動していると仮定する。中心天体の質量を M 、物質の質量を m 、中心からの距離を r 、角速度を ω とすると、

$$mr\omega^2 = G\frac{Mm}{r^2} \quad (5.3)$$

中心天体の質量を $M = 10^8 M_\odot$ とすると、物質は $r \sim 5.56 \times 10^{15}$ m ~ 0.185 pc のところに存在する。これにより、鉄輝線の放射領域は Narrow Line Region (NLR) であると考えられる。

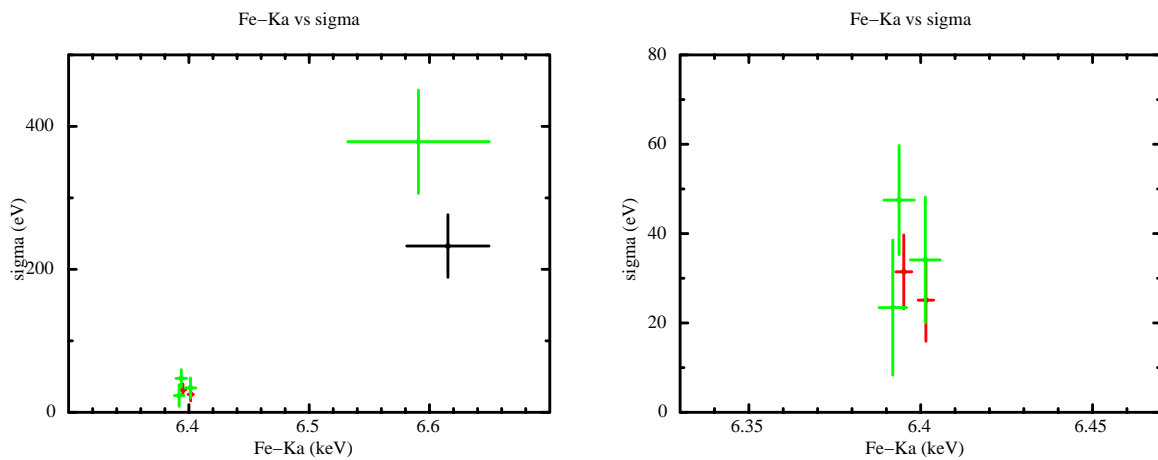


図 5.8: 左図：鉄輝線の中心値と輝線幅との相関図。右図：6.4 keV 近傍を拡大したもの。

本研究では、AGN の中でも比較的近傍にあるセイファート銀河 9 つを 2~200 keV という広範なエネルギー領域で解析することで、包括的な物質構造の解釈を試みた。AGN の構造を明らかにするには、10 keV 以上の硬 X 線領域に表れる中心天体からの放射を直接捉えることが不可欠である。これまで硬 X 線領域はノイズが圧倒的に多かったため、正確な信号の検出は困難であった。わが国 5 番目の X 線天文衛星「すざく」は、徹底したバックグラウンド除去による優れた S/N 比と広帯域同時観測を実現しており、AGN の解析を進めるには極めて効果的な手段である。

AGN は統一モデルによって一定の理解がなされている。そこで、始めに典型的なモデルによるスペクトル解析を行った。しかし、AGN からの放射は単純ではなく、様々な要素が絡み合っており複雑な構造を示していることがわかった。次に個々の天体を詳しく解析を行い、得られたパラメータどうしの相関をとったところ、2 つのパラメータに制限を加えることができた。

- 平均的な連続成分のべきは 1.75 ± 0.08 である
- 鉄輝線は中性鉄からの放射であり、その放射領域は Narrow Line Region である

天体に依らずパラメータ値を制限できたことは、AGN の統一的な理解につながる。ただ今回の解析では、反射成分と他のパラメータとの間に相関があることは確認できず、カットオフエネルギーについてもエラーが大きかったため制限を加えることはできなかった。

AGN 周辺の物質構造及び分布を探ることは、ブラックホールや銀河の進化過程を知るための重要なアプローチとなる。本研究ではセイファート銀河のみ解析したが、今後他の AGN を同様に解析することで、AGN 全体の進化に迫ることができると期待する。

付 録 A 各天体の解析結果

A.1 Centaurus A

A.1.1 ベースモデルでのフィッティング

Component	Parameter	Model A	Model B	Model C	M.Dadina et al
-Absorber	N_H (10^{22})	11.2 ± 0.1	11.2 ± 0.1	10.8 ± 0.1	~ 0.1
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.77 ± 0.01	1.77 ± 0.01	1.68 ± 0.01	$1.80^{+0.03}_{-0.02}$
	N_{hard}	0.102 ± 0.001	0.102 ± 0.002	0.089 ± 0.001	
	R	-	$4.98E-03$	$5.07E-03$	≤ 0.30
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	142 ± 48	≥ 252
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-3})	1.95 ± 0.10	1.94	1.63	
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.395 ± 0.002	6.395 ± 0.002	6.395 ± 0.002	$6.43^{+0.07}_{-0.07}$
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	47.1 ± 5.8	47.2 ± 5.7	45.2 ± 5.9	
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-4})	2.76 ± 0.13	2.76 ± 0.14	2.73 ± 0.14	
$F_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				2.07E-10	1.89E-10
$F'_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				3.73E-10	
χ^2/dof		617/270	619/269	436/268	

表 A.1: ベースラインのベストフィットパラメータと過去の論文との比較。モデルに AGN 固有の吸収成分を含むフラックスを F、含まない元来のフラックスを F' とする。

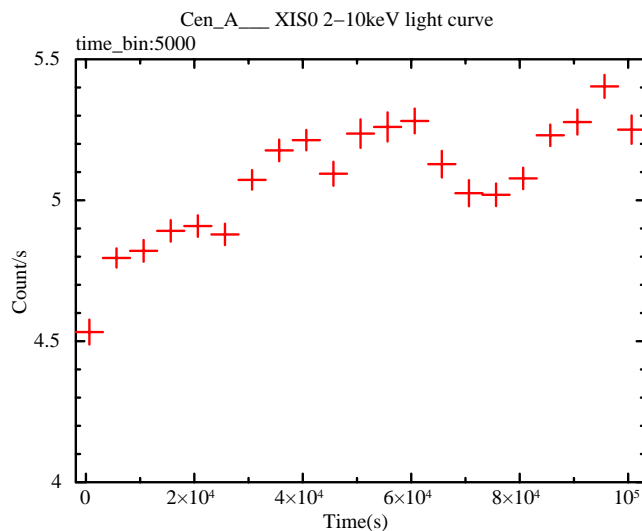


図 A.1: 2 ~ 10 keV 領域のライトカーブ。

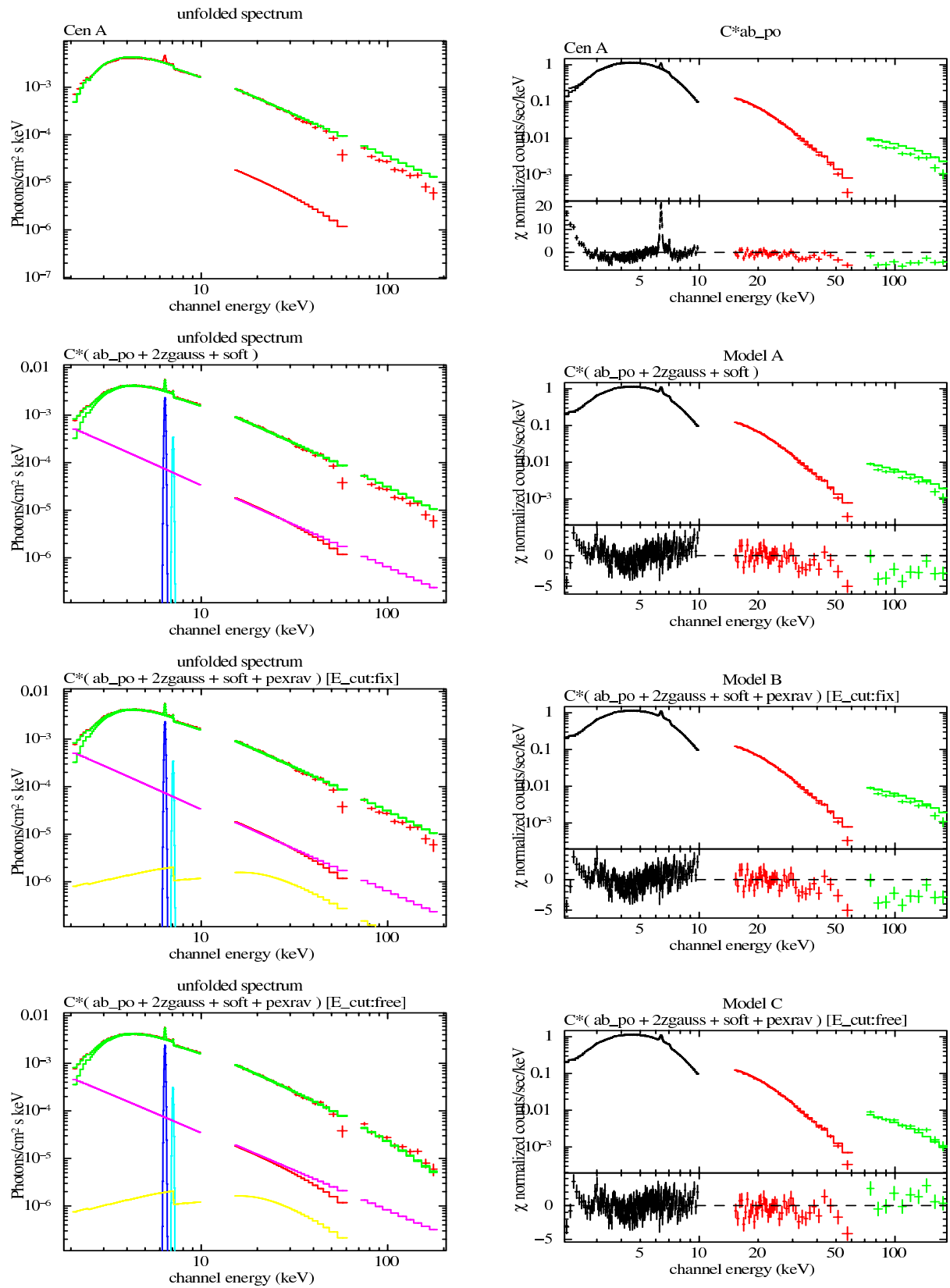


図 A.2: ベースラインモデルによるフィッティング結果

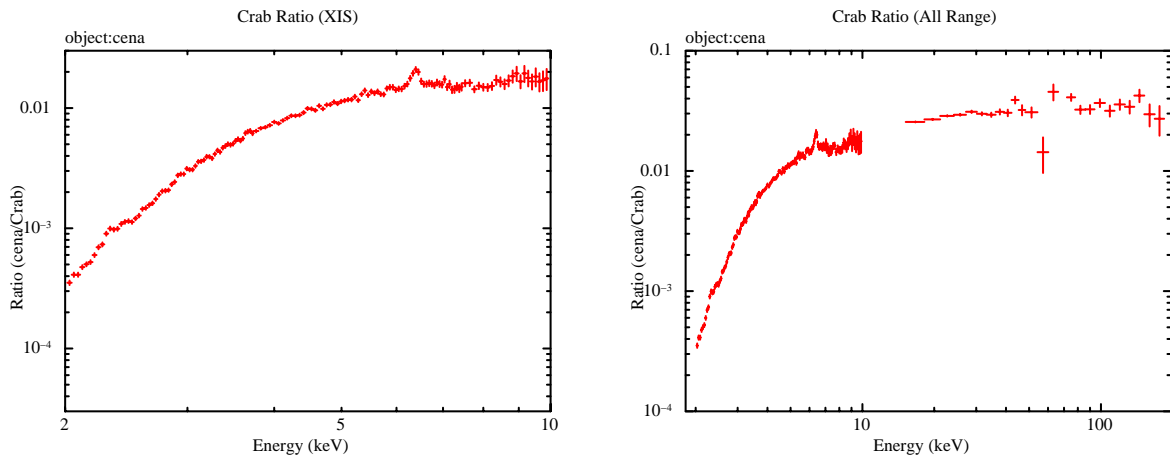


図 A.3: Cen A の Crab ratio。2 ~ 10 keV(左) と 2 ~ 200 keV(右)

A.1.3 GSO 領域における信号検出の有意性について

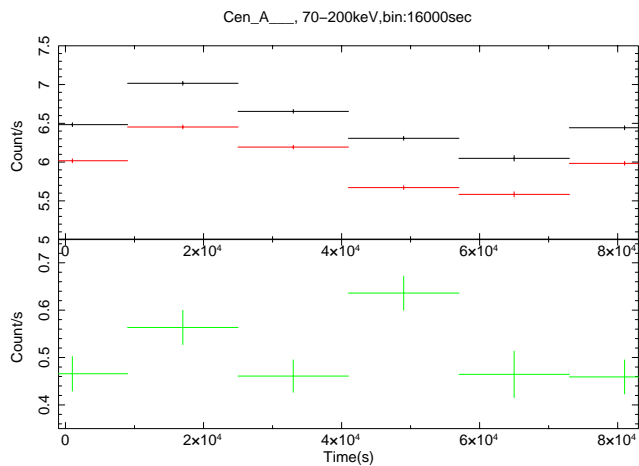


図 A.4: Cen A のライトカーブ。左図：観測データを黒、BGD モデルを赤、両者の差を緑で示す。(注)Cen A 自体の地没観測はなく、前日観測の地没データも行われていなかったため、地没データとの比較は省略している。

Component	Parameter	Model A×pc	Model B×pc	Model C×pc
-Absorber	N_H (10^{22})	10.5±0.1	10.4±0.2	10.3±0.3
-Partial Covering	N_H (10^{22})	30.5±3.2	27.5±3.3	26.2±4.8
	f	0.21±0.01	0.21±0.01	0.17±0.01
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.85±0.01	1.81±0.02	1.77 ±0.01
	N_{hard}	0.13±0.01	0.13±0.01	0.11±0.01
	R	-	4.88E-03	4.92E-03
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	219±160
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-3})	1.51±0.18	1.44	1.37
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.395±0.002	6.395±0.002	6.395±0.002
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	27.3±8.6	28.2±8.6	32.0±8.0
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-4})	2.37±0.14	2.38±0.15	2.46±0.15
χ^2/dof		412/268	413/267	360/266

表 A.2: Cen A

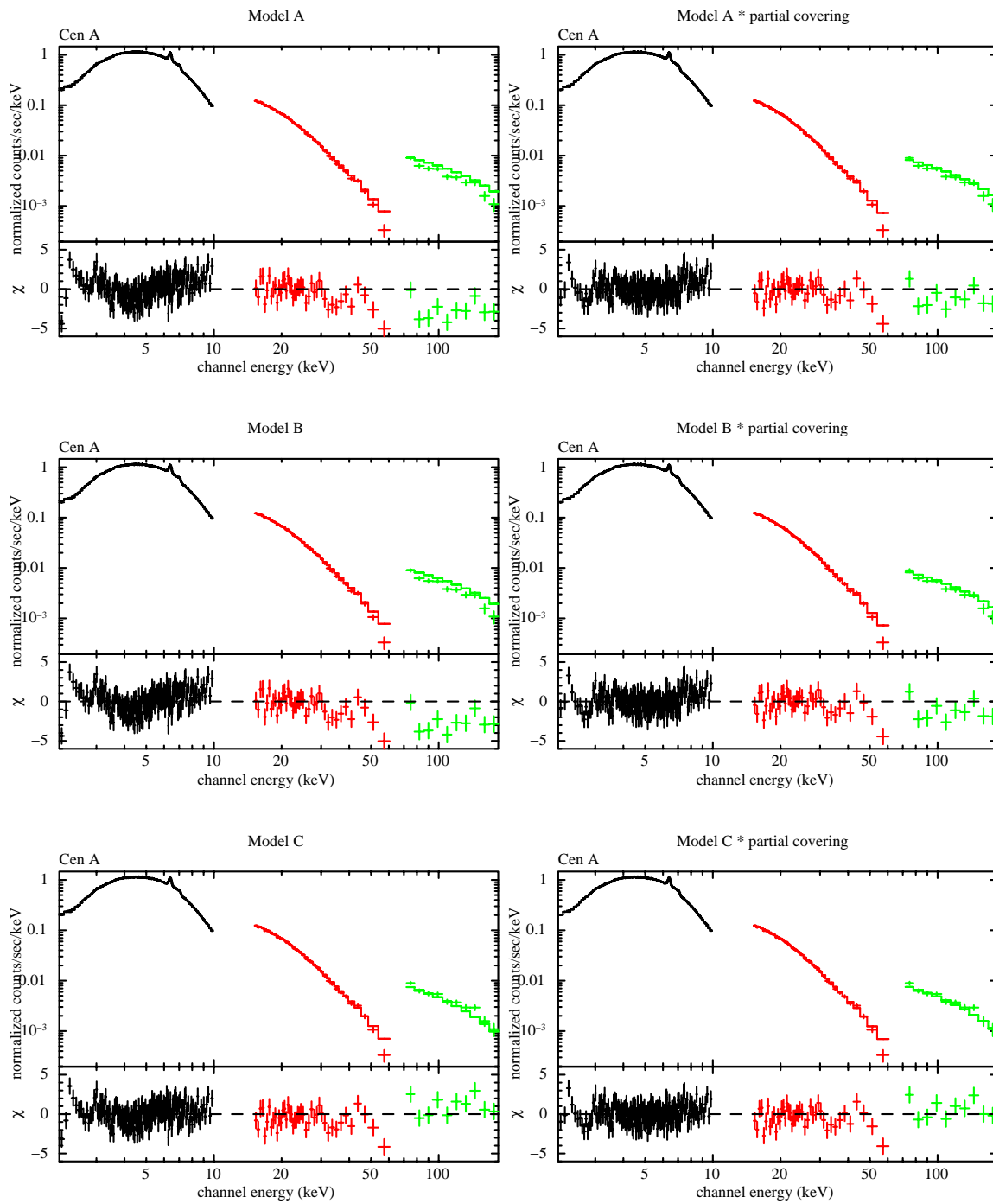


図 A.5: Model A, B, C に部分吸収をかける前後の比較

Component	Parameter	Model A	Model B	Model C	M.Dadina et al
-Absorber	N_H (10^{22})	4.50 ± 0.09	4.49 ± 0.12	4.06 ± 0.11	~ 0.04
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.67 ± 0.01	1.67 ± 0.01	1.59 ± 0.01	$1.74^{+0.20}_{-0.13}$
	N_{hard} (e^{-2})	2.99 ± 0.02	2.99 ± 0.05	2.72 ± 0.05	
	R	-	$6.93\text{E-}20$	$3.45\text{E-}04$	$0.60^{+1.38}_{-0.57}$
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	136 ± 82	≥ 70.5
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-3})	2.86 ± 0.34	2.81	1.99	
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.401 ± 0.004	6.401 ± 0.004	6.401 ± 0.004	$6.41^{+0.07}_{-0.14}$
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	55.7 ± 9.6	55.5 ± 9.7	52.1 ± 9.9	
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	8.03 ± 0.71	8.02 ± 0.72	7.83 ± 0.71	
$F_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				$1.05\text{E-}10$	$3.00\text{E-}11$
$F'_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				$1.35\text{E-}10$	
χ^2/dof		401/249	401/248	340/247	

表 A.3: ベースラインのベストフィットパラメータと過去の論文との比較。モデルに AGN 固有の吸収成分を含むフラックスを F 、含まない元来のフラックスを F' とする。

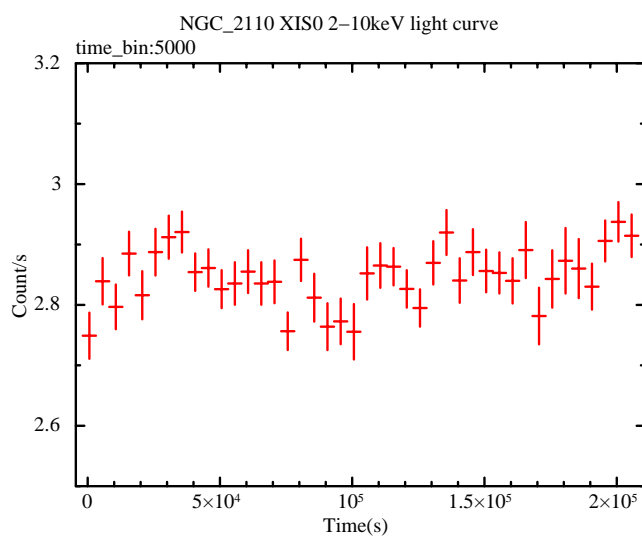


図 A.6: 2 ~ 10 keV 領域のライトカーブ。

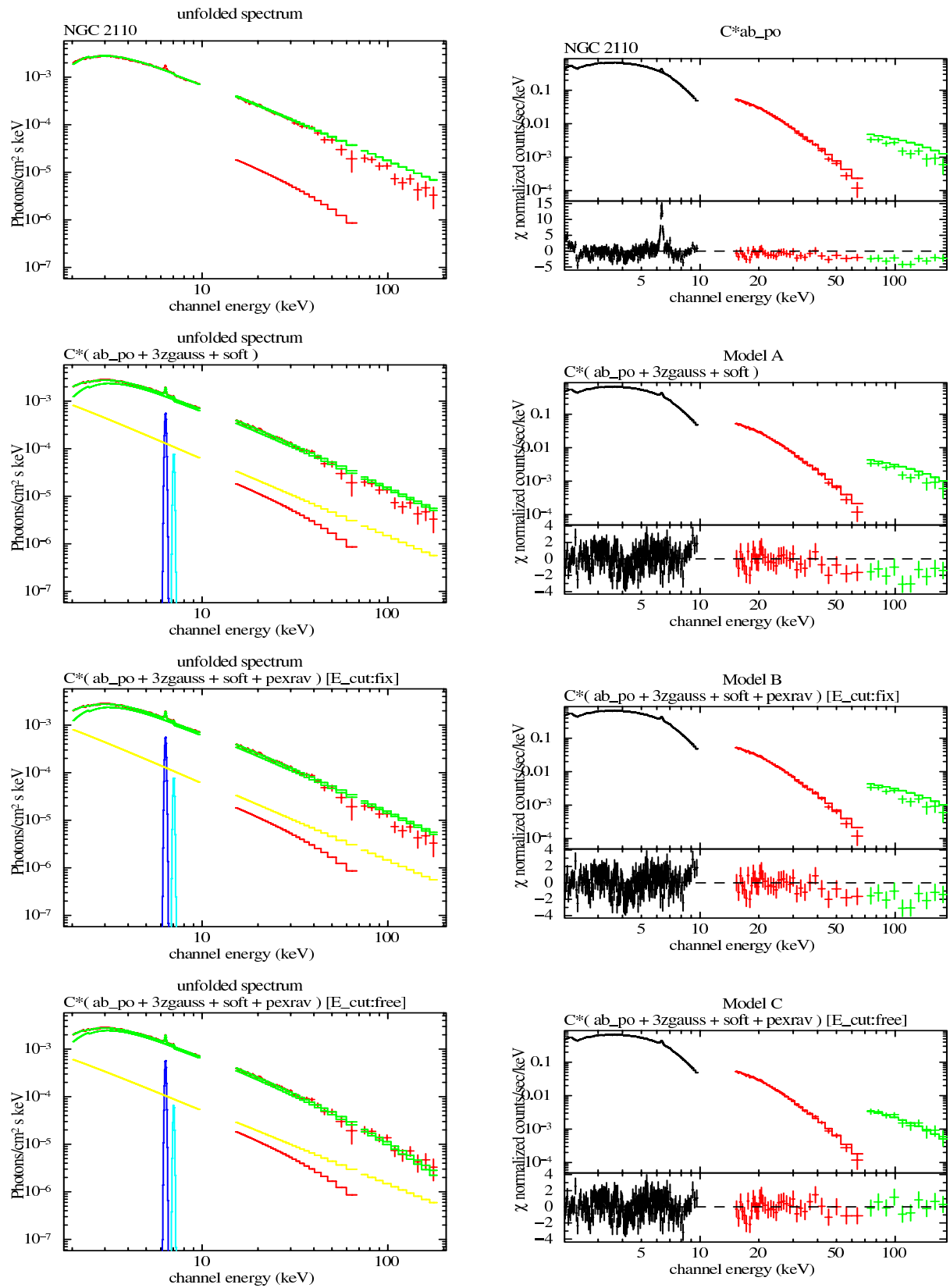


図 A.7: ベースラインモデルによるフィッティング結果

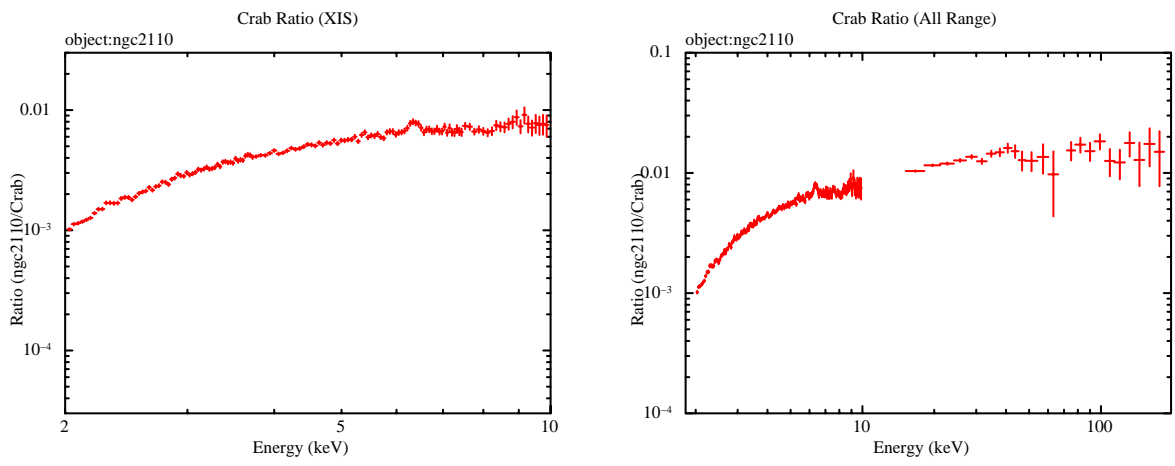


図 A.8: NGC 2110 の Crab ratio. 2 ~ 10 keV(左) と 2~ 200 keV(右)

A.2.2 GSO 領域における信号検出の有意性について

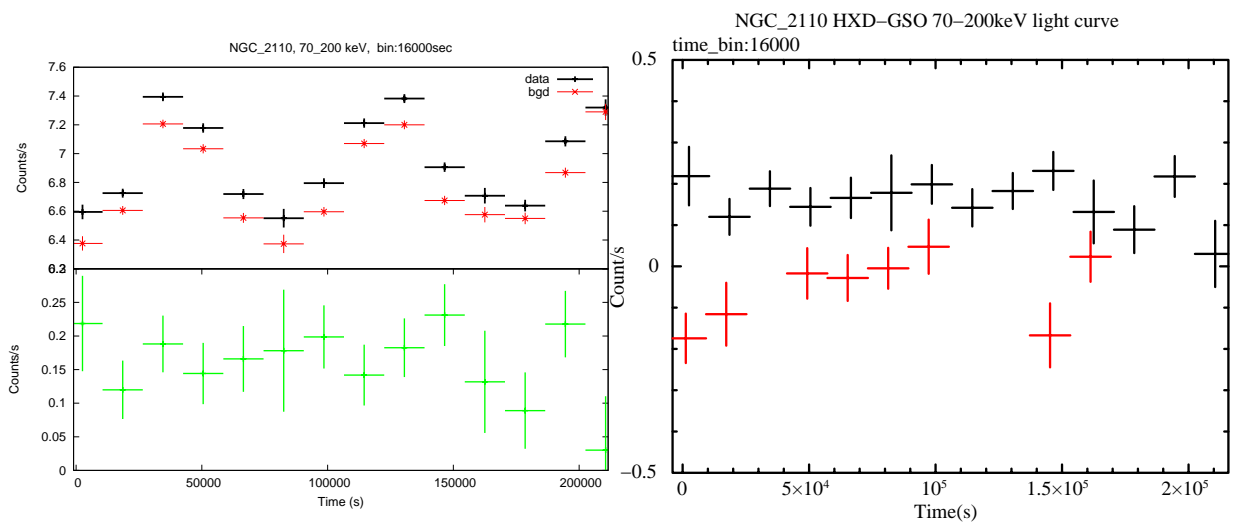
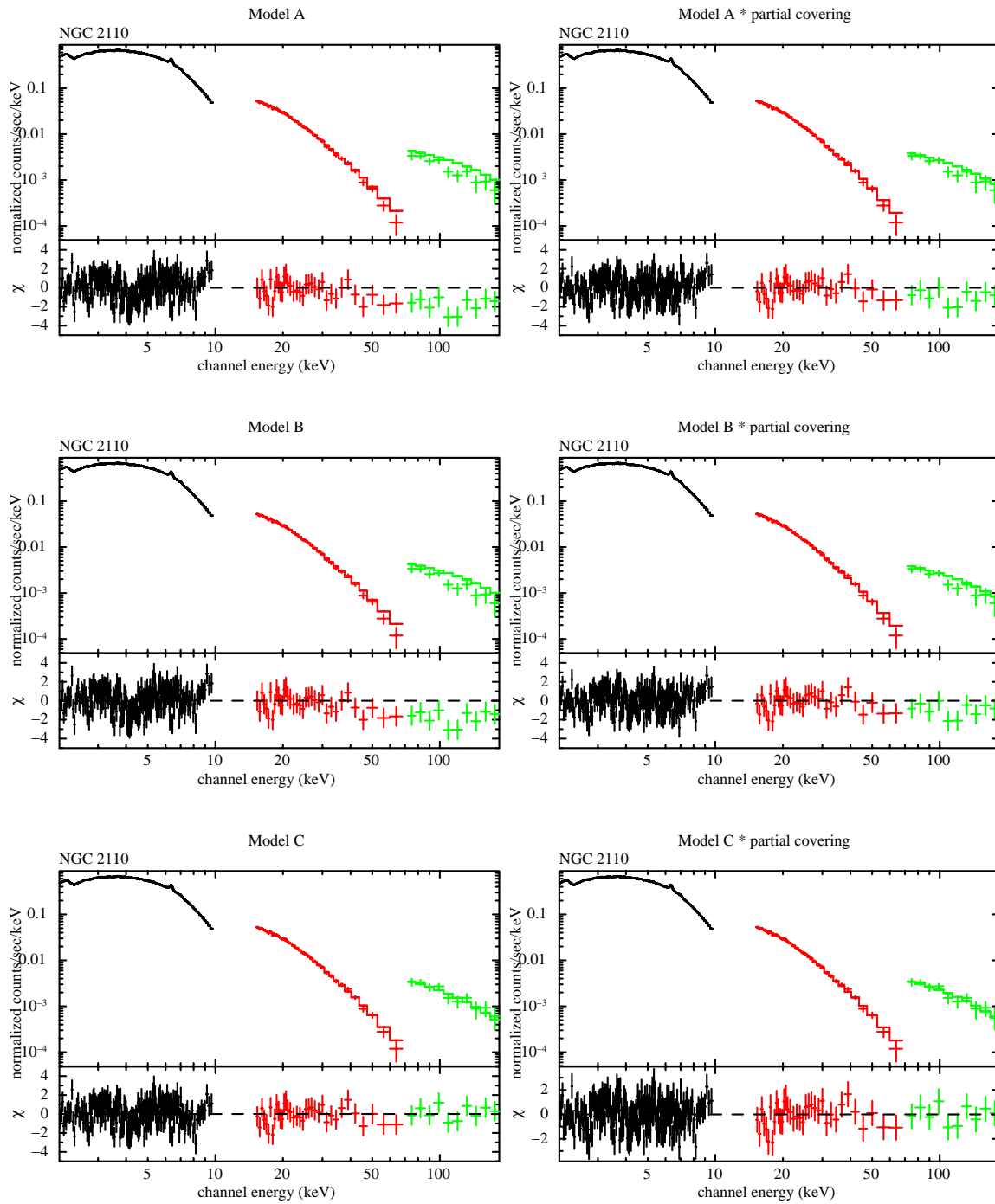


図 A.9: NGC 2110 のライトカーブ。左図：観測データを黒、BGD モデルを赤、両者の差を緑で示す。右図：観測データ (黒) と地没データ (赤) との比較

Component	Parameter	Model A×pc	Model A×pc ²	Model B×pc
-Absorber	N_H (10^{22})	4.34±0.14	2.88±2.25	4.29±0.16
-Partial Covering	N_{H1} (10^{22})	43.9±4.6	44.8±6.1	41.3±4.6
	f_1	0.18±0.02	0.18±0.03	0.17±0.02
	N_{H2} (10^{22})	-	1.83±3.02	-
	f_2	-	0.77	-
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.77±0.01	1.77±0.01	1.76±0.02
	N_{hard} (e^{-2})	4.22±0.17	4.30±0.37	4.13±0.22
	R	-	-	5.62E-03
	E_{cut} (keV)	-	-	1000(fix)
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-3})	2.19±0.61	1.71	2.10
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.401±0.004	6.401±0.004	6.401±0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	27.6±15.3	28.8±15.3	30.5±14.9
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	6.39±0.70	6.40±0.73	6.49±0.73
χ^2/dof		317/247	315/245	315/246

表 A.4: NGC 2110



☒ A.10: Model A, B, C に部分吸収をかける前後の比較

Component	Parameter	Model A	Model B	Model C	M.Dadina et al
-Absorber	N_H (10^{22})	1.09 ± 0.02	1.26 ± 0.03	1.18 ± 0.03	~ 0.01
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.66 ± 0.01	1.75 ± 0.01	1.70 ± 0.02	$1.79^{+0.07}_{-0.08}$
	N_{hard} (e^{-2})	2.16 ± 0.02	2.44 ± 0.04	2.32 ± 0.05	
	R	-	0.46 ± 0.06	1.05 ± 0.12	$0.74^{+0.22}_{-0.52}$
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	74.2 ± 8.1	191^{+110}_{-60}
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.397 ± 0.005	6.397 ± 0.004	6.396 ± 0.004	$6.49^{+0.08}_{-0.08}$
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	88.6 ± 6.9	90.6 ± 6.9	74.6 ± 8.3	
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-4})	1.09 ± 0.07	1.10 ± 0.07	0.97 ± 0.08	
$F_{2-10keV}$ (ergs $cm^{-2}s^{-1}$)				8.61E-11	9.29E-11
$F'_{2-10keV}$ (ergs $cm^{-2}s^{-1}$)				9.46E-11	
χ^2/dof		550/251	481/250	373/249	

表 A.5: ベースラインのベストフィットパラメータと過去の論文との比較。モデルに AGN 固有の吸収成分を含むフラックスを F、含まない元来のフラックスを F' とする。

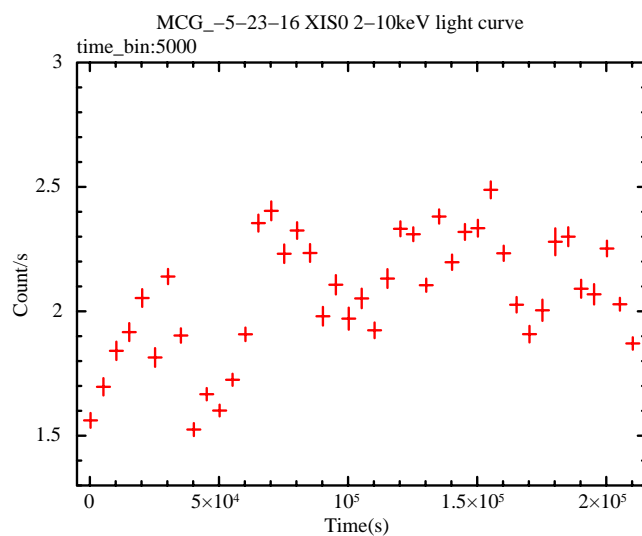
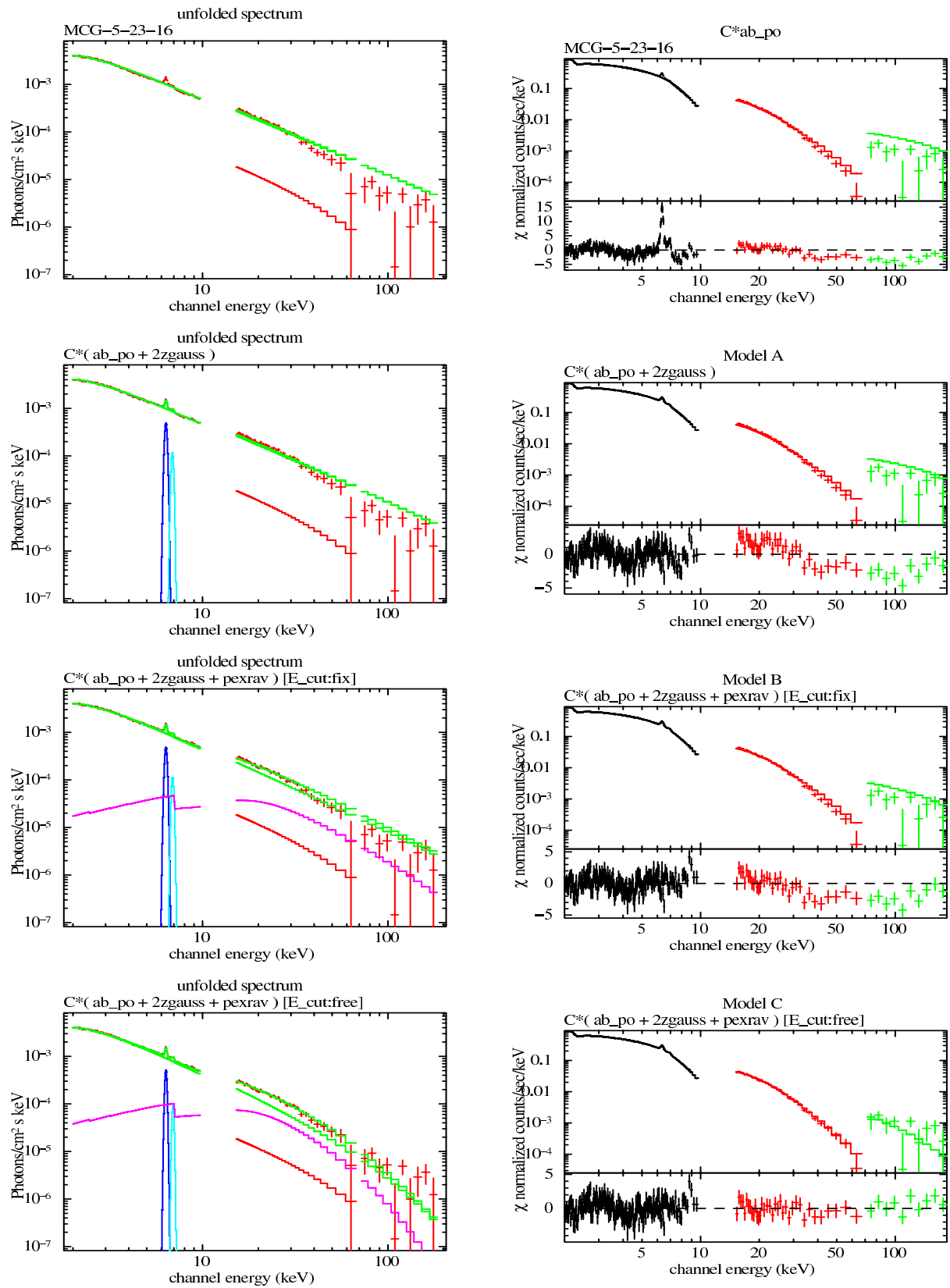


図 A.11: 2 ~ 10 keV 領域のライトカーブ。



☒ A.12: ベースラインモデルによるフィッティング結果

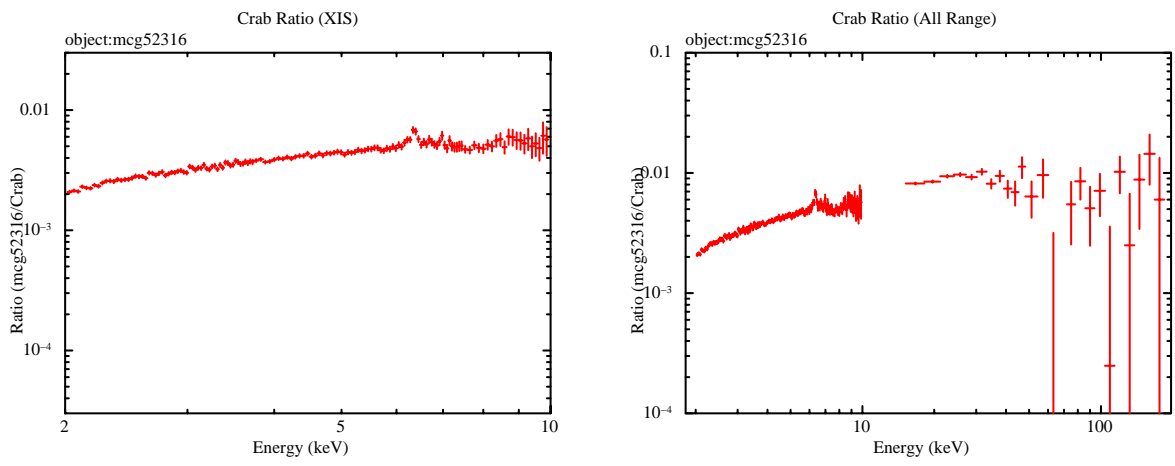


図 A.13: MCG-5-23-16 の Crab ratio. 2 ~ 10 keV(左) と 2~ 200 keV(右)

A.3.2 GSO 領域における信号検出の有意性について

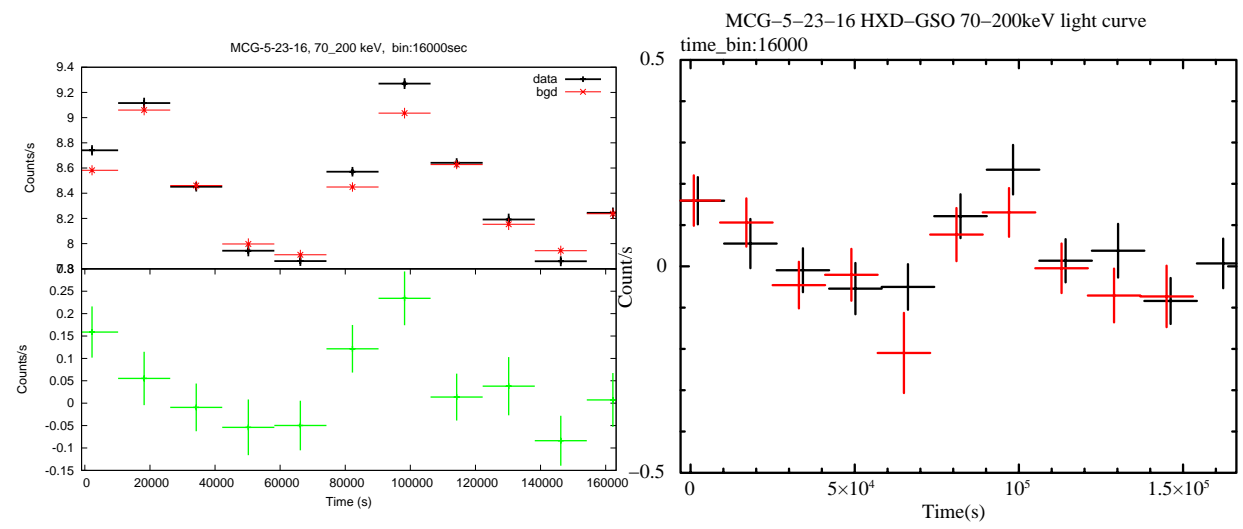
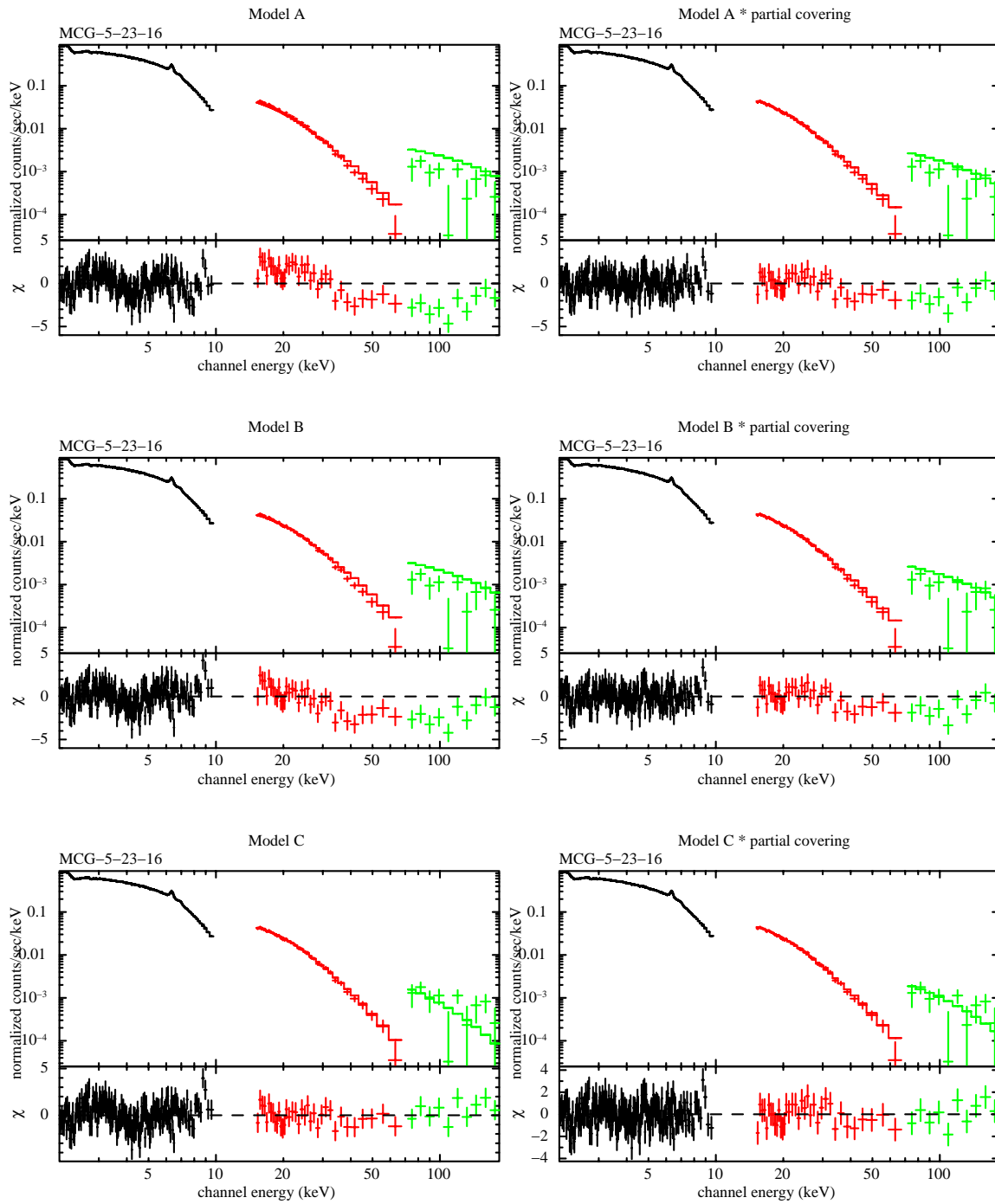


図 A.14: MCG-5-23-16 のライトカーブ。左図：観測データを黒、BGD モデルを赤、両者の差を緑で示す。

Component	Parameter	Model A×pc	Model A×pc ²	Model B×pc
-Absorber	N_H (10^{22})	1.56±0.04	1.34±1.55	1.60±0.03
-Partial Covering	N_{H1} (10^{22})	70.7±2.06	71.8±2.8	70.2±3.0
	f_1	0.38±0.01	0.39±0.01	0.39±0.02
	N_{H2} (10^{22})	-	1.19	-
	f_2	-	0.24	-
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.89±0.01	1.90±0.01	1.92±0.02
	N_{hard} (e^{-2})	4.95±0.24	5.08±0.29	5.10±0.26
	R	-	-	6.87E-02
	E_{cut} (keV)	-	-	1000(fix)
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.394±0.004	6.394±0.004	6.394±0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	44.5±12.9	43.6±13.1	44.8±12.8
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.61±0.78	7.56±0.78	7.60±0.78
χ^2/dof		326/249	325/247	319/248

表 A.6: MCG-5-23-16



☒ A.15: Model A, B, C に部分吸収をかける前後の比較

Component	Parameter	Model A	Model B	Model C	M.Dadina et al
-Absorber	N_H (10^{22})	29.3 ± 0.3	30.9 ± 0.5	28.1 ± 0.5	~ 0.4
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.44 ± 0.01	1.56 ± 0.02	1.19 ± 0.04	$1.65^{+0.05}_{-0.14}$
	N_{hard} (e^{-3})	7.87 ± 0.26	9.67 ± 0.45	5.05 ± 0.47	
	R	-	0.46 ± 0.09	0.69 ± 0.13	≤ 0.38
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	37.2 ± 3.8	≥ 457
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	1.58 ± 0.12	1.37 ± 0.17	0.88 ± 0.14	
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.401 ± 0.002	6.401 ± 0.002	6.400 ± 0.002	$6.45^{+0.05}_{-0.07}$
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	36.1 ± 6.3	32.9 ± 6.7	36.4 ± 6.3	
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	8.52 ± 0.39	8.34 ± 0.39	8.55 ± 0.40	
$F_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				1.87E-11	2.50E-11
$F'_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				4.48E-11	
χ^2/dof		411/138	382/137	197/136	

表 A.7: ベースラインのベストフィットパラメータと過去の論文との比較。モデルに AGN 固有の吸収成分を含むフラックスを F、含まない元来のフラックスを F' とする。

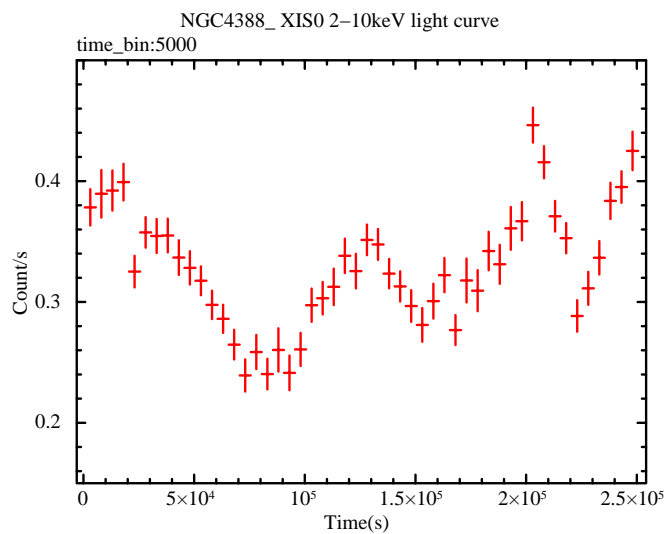
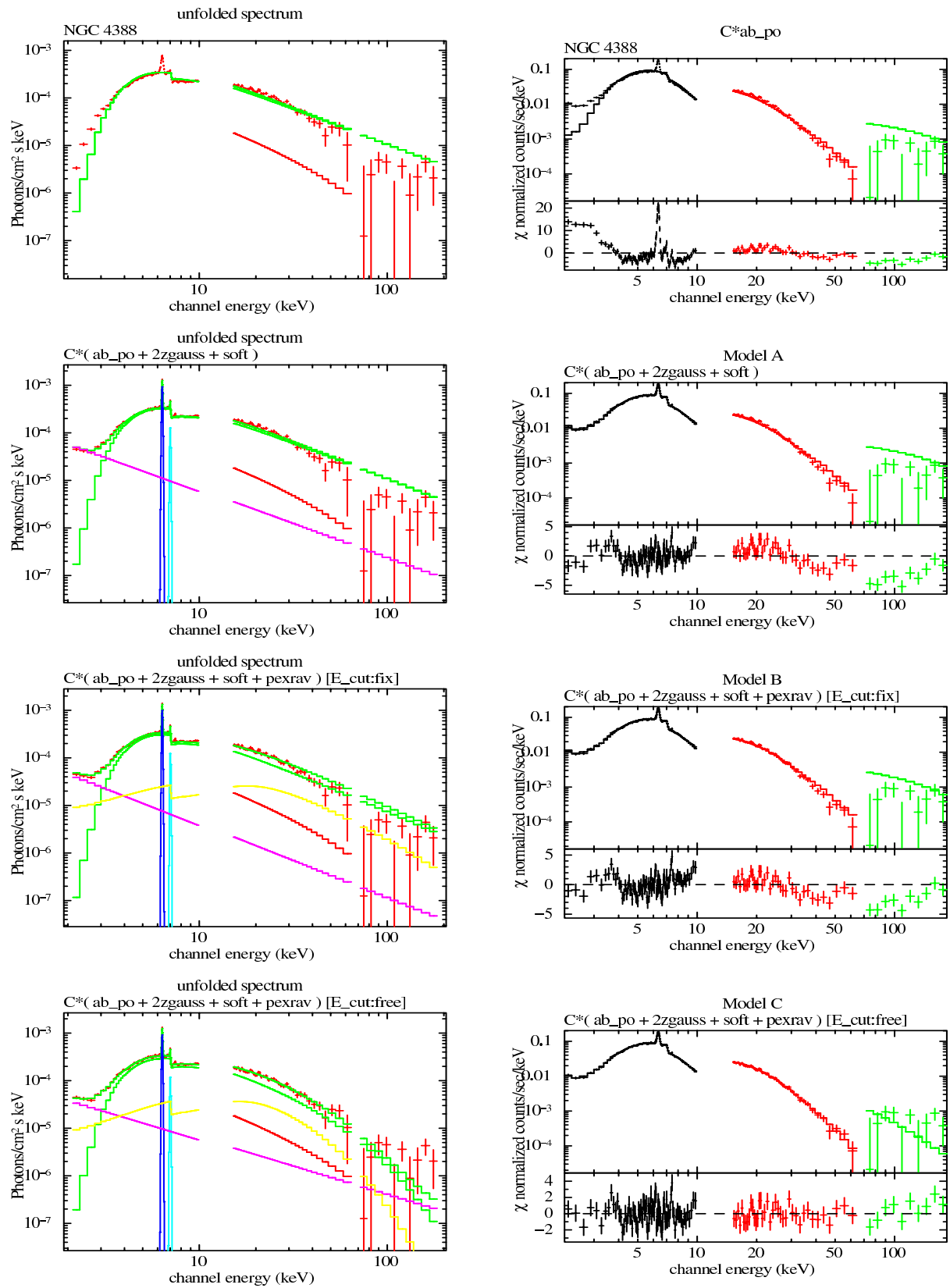


図 A.16: 2 ~ 10 keV 領域のライトカーブ。



☒ A.17: ベースラインモデルによるフィッティング結果

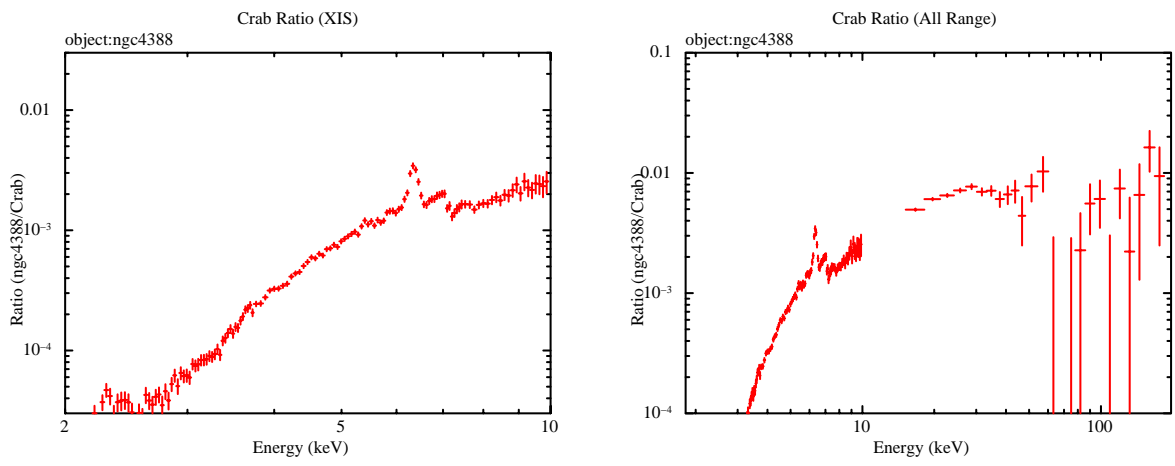


図 A.18: NGC 4388 の Crab ratio. 2 ~ 10 keV(左) と 2~ 200 keV(右)

A.4.2 GSO 領域における信号検出の有意性について

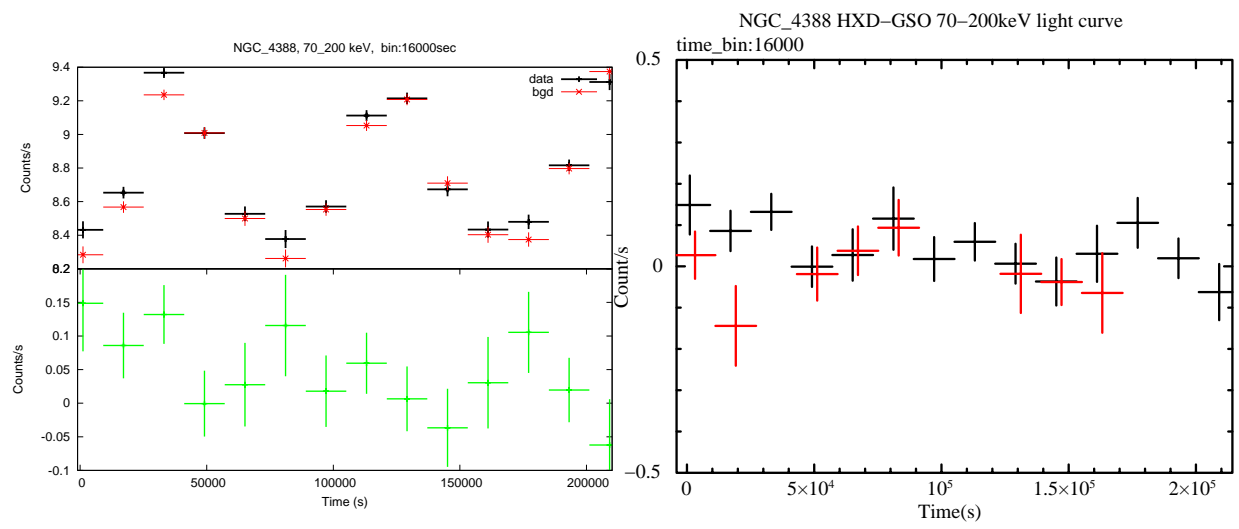
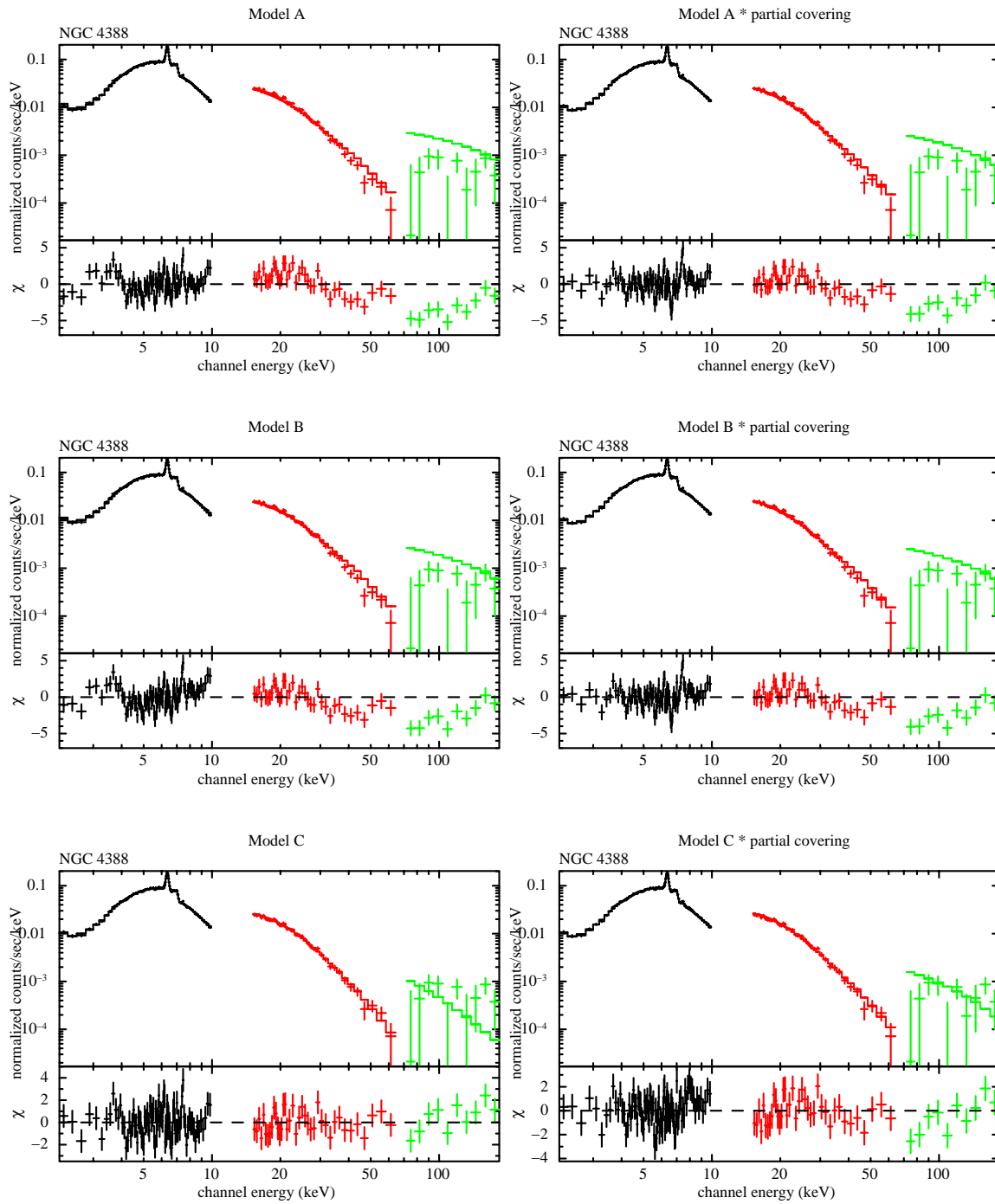


図 A.19: NGC 4388 のライトカーブ。左図：観測データを黒、BGD モデルを赤、両者の差を緑で示す。右図：観測データ (黒) と地没データ (赤) との比較

Component	Parameter	Model A×pc	Model B×pc	Model C×pc
-Absorber	N_H (10^{22})	25.5±0.83	25.2±1.07	26.6±1.46
-Partial Covering	N_H (10^{22})	43.1±5.5	38.3±6.8	29.7±20.7
	f	0.45±0.03	0.46±0.05	0.20±0.12
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.59±0.02	1.60±0.02	1.27±0.04
	N_{hard} (e^{-2})	1.35±0.11	1.32±0.10	0.62±0.01
	R	-	8.30E-02	0.50±0.16
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	44.6±5.7
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	1.58±0.16	1.48±0.25	0.95±0.19
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.400±0.002	6.400±0.002	6.400±0.002
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	24.6±8.3	24.7±8.2	33.3±7.2
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.78±0.41	7.99±0.40	8.39±0.43
χ^2/dof		325/136	324/135	197/134

表 A.8: NGC 4388



☒ A.20: Model A, B, C に部分吸収をかける前後の比較

Component	Parameter	Model A	Model B	Model C	M.Dadina et al
-Absorber	N_H (10^{22})	480±28	540±39	524±61	~ 4.9
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.91±0.06	1.92±0.06	1.85±0.25	1.57 $^{+0.09}_{-0.08}$
	N_{hard} (e^{-2})	6.89±1.45	6.61±1.71	5.41±4.25	
	R	-	0.20±0.07	0.20±0.08	
-Soft X-ray Continuum	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	473	122 $^{+41}_{-26}$
	N_{soft} (e^{-3})	1.74±0.37	0.66±0.70	0.65±0.68	
	-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	-	-	-
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	-	-	-	
	$I_{FeK\alpha}$	-	-	-	
$F_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				1.33E-12(7-10keV)	5.21E-12
$F'_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				4.22E-11(7-10keV)	
χ^2/dof		69/57	61/56	60/55	

表 A.9: ベースラインのベストフィットパラメータと過去の論文との比較。モデルに AGN 固有の吸収成分を含むフラックスを F、含まない元来のフラックスを F' とする。

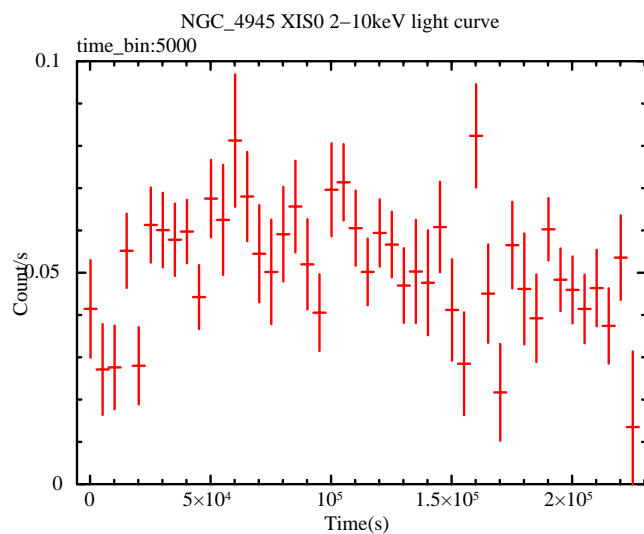
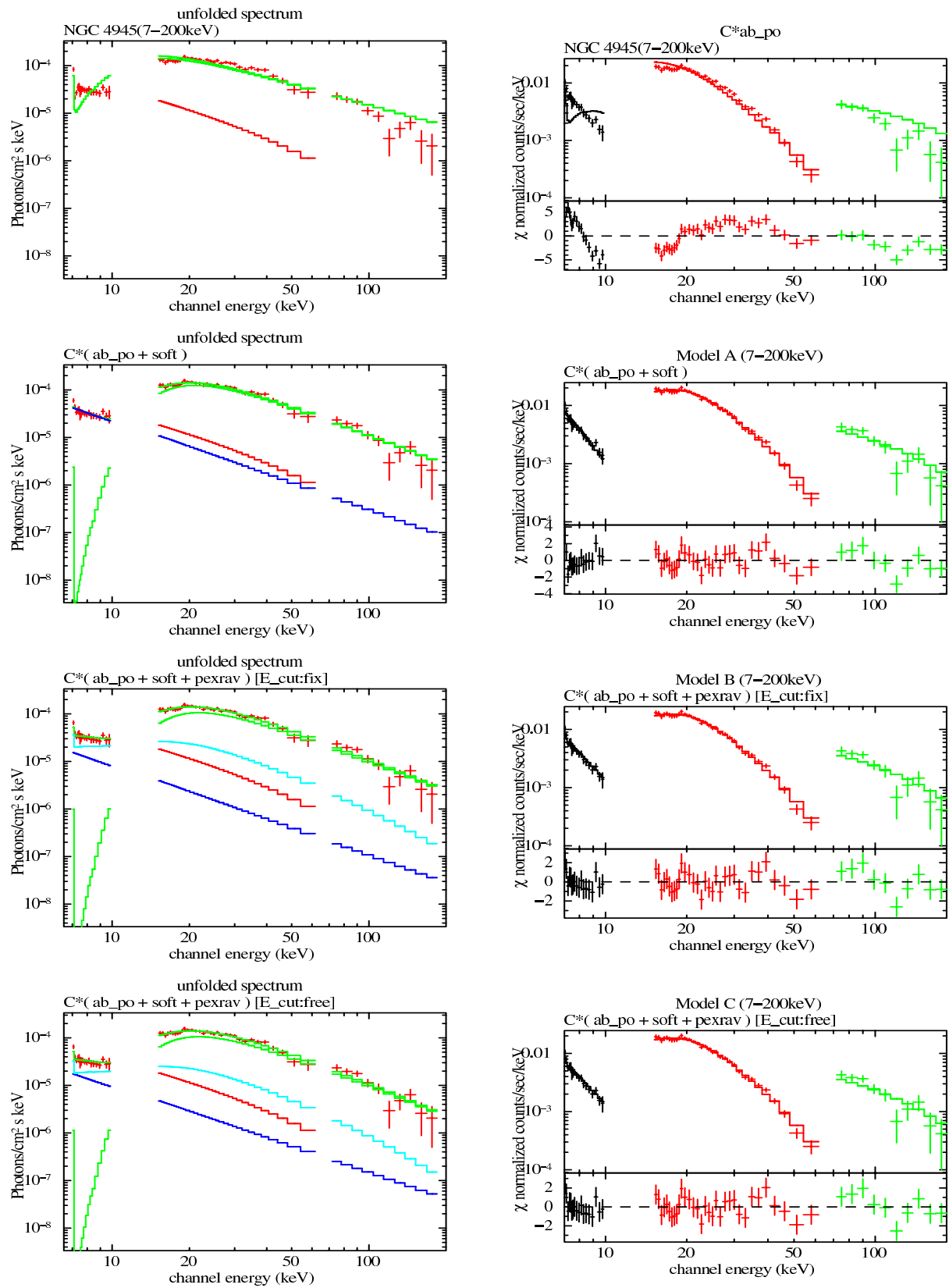


図 A.21: 2 ~ 10 keV 領域のライトカーブ。



☒ A.22: ベースラインモデルによるフィッティング結果

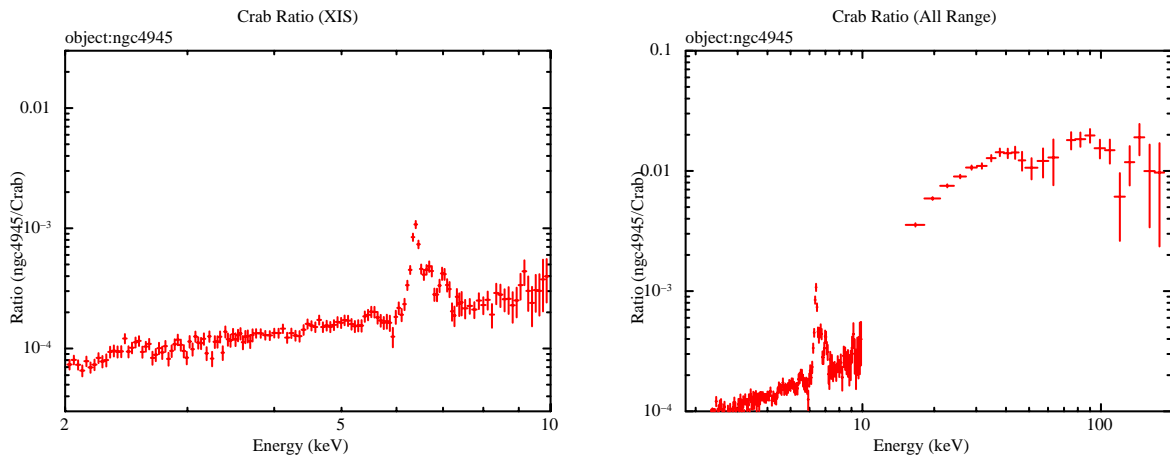


図 A.23: NGC 4945 の Crab ratio。2 ~ 10 keV(左) と 7 ~ 200 keV(右)。ただし、この天体は吸収が激しいため、10 keV 以下での ratio があるのかは不明

A.5.2 GSO 領域における信号検出の有意性について

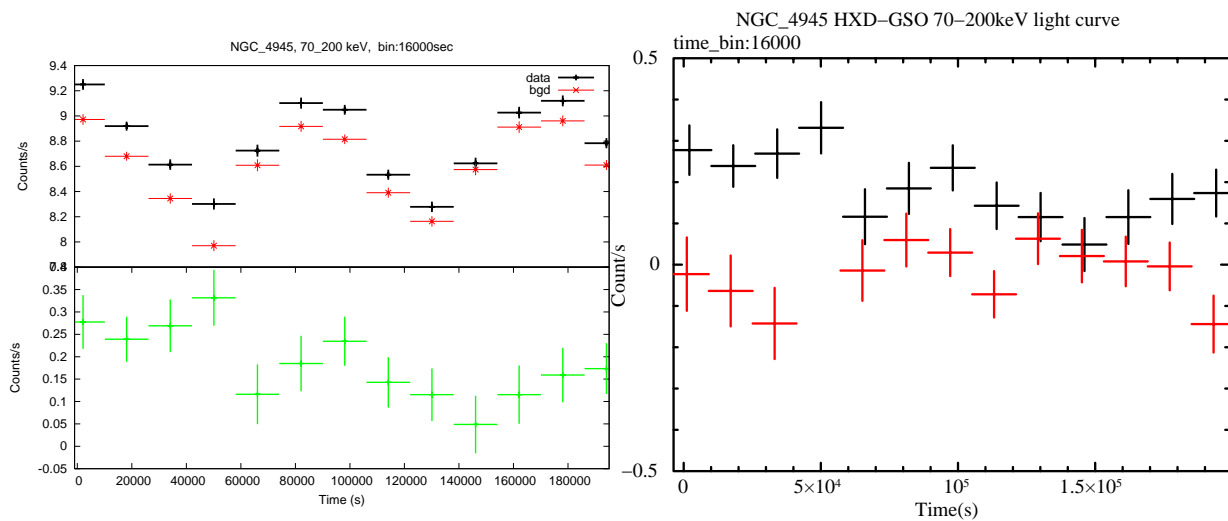


図 A.24: NGC 4945 のライトカーブ。左図：観測データを黒、BGD モデルを赤、両者の差を緑で示す。右図：観測データ(黒)と地没データ(赤)との比較

Component	Parameter	Model A×pc	Model B×pc	(Model C)
-Absorber	N_H (10^{22})	474 ± 273	531 ± 327	525 ± 61
-Partial Covering	N_H (10^{22})	9.59	15.8	-
	f	0.62	0.29	-
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.91 ± 0.05	1.91 ± 0.07	1.86 ± 0.25
	N_{hard} (e^{-2})	6.89	6.37	5.42 ± 4.25
	R	-	0.20 ± 0.08	0.20 ± 0.08
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	473
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-3})	1.74 ± 0.38	0.64	0.65
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	-	-	-
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	-	-	-
	$I_{FeK\alpha}$	-	-	-
χ^2/dof		69/55	61/54	(61/55)

表 A.10: NGC 4945

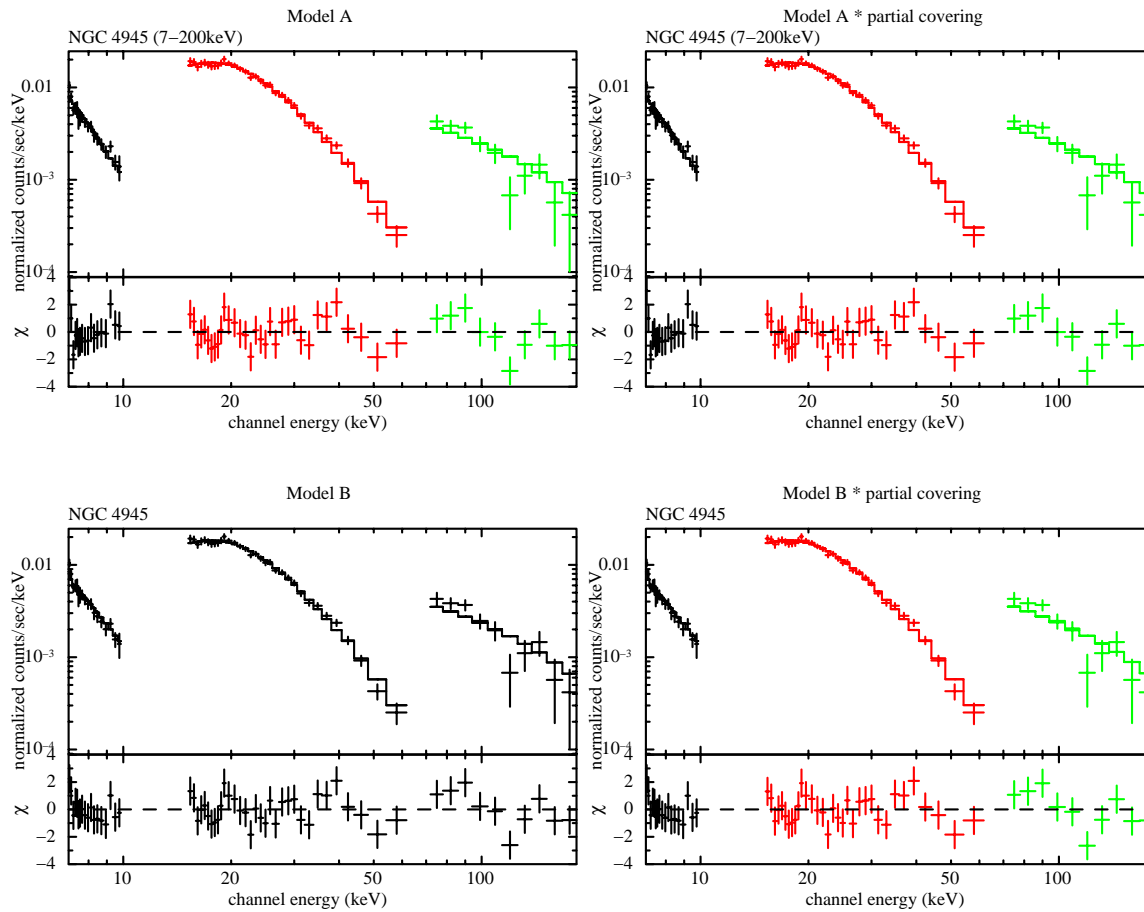


図 A.25: Model A, B に部分吸収をかける前後の比較

Component	Parameter	Model A	Model B	Model C	M.Dadina et al
-Absorber	N_H (10^{22})	0.00	0.00	0.00	~ 0.01
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.80 ± 0.01	1.80 ± 0.07	1.78 ± 0.12	$1.60^{+0.34}_{-0.21}$
	N_{hard} (e^{-2})	1.29 ± 0.01	1.29	1.28	
	R	-	5.15E-03	5.38E-03	$1.17^{+2.37}_{-0.73}$
-Gaussian	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	215	60^{+71}_{-23}
	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.591 ± 0.058	6.591 ± 0.059	6.591 ± 0.059	$6.40^{+0.22}_{-0.20}$
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	382 ± 72	382 ± 72	379 ± 72	
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.99 ± 2.60	7.99 ± 2.60	7.89 ± 2.67	
	$F_{2-10keV}$ (ergs $cm^{-2}s^{-1}$)			-	2.63E-11
$F'_{2-10keV}$ (ergs $cm^{-2}s^{-1}$)			4.56E-11		
χ^2/dof		119/109	119/108	117/107	

表 A.11: ベースラインのベストフィットパラメータと過去の論文との比較。モデルに AGN 固有の吸収成分を含むフラックスを F 、含まない元来のフラックスを F' とする。

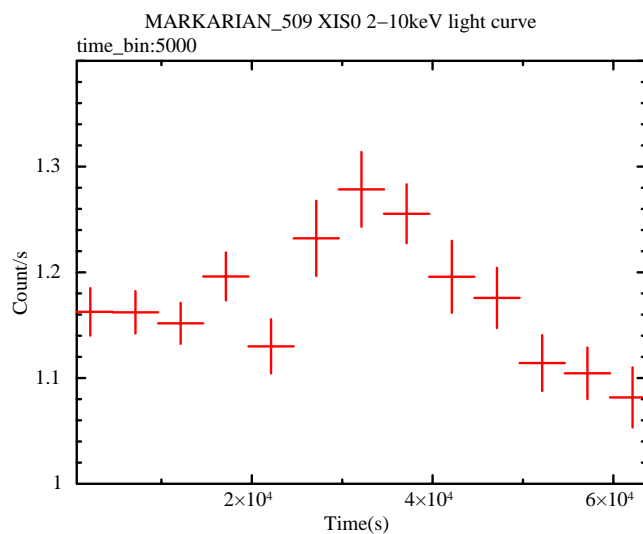
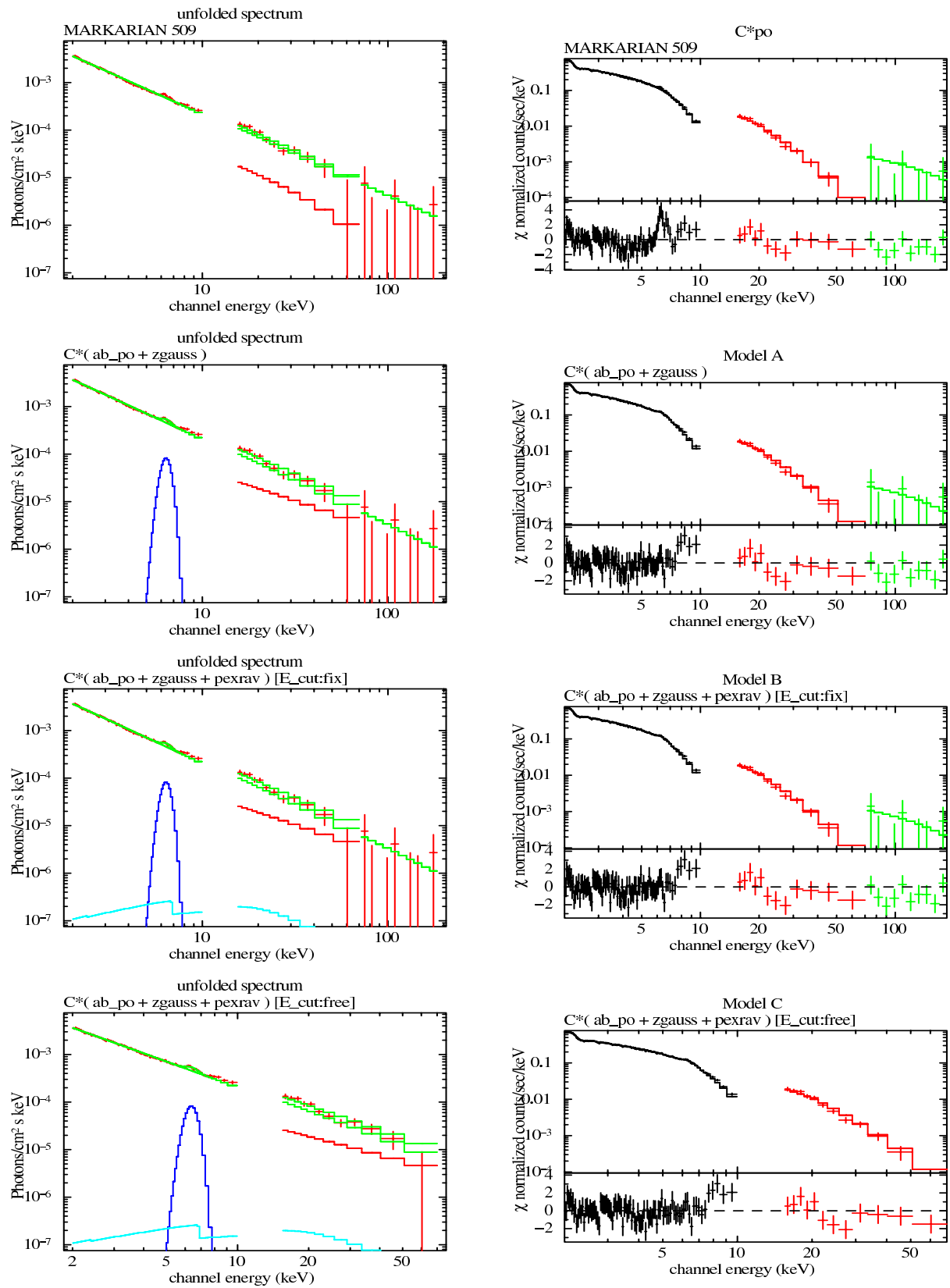


図 A.26: 2 ~ 10 keV 領域のライトカーブ。



☒ A.27: ベースラインモデルによるフィッティング結果

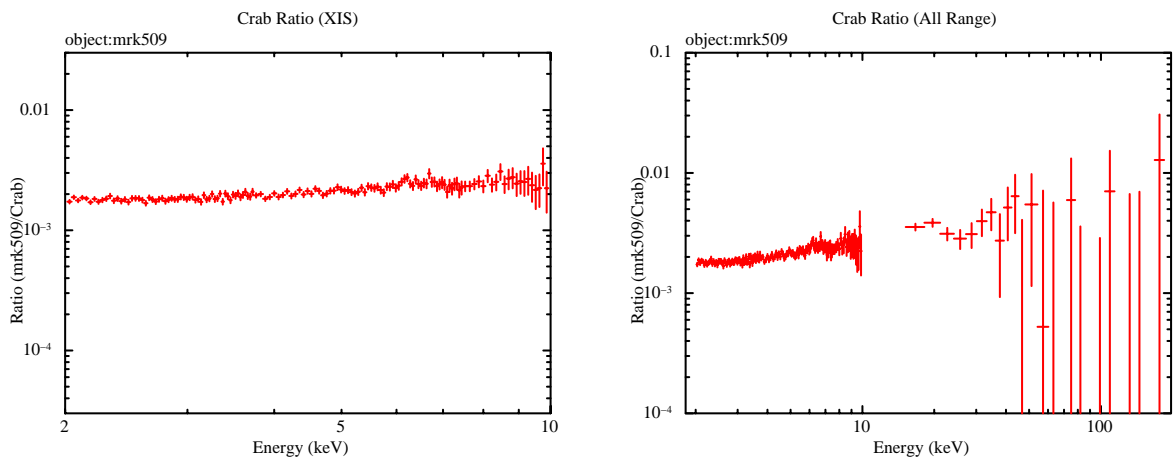


図 A.28: Mrk 509 の Crab ratio。2 ~ 10 keV(左) と 2~ 200 keV(右)

A.6.2 GSO 領域における信号検出の有意性について

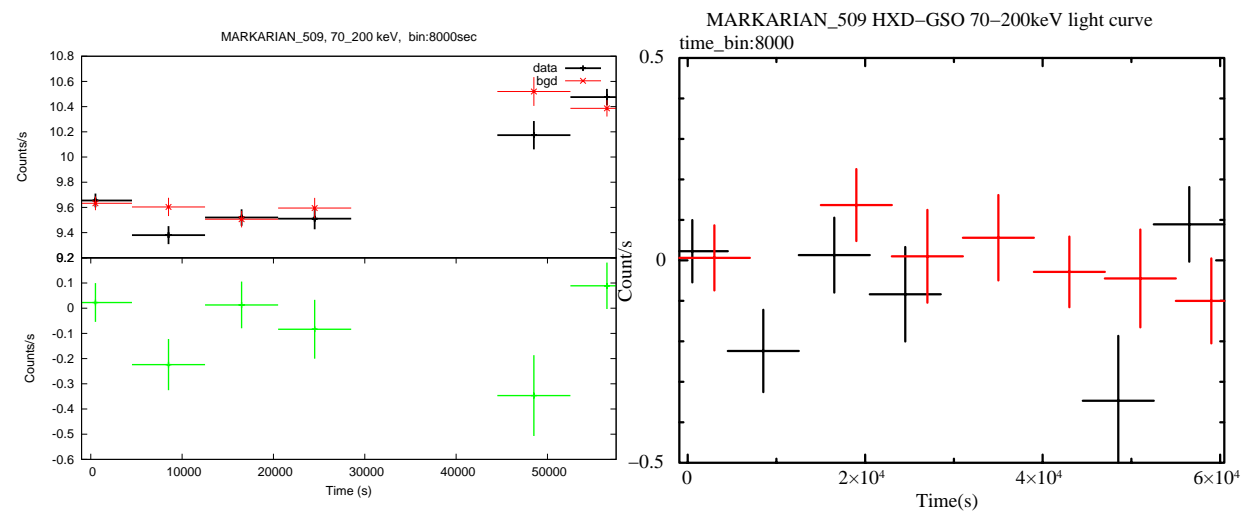


図 A.29: Mrk 509 のライトカーブ。左図：観測データを黒、BGD モデルを赤、両者の差を緑で示す。右図：観測データ (黒) と地没データ (赤) との比較

Component	Parameter	Model A×pc	Model B×pc	(Model C)
-Absorber	N_H (10^{22})	0.00	0.00	0.00
-Partial Covering	N_H (10^{22})	0.00	0.00	-
	f	0.95	4.84E-02	-
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.80 ± 0.01	1.80 ± 0.08	1.80 ± 0.15
	N_{hard} (e^{-2})	1.29 ± 0.02	1.29	1.29
	R	-	5.42E-03	5.16E-03
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	1139
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.590 ± 0.059	6.590 ± 0.059	6.592 ± 0.060
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	378 ± 72.2	378 ± 72.7	381 ± 73.0
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.90 ± 2.58	7.87 ± 2.58	7.94 ± 2.71
χ^2/dof		103/97	103/96	(103/97)

表 A.12: Mrk 509(XIS/PIN のみのデータ)

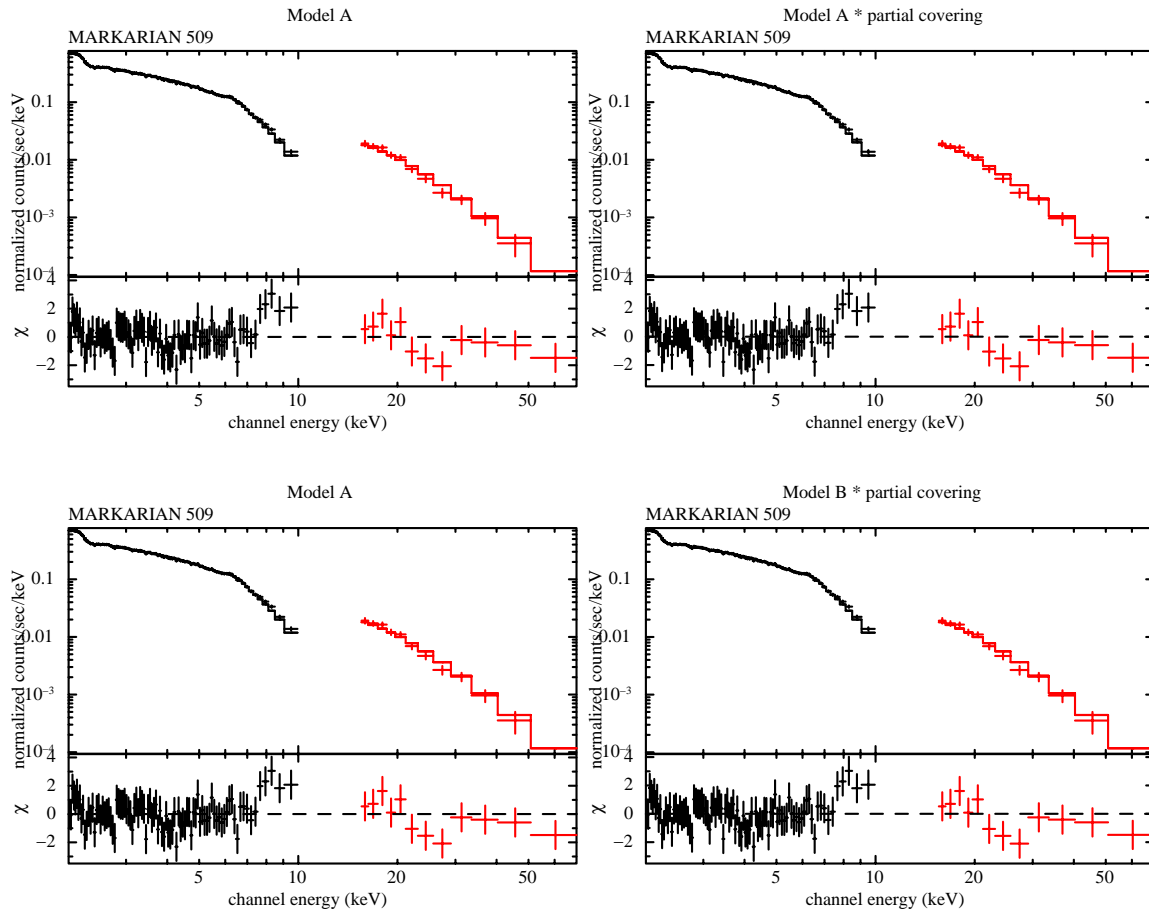


図 A.30: Model A, B に部分吸収をかける前後の比較

Component	Parameter	Model A	Model B	Model C	M.Dadina et al
-Absorber	N_H (10^{22})	2.09E-16	2.00E-10	1.51E-12	$\sim 1E-3$
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.88 ± 0.02	1.88 ± 0.27	1.88 ± 0.35	$1.90^{+0.10}_{-0.09}$
	N_{hard} (e^{-3})	3.35 ± 0.21	3.35	3.35	
-Gaussian	R	-	2.16E-03	2.16E-03	≤ 1.97
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	786	$107^{+1200}_{-54.9}$
	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.615 ± 0.034	6.615 ± 0.034	6.615 ± 0.034	$6.83^{+0.14}_{-0.09}$
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	233 ± 43	232 ± 44	232 ± 47	
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	1.52 ± 0.43	1.51 ± 0.45	1.52 ± 0.52	
$F_{2-10keV}$ (ergs $cm^{-2}s^{-1}$)				-	3.87E-11
$F'_{2-10keV}$ (ergs $cm^{-2}s^{-1}$)				1.04E-11	
χ^2/dof		226/220	226/219	226/218	

表 A.13: ベースラインのベストフィットパラメータと過去の論文との比較。モデルに AGN 固有の吸収成分を含むフラックスを F、含まない元来のフラックスを F' とする。

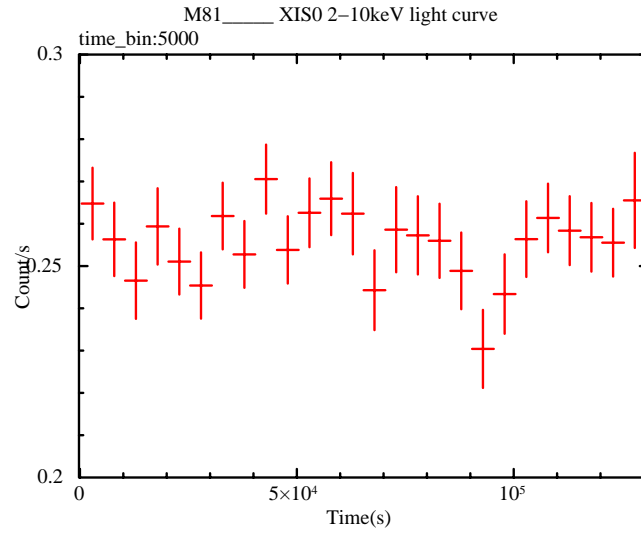
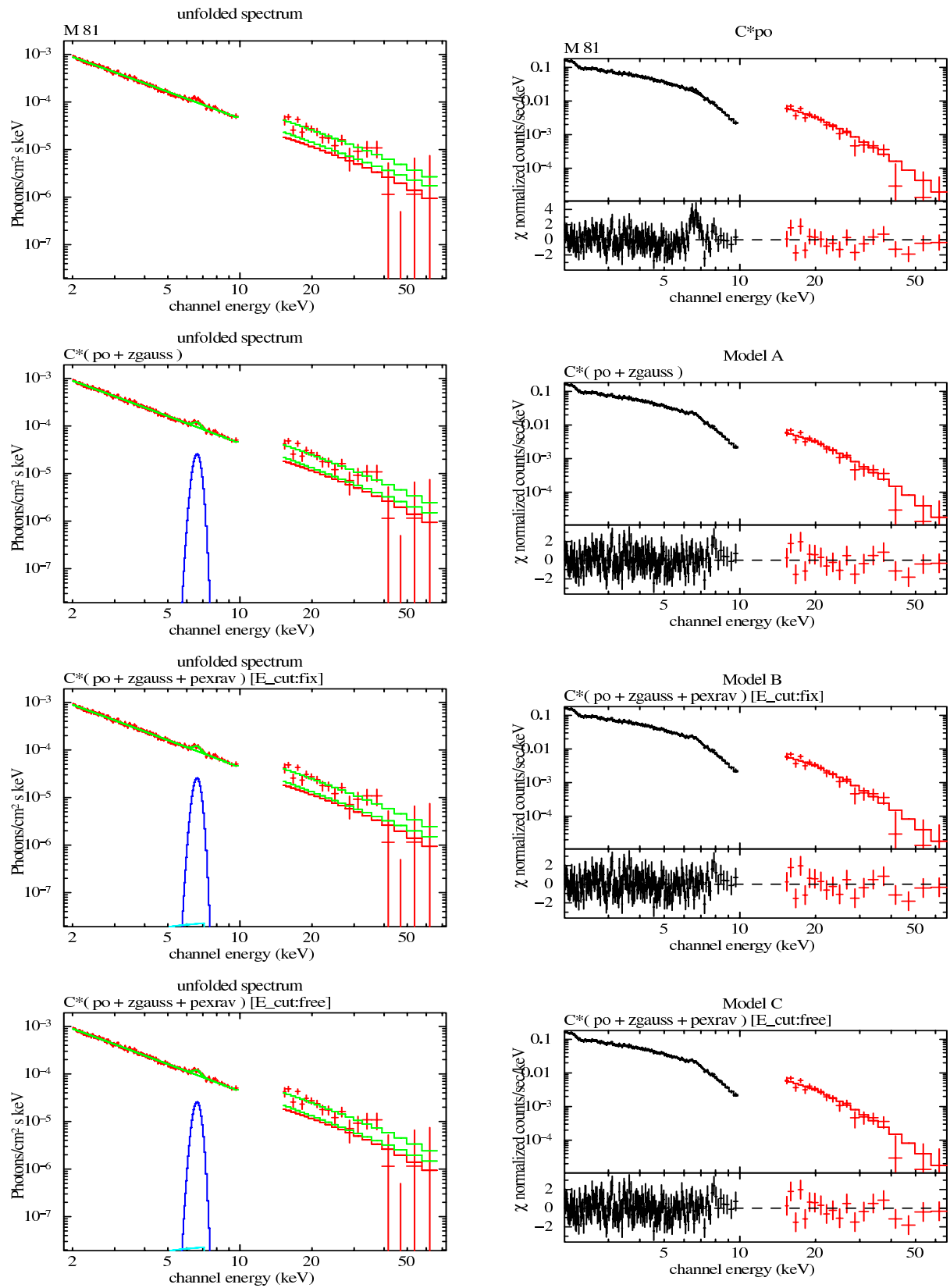


図 A.31: 2 ~ 10 keV 領域のライトカーブ。



☒ A.32: ベースラインモデルによるフィッティング結果

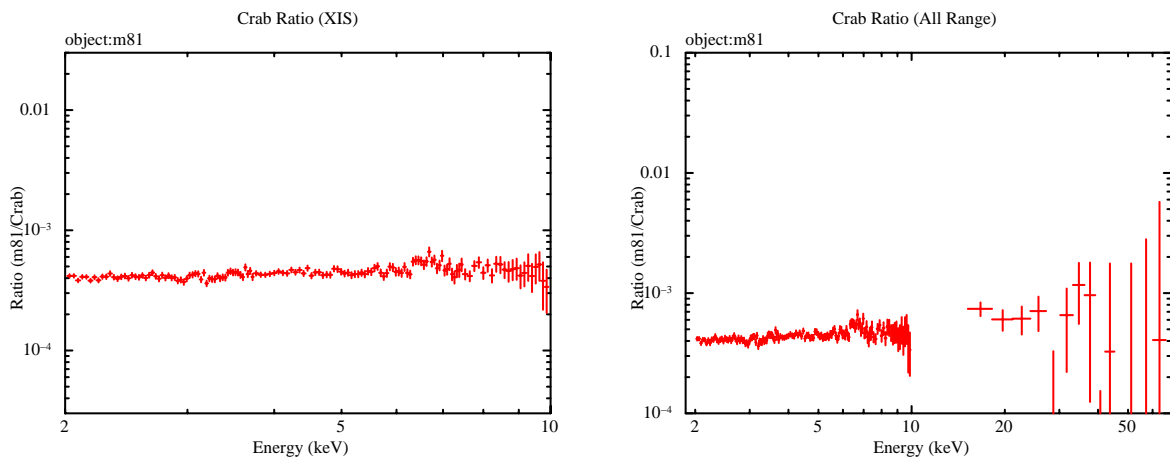


図 A.33: M 81 の Crab ratio。2 ~ 10 keV(左) と 2 ~ 70 keV(右)

Component	Parameter	Model A×pc	Model B×pc	(Model C)
-Absorber	N_H (10^{22})	2.43E-14	1.13E-07	1.51E-12
-Partial Covering	N_H (10^{22})	9.04E-10	9.85E-06	-
	f	0.81	0.81	-
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.88 ± 0.03	1.88 ± 0.25	1.88 ± 0.35
	N_{hard} (e^{-3})	3.35 ± 0.22	3.34	3.35
	R	-	2.91E-03	2.16E-03
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	786
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.615 ± 0.034	6.615 ± 0.034	6.6615 ± 0.034
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	232 ± 44.0	231 ± 44.3	233 ± 46.8
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	1.51 ± 0.43	1.50 ± 0.45	1.52 ± 0.52
χ^2/dof		226/218	226/217	(226/218)

表 A.14: M 81

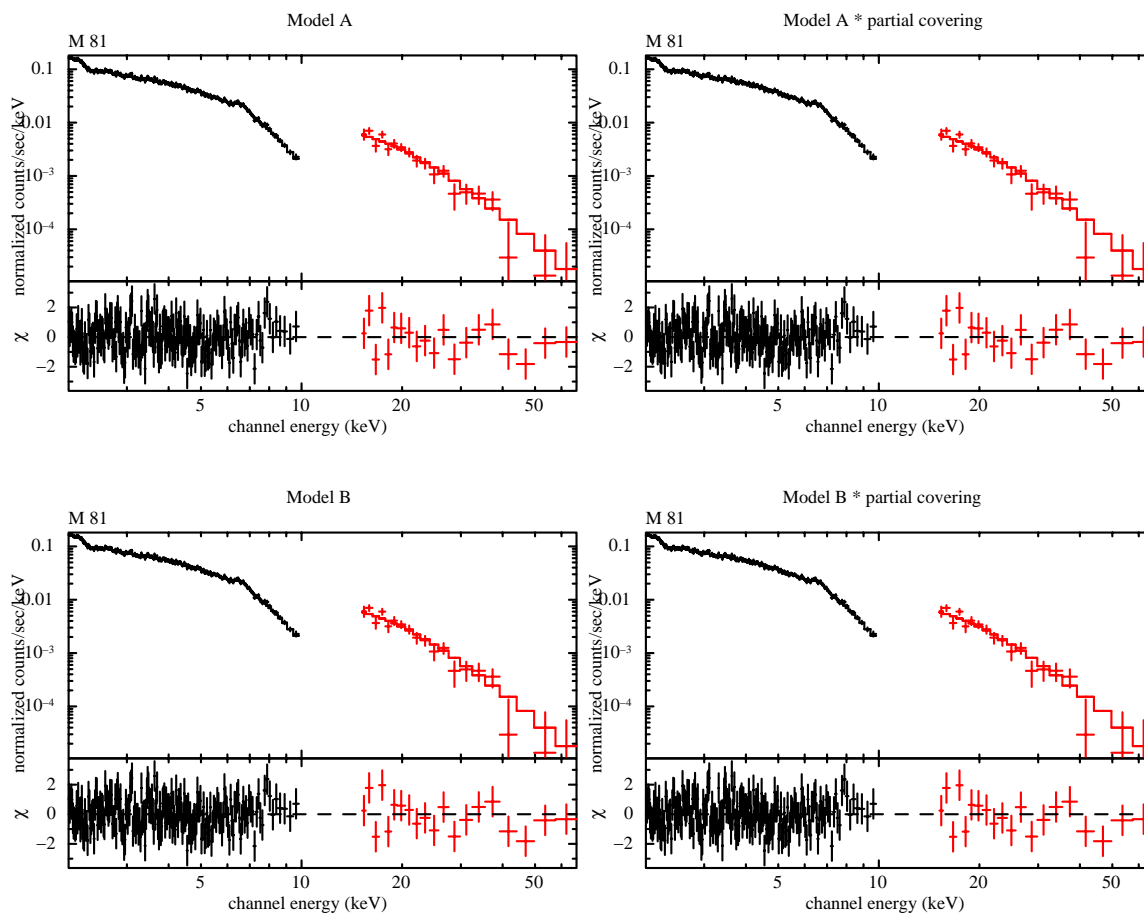


図 A.34: Model A, B に部分吸収をかける前後の比較

Component	Parameter	Model A	Model B	Model C
-Absorber	N_H (10^{22})	10.9 ± 0.4	10.9 ± 1.8	9.78 ± 0.66
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.97 ± 0.04	1.96 ± 0.23	1.38 ± 0.29
	N_{hard} (e^{-3})	4.99 ± 0.55	4.96 ± 1.91	2.40 ± 1.25
	R	-	$7.90\text{E-}03$	$7.17\text{E-}03$
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	11.6 ± 7.4
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	4.30 ± 0.55	4.27	2.67 ± 3.79
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.409 ± 0.024	6.409 ± 0.024	6.409 ± 0.029
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	~ 0	~ 0	0.00
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-6})	6.06 ± 2.83	6.06 ± 2.84	5.58 ± 2.42
$F_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				8.08E-12
$F'_{2-10keV}$ (ergs cm $^{-2}$ s $^{-1}$)				1.31E-11
χ^2/dof		117/80	117/79	86/78

表 A.15: ベースラインのベストフィットパラメータ。本解析と同様なモデルが無かったため、過去の論文との比較はできなかった。モデルに AGN 固有の吸収成分を含むフラックスを F、含まない元来のフラックスを F' とする。

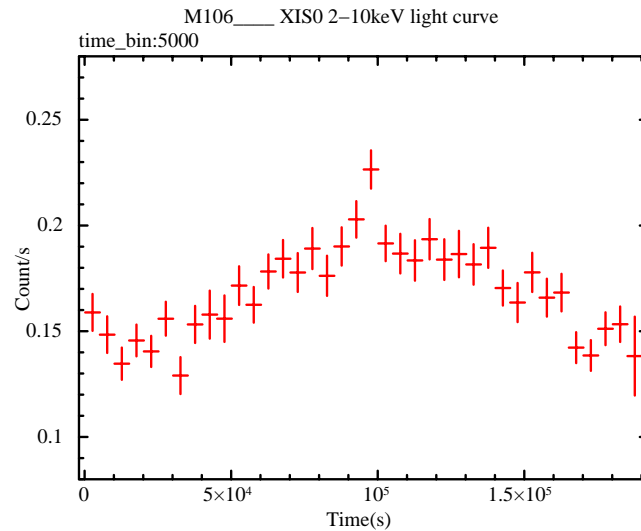
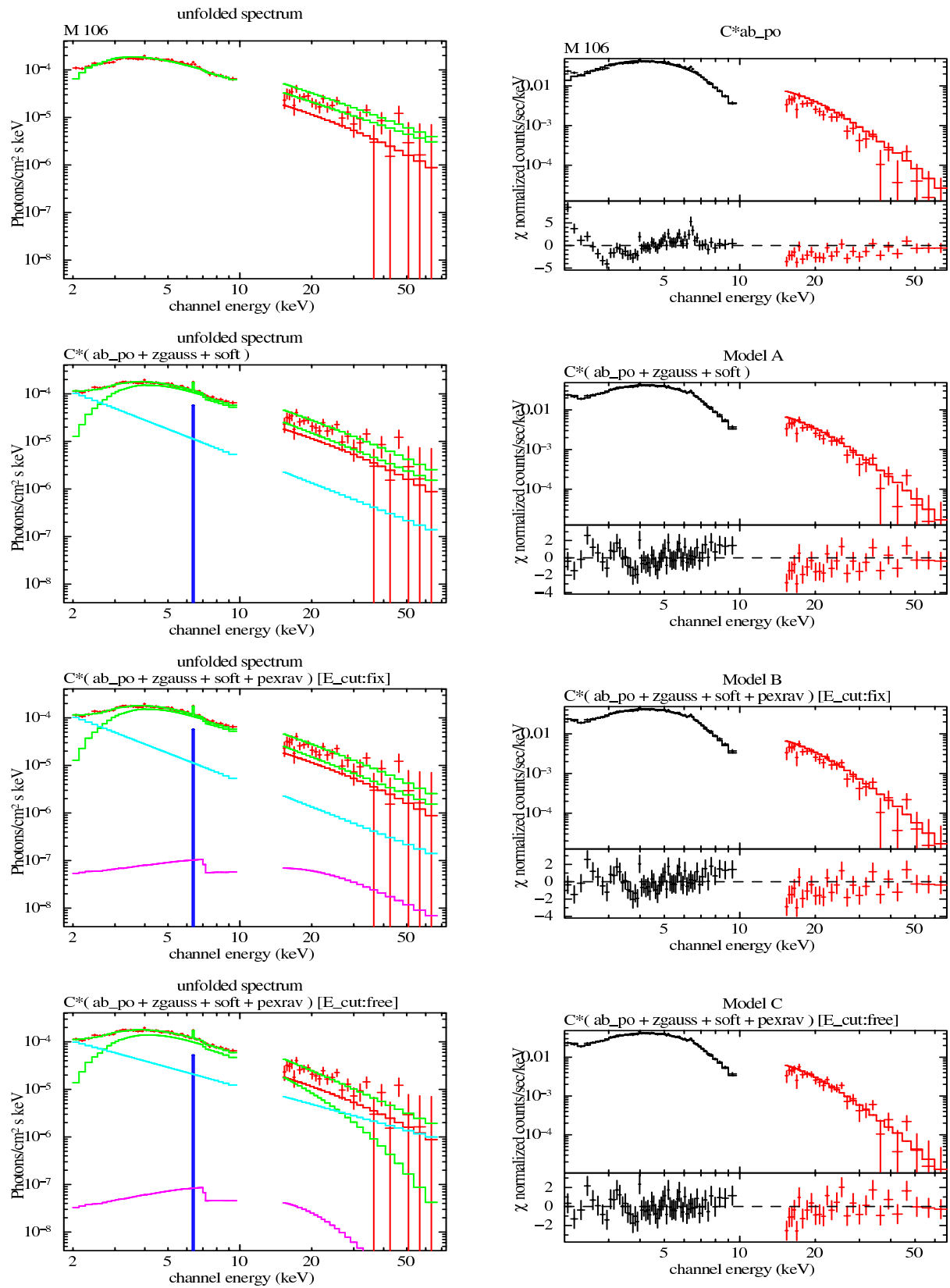


図 A.35: 2 ~ 10 keV 領域のライトカーブ。



☒ A.36: ベースラインモデルによるフィッティング結果

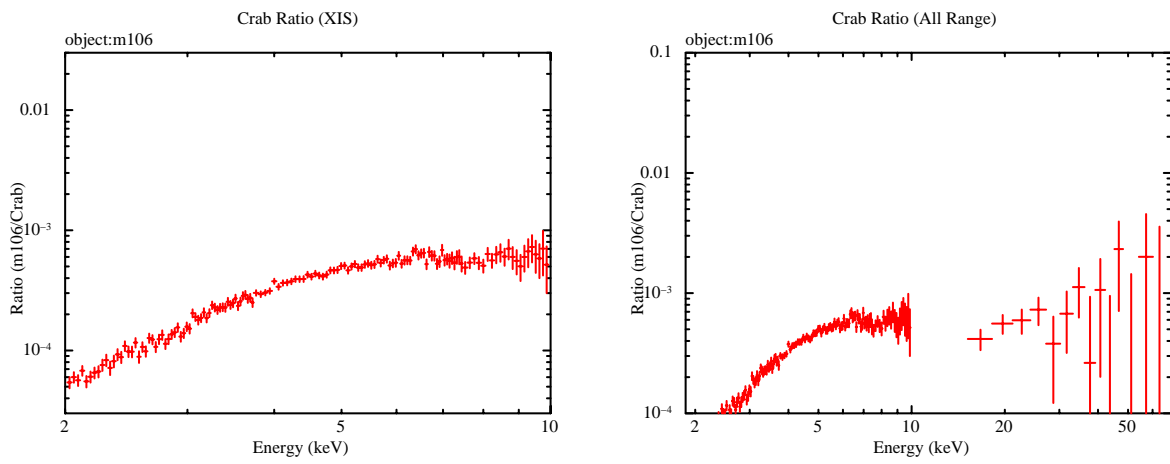


図 A.37: M 106 の Crab ratio。2 ~ 10 keV(左) と 2~ 70 keV(右)

Component	Parameter	Model A×pc	Model B×pc	Model C×pc
-Absorber	N_H (10^{22})	8.51 ± 2.22	8.42 ± 3.78	8.90 ± 1.77
-Partial Covering	N_H (10^{22})	15.1 ± 9.4	14.8 ± 9.1	20.2 ± 18.5
	f	0.40 ± 0.23	0.41 ± 0.23	0.26 ± 0.17
-Hard X-ray Continuum	Γ	2.08 ± 0.07	2.08 ± 0.34	1.68 ± 0.26
	N_{hard} (e^{-3})	6.94 ± 1.42	6.93 ± 3.51	4.08 ± 2.10
	R	-	$7.91E-03$	$(8.61 \pm 7.65)E-03$
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	18.8
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	3.77 ± 1.58	3.73	3.00
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.410 ± 0.031	6.410 ± 0.031	6.411 ± 0.033
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	0.00	0.00	0.00
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-6})	5.25 ± 2.56	5.23 ± 2.56	4.94 ± 2.58
χ^2/dof		106/78	106/77	89/76

表 A.16: M 106

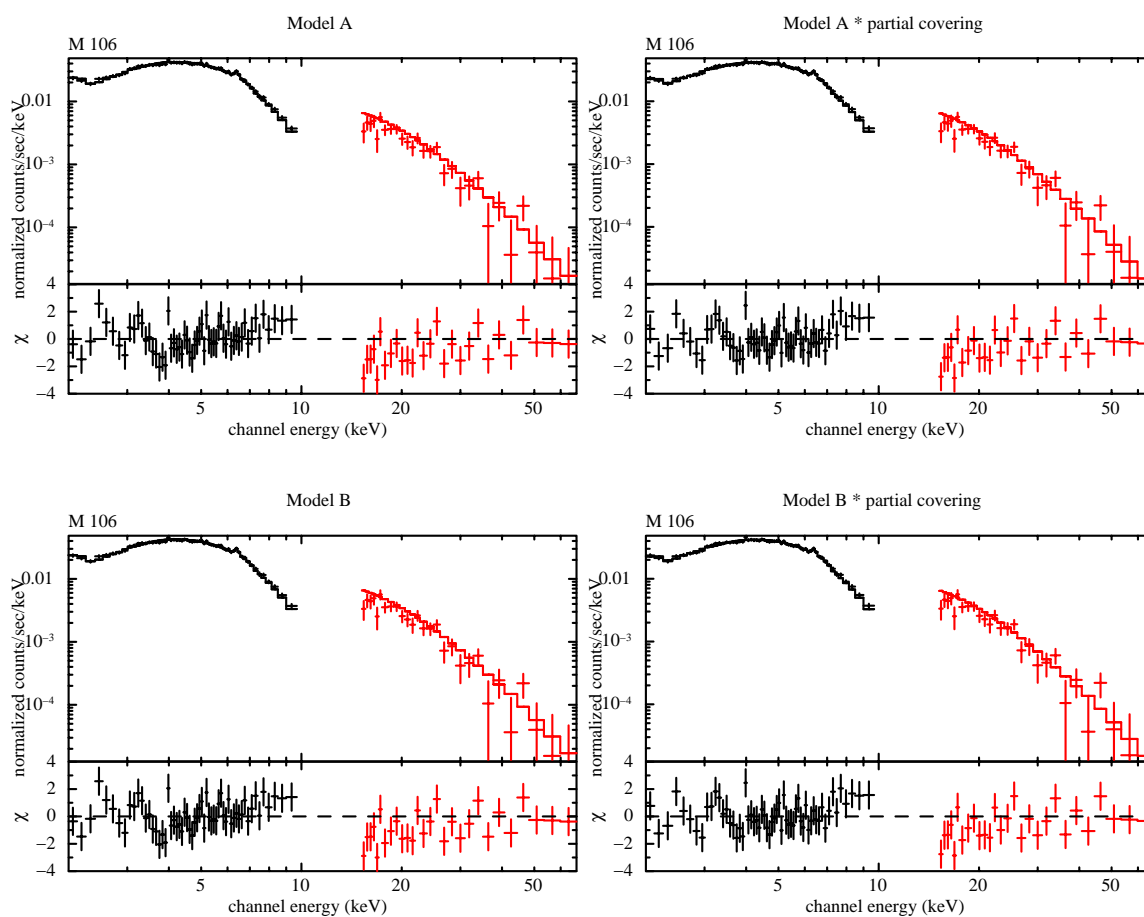


図 A.38: Model A, B に部分吸収をかける前後の比較

Component	Parameter	Model A	Model B	Model C	M.Dadina et al
-Absorber	N_H (10^{22})	0.377 ± 0.033	0.554 ± 0.043	0.476 ± 0.052	$\sim 1E-3$
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.53 ± 0.01	1.63 ± 0.01	1.61 ± 0.03	$1.79^{+0.14}_{-0.07}$
	N_{hard} (e^{-3})	8.59 ± 0.14	9.76 ± 0.26	9.60 ± 0.36	
	R	-	0.51 ± 0.09	2.62 ± 0.32	$0.50^{+0.90}_{-0.18}$
-Gaussian	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	35.1 ± 2.9	183^{+340}_{-53}
	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.391 ± 0.004	6.391 ± 0.004	6.391 ± 0.004	$6.43^{+0.07}_{-0.10}$
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	52.8 ± 8.6	53.2 ± 8.5	25.1 ± 14.6	
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	8.59 ± 0.55	8.57 ± 0.55	7.26 ± 0.58	
$F_{2-10keV}$ (ergs $cm^{-2}s^{-1}$)				4.43E-11	6.40E-11
$F'_{2-10keV}$ (ergs $cm^{-2}s^{-1}$)				4.59E-11	
χ^2/dof		517/314	483/313	342/312	

表 A.17: ベースラインのベストフィットパラメータと過去の論文との比較。モデルに AGN 固有の吸収成分を含むフラックスを F、含まない元来のフラックスを F' とする。

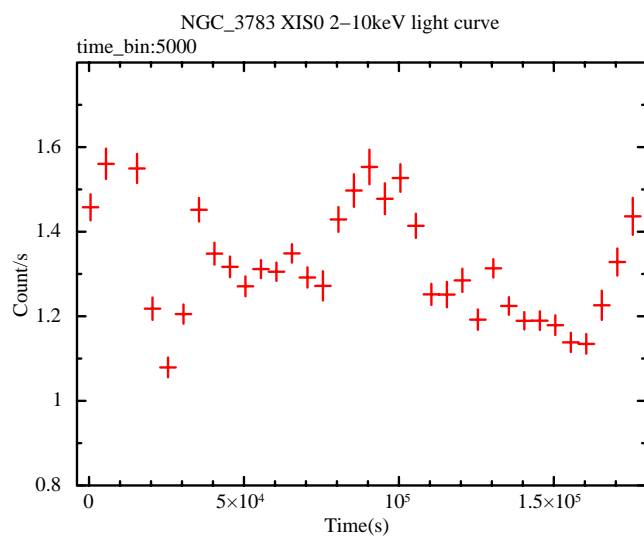
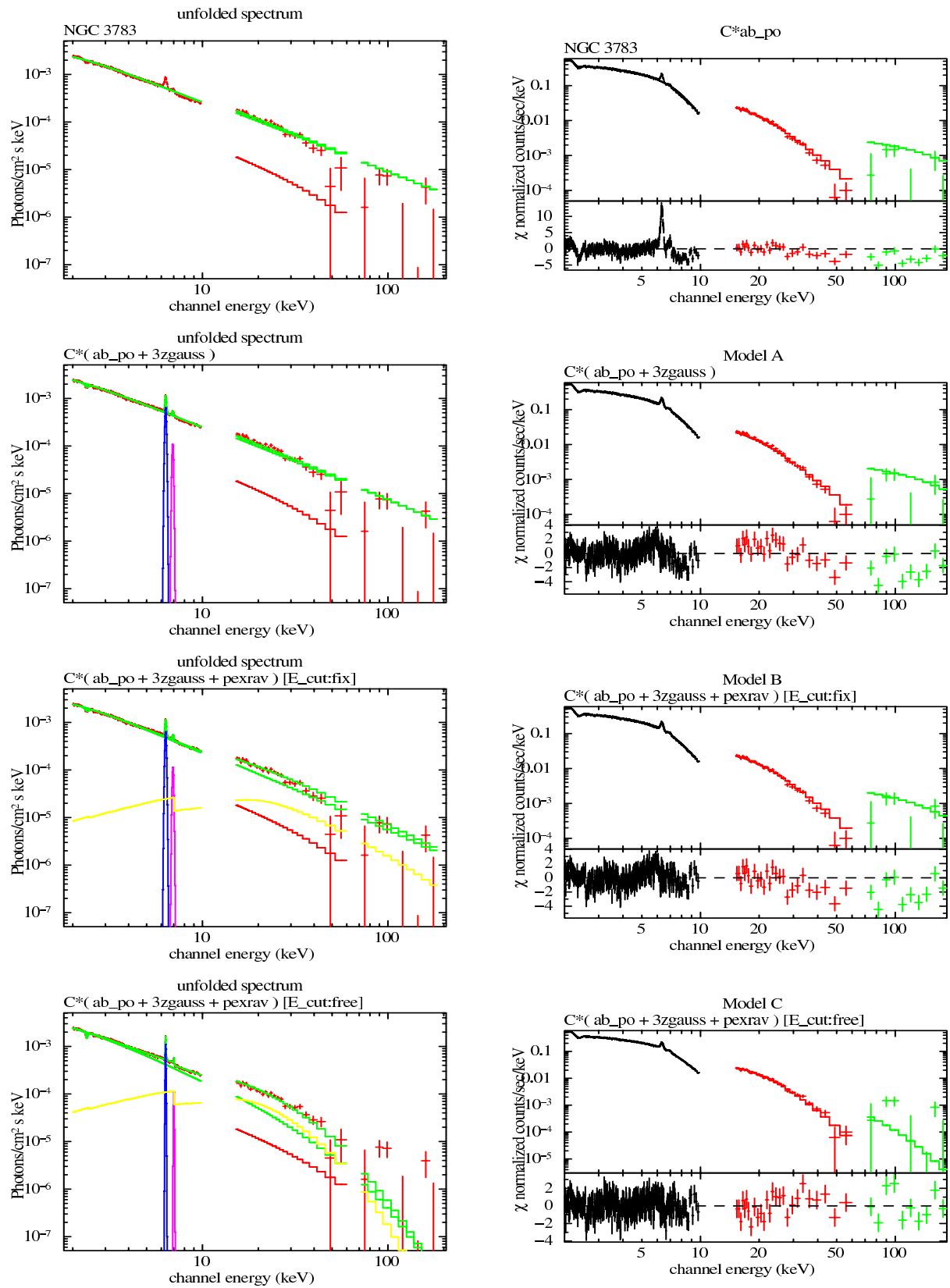


図 A.39: 2 ~ 10 keV 領域のライトカーブ。



☒ A.40: ベースラインモデルによるフィッティング結果

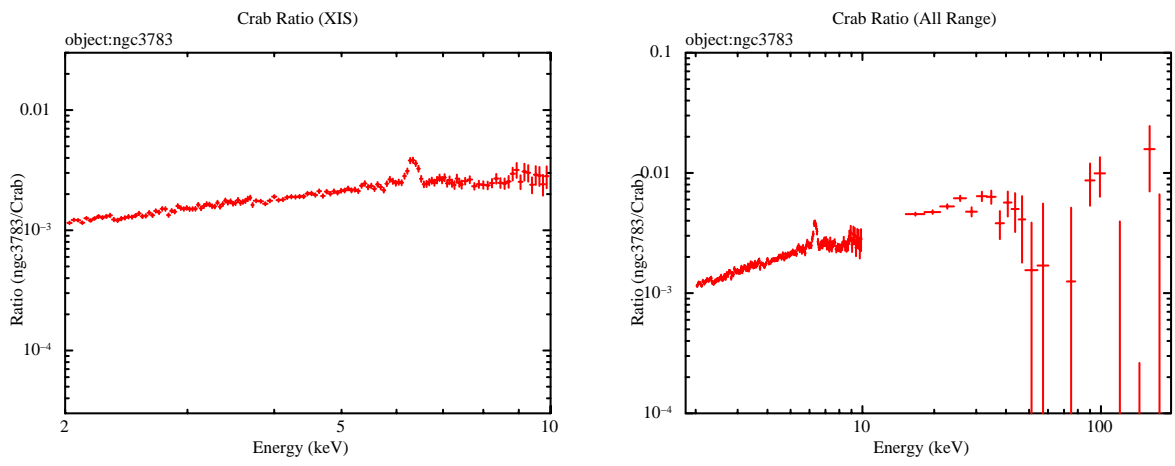


図 A.41: NGC 3783 の Crab ratio。2 ~ 10 keV(左) と 2~ 200 keV(右)

A.9.2 GSO 領域における信号検出の有意性について

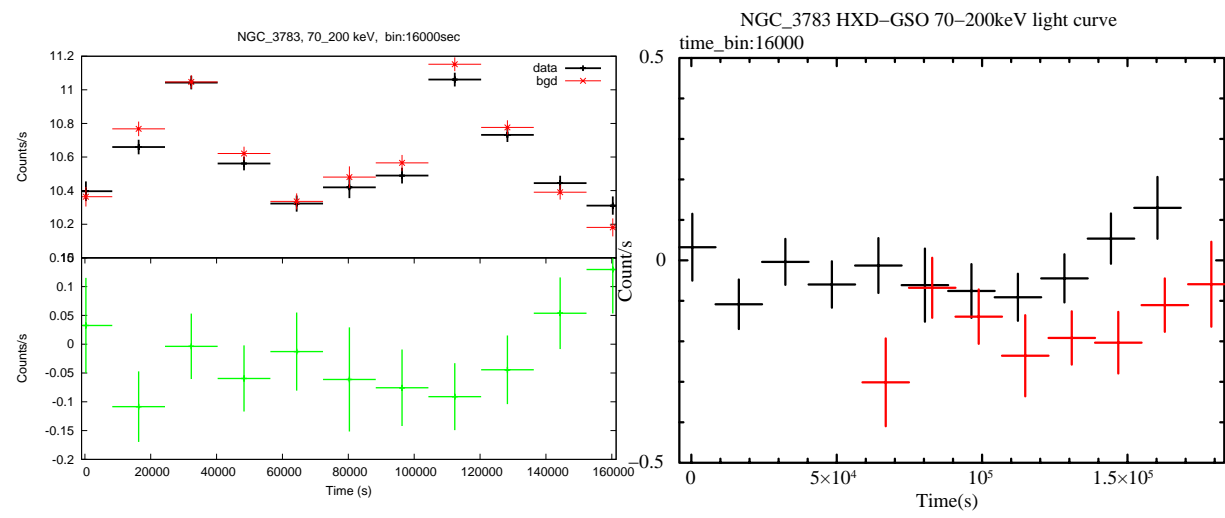
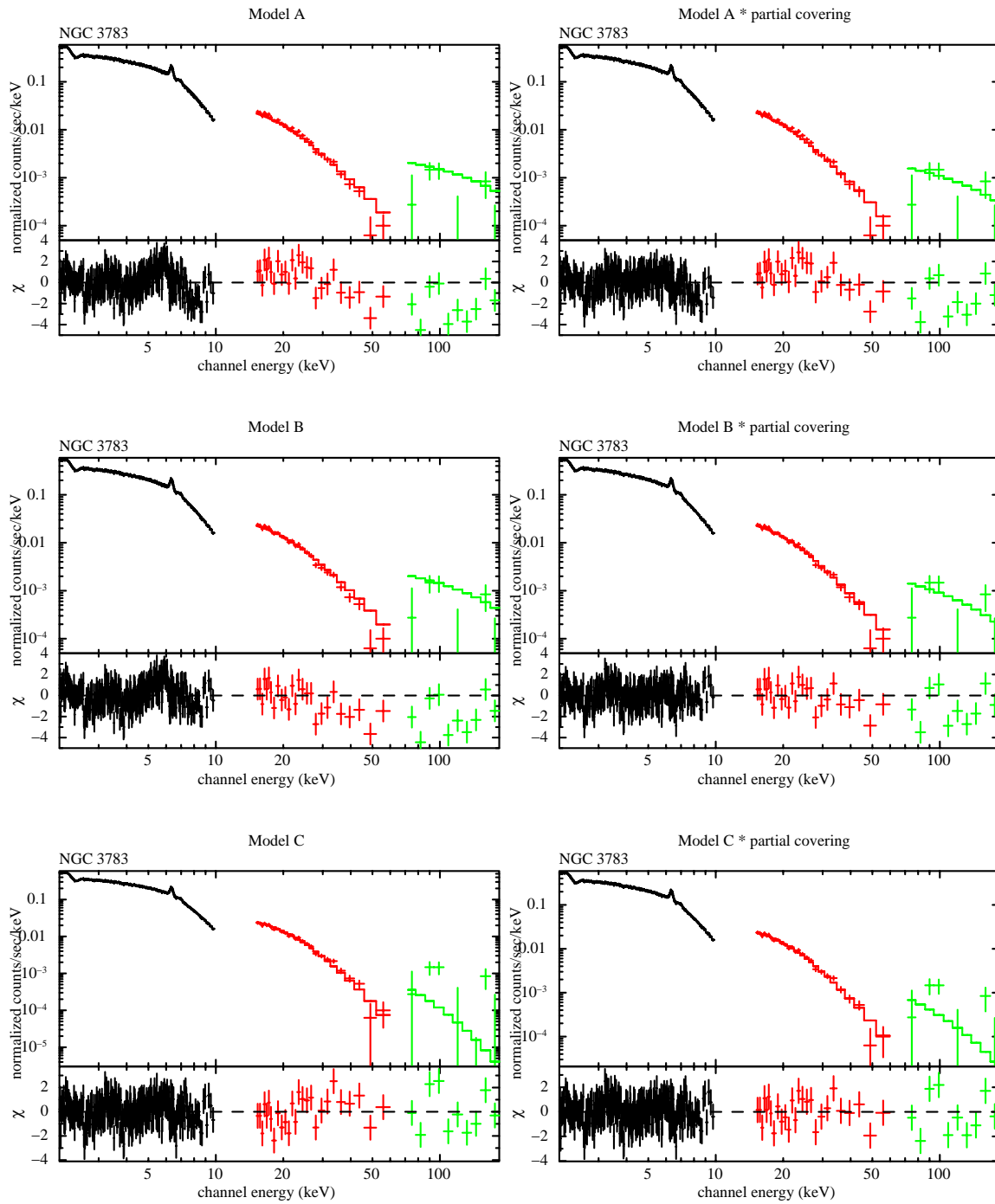


図 A.42: NGC 3783 のライトカーブ。左図：観測データを黒、BGD モデルを赤、両者の差を緑で示す。右図：観測データ (黒) と地没データ (赤) との比較

Component	Parameter	Model A×pc	Model B×pc	Model C×pc
-Absorber	N_H (10^{22})	0.71 ± 0.05	0.78 ± 0.06	0.58 ± 0.08
-Partial Covering	N_H (10^{22})	48.3 ± 3.3	26.3 ± 3.0	21.3 ± 5.2
	f	0.31 ± 0.03	0.26 ± 0.01	0.15 ± 0.03
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.75 ± 0.02	1.90 ± 0.03	1.75 ± 0.05
	N_{hard} (e^{-2})	1.65 ± 0.13	1.75 ± 0.10	1.29 ± 0.12
	R	-	1.15 ± 0.18	1.83 ± 0.33
	E_{cut} (keV)	-	1000(fix)	66.3 ± 17.6
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.392 ± 0.004	6.392 ± 0.004	6.392 ± 0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	24.4 ± 14.5	24.5 ± 14.5	23.4 ± 15.0
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.13 ± 0.60	7.14 ± 0.58	7.18 ± 0.58
χ^2/dof		420/312	350/311	327/310

表 A.18: NGC 3783



☒ A.43: Model A, B, C に部分吸収をかける前後の比較

付録B 鉄のアバundansを導入了た フイッテイング

Component	Parameter	Centaurus A	NGC 2110	MCG-5-23-16
-Absorber	N_H (10^{22})	11.1±0.42	4.20±0.33	1.61±0.18
-Fe Abundance		0.73±0.05	0.93±0.29	0.61±0.33
-Partial Covering	N_H (10^{22})	38.2±5.2	45.6±6.7	77.6±6.6
	f	0.19±0.02	0.14±0.03	0.37±0.03
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.83±0.03	1.70±0.04	1.86±0.06
	N_{hard} (e^{-2})	13.2±0.7	3.67±0.40	4.63±0.33
	R	4.90E-03	5.68E-03	0.24±0.21
	E_{cut} (keV)	361	210	118±31
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	15.5	18.9	-
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.395±0.002	6.401±0.004	6.394±0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	31.4±8.2	34.9±14.1	48.1±12.3
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	24.6±1.5	6.73±0.77	7.84±0.81
χ^2/dof		326/265	298/244	289/246

Component	Parameter	NGC 4388	NGC 3783
-Absorber	N_H (10^{22})	27.6±2.3	0.33±0.20
-Fe Abundance		0.93±0.12	1.96±1.10
-Partial Covering	N_H (10^{22})	30.3±26.3	25.9±12.2
	f	0.15±0.13	0.08
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.28±0.16	1.58±0.15
	N_{hard} (e^{-2})	0.62±0.22	0.98±0.24
	R	0.67±0.32	1.79±0.35
	E_{cut} (keV)	43.5±11.2	42.8±16.0
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	0.88±0.23	-
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.400±0.002	6.392±0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	34.9±7.0	19.1±16.9
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	8.48±0.43	7.10±0.60
χ^2/dof		195/133	326/309

表 B.1: 鉄のアバundansをフリーにしたとき

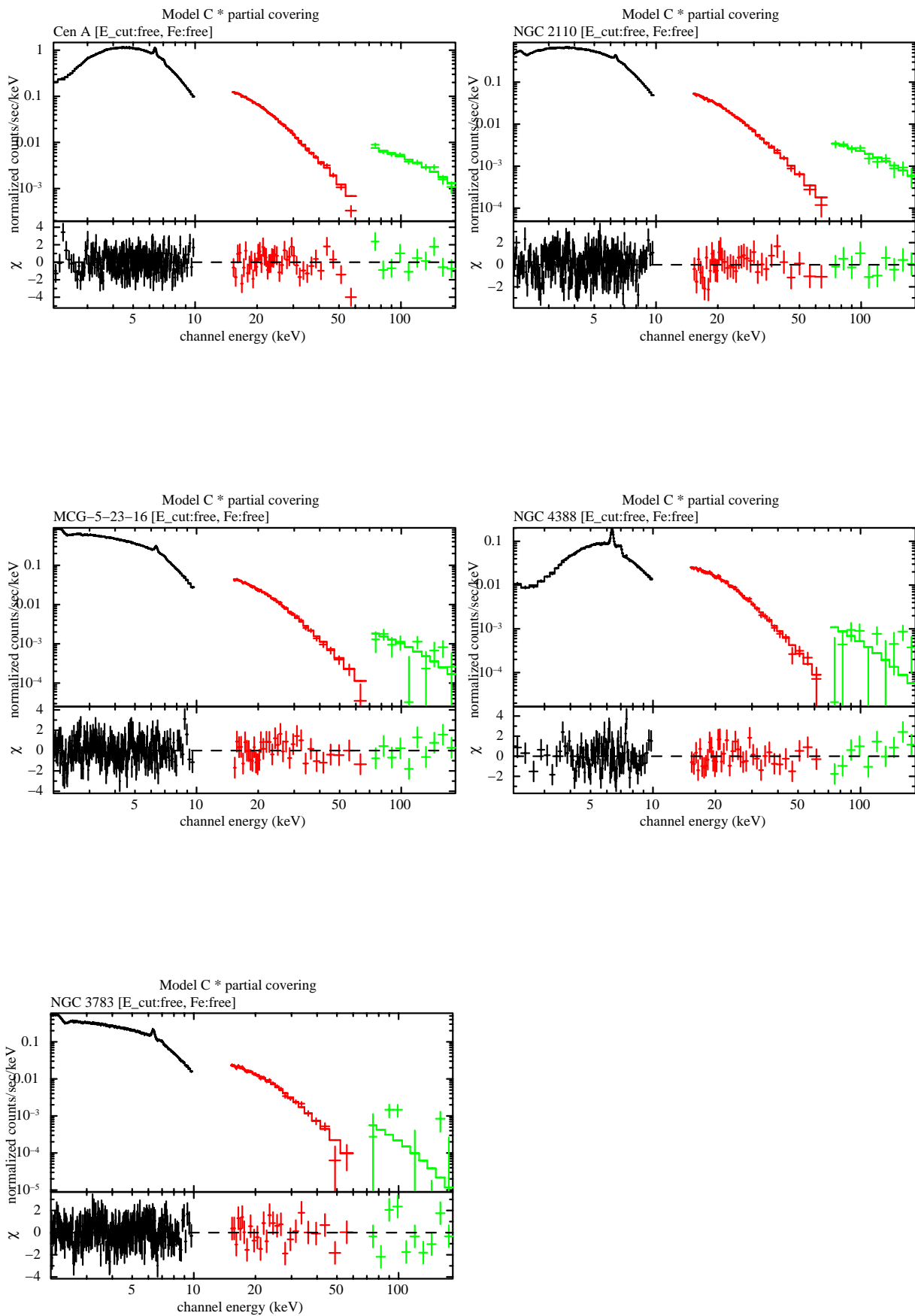
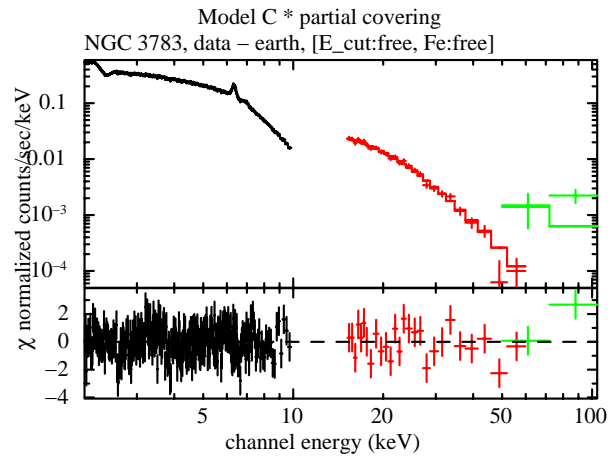
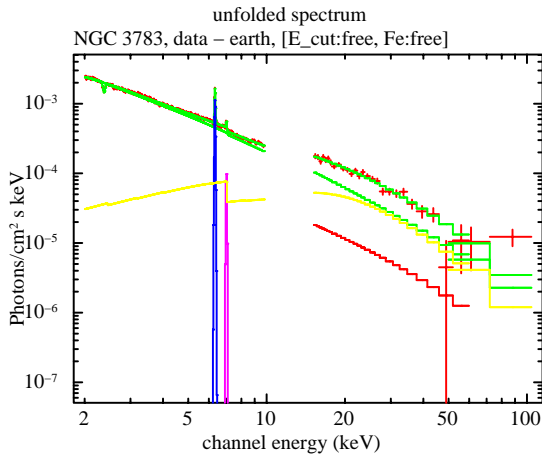
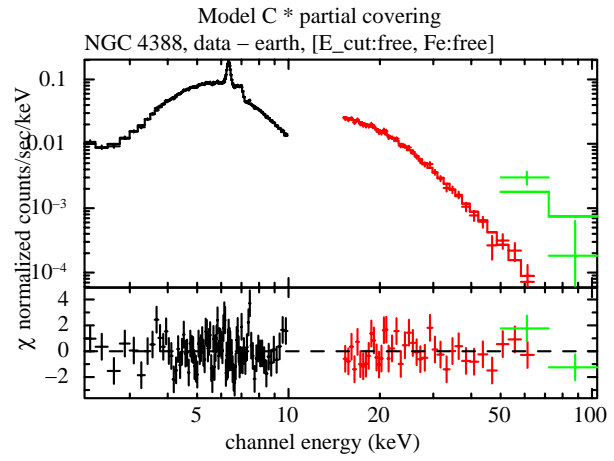
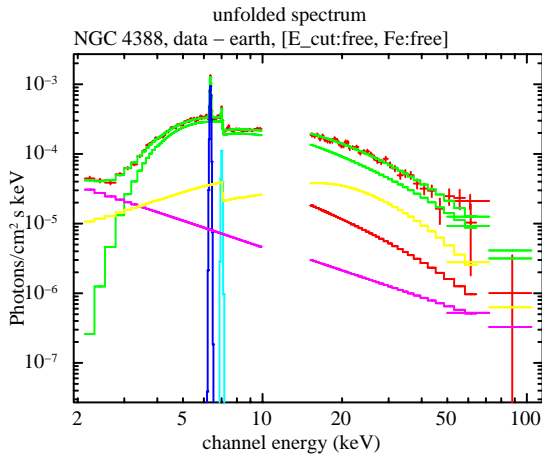
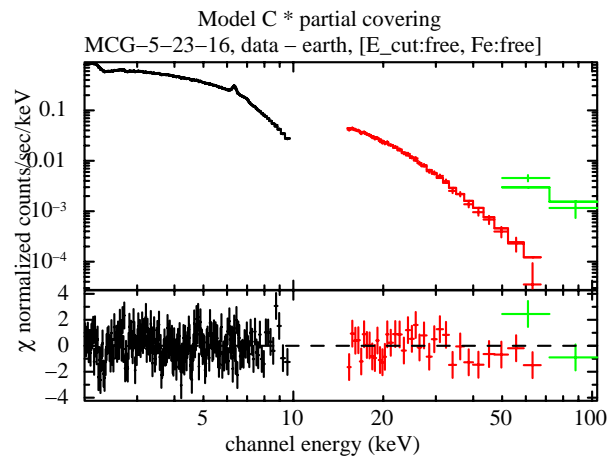
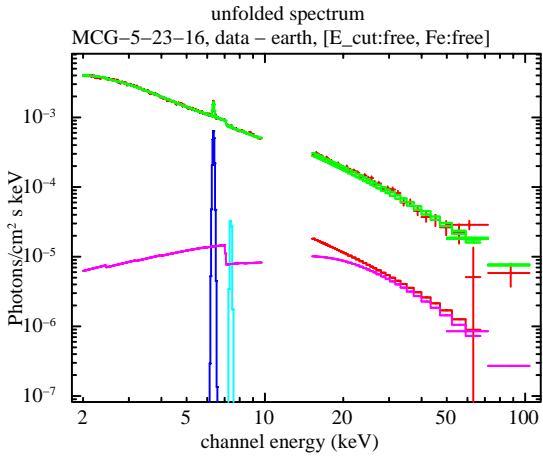


図 B.1: 鉄のアバダンスをフリーにしたときのスペクトル

付 録 C 観測データと地没データとの 差分フィッティング

Component	Parameter	MCG-5-23-16	NGC 4388	NGC 3783
-Absorber	N_H (10^{22})	1.48 ± 0.26	27.1 ± 3.1	0.61 ± 0.30
-Fe Abundance		0.96 ± 0.80	0.94 ± 0.12	1.06 ± 0.79
-Partial Covering	N_H (10^{22})	79.3 ± 5.5	20.0	23.8 ± 5.9
	f	0.38 ± 0.03	0.19	0.18 ± 0.08
-Hard X-ray Continuum	Γ	1.83 ± 0.06	1.27 ± 0.16	1.77 ± 0.20
	N_{hard} (e^{-2})	4.53 ± 0.32	0.60 ± 0.20	1.37 ± 0.43
	R	9.50E-02	0.71 ± 0.33	1.50 ± 0.34
	E_{cut} (keV)	128 ± 40	43 ± 11	93.2 ± 80.2
-Soft X-ray Continuum	N_{soft} (e^{-4})	-	0.86 ± 0.24	-
-Gaussian	$E_{FeK\alpha}$ (keV)	6.394 ± 0.004	6.400 ± 0.002	6.392 ± 0.004
	$\sigma_{FeK\alpha}$ (eV)	47.9 ± 12.3	35.4 ± 6.9	24.3 ± 15.2
	$I_{FeK\alpha}$ (e^{-5})	7.82 ± 0.80	8.50 ± 0.43	7.19 ± 0.61
χ^2/dof		286/238	183/125	309/301

表 C.1: 観測データと地没データとの差分のフィッティング結果



☒ C.1: GSO の観測データと地没データとの差分を用いたフィッティング結果

謝辞

本研究を行うにあたり、実にたくさんの方々からのご理解とご協力を頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。まず、研究を指導してくださった大杉先生と深沢先生に感謝いたします。特に指導教官である深沢先生には、データ解析から論文添削、はてはこれからの人生設計に至るまで、ありとあらゆることに関してお世話になりました。これまでの学部・大学院の研究生活を振り返ってみると、けっしてよくできた学生ではありませんでした。後先考えずにいつも自分勝手に行動して、御迷惑ばかりおかけしました。そんな私を見放すこと無く、丁寧に御指導してくださいましたこと、深く感謝申し上げます。

ポスドクのひろたかさんには、いつもかまって頂きました。年末年始の絶大なる援護といい、公私にわたり様々な面で頂いた御力添えをことごとく無駄にしてしまったこと、誠に申し訳ありませんでした。今後は自分の力のみで難局を乗り切っていこうと思います。

同期の白井君・竹本君・田中君・保田君という素晴らしいメンバーに巡りあえたことは学生時代の大きな財産であります。3年間、いろいろと面倒をおかけしましたが、なんだかんだいって助けて頂きました。本当に感謝します。

小部屋の皆様、3年間お世話になりました。小部屋基金にいったいいくら注ぎ込んだのか、もう忘れてしまいましたが、有効に使って頂いて嬉しい限りです。来年度からは社会に出ていく身ですので、二度と遅刻はしないよう心がけます。また、大学院生活の大半を共に過ごした研究室の皆様、楽しい時間をありがとうございました。

出てくるものは感謝の気持ちばかりです。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 高感度硬X線望遠鏡で切り拓く天体物理 (Astro-E Hard X-ray Working Group)
- [2] <http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/suzaku/scienti.shtml>
- [3] The Suzaku Technical Description
- [4] 東海林雅之、修士論文、2004年 大阪大学
- [5] 田代信、集中講義資料「活動銀河核」、埼玉大学
- [6] 笹田真人、卒業論文、2006年 広島大学
- [7] 永江 修、卒業論文、2003年 広島大学
- [8] Antonucci & Miller et al, 1985, Apj 297,627
- [9] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/images/epo/gallery/agns/index.html>
- [10] 阿部由紀子、修士論文、2004年 広島大学
- [11] Kaastra et al, 2000, A&A, 354, 83
- [12] Halpern et al, 1984, ApJ, 281, 90
- [13] Magdziarz & Zdziarski et al, 1995, MNRAS, 273, 837
- [14] Guainazzi et al, 2002, A&A, 388, 787
- [15] http://www.u.phys.nagoya-u.ac.jp/asca_html/agn.html
- [16] Mark H. Jones & Robert J. A. Lambourne, Cambridge University Press (2004/06), An Introduction to Galaxies and Cosmology
- [17] Richard Griffiths, James Reeves & Suzaku/SWG Team, The Power of Suzaku for Broadband X-ray Studies of AGN
- [18] Perola & Matt et al, 2002, A&A, 389, 802
- [19] Risaliti et al, 2002, A&A, 386, 379
- [20] Malizia et al, 2003, ApJ, 589, 17
- [21] Dadina et al, 2007, A&A, 461, 1209
- [22] Okajima et al(in preparation), 2007
- [23] Reynolds, Nowak & Maloney et al, 2000, ApJ, 540, 143

[24] Shinar et al, 2007, *ApJ*, 670, 188

[25] Petrucci et al, 2001, *ApJ*, 556, 716

[26] Dewangan et al, 2004, *ApJ*, 607, 788

[27] Pounds et al, 2001, *ApJ*, 559, 181

[28] 内野 雅広、修士論文、2007年 大阪大学